

Utilisation de
la photogrammétrie numérique
pour la modélisation de fonds
mobiles de modèles physiques
page 22

PRIX DE L'AFT

Analyse du risque végétation dans les emprises ferroviaires à partir de données LiDAR acquises par drones

page 15



UNE NOUVELLE CLASSE EST NEE

[autofocus]
powered by Nikon

Découvrez les
Nikon XS & XF,

les stations totales mécaniques les plus précises, robustes et légères qui soient. Dotées de la mise au point automatique et de l'optique Nikon, de la géolocalisation et d'un double affichage complet, nos stations totales s'appuient sur la qualité et la fiabilité qui ont fait de Nikon une légende.

Donnez le pouvoir à la productivité.



Directeur des publications

Tania Landes
Maître de conférences
INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière

Comité de Rédaction

André Bailly
Ingénieur géomètre ETP
Françoise Duquenne
Ingénieur général des Ponts honoraire
Stéphane Durand
Maître de conférences à l'ESGT
Ghyslain Ferré
Enseignant en topographie
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg
Michel Kasser
Professeur des universités
Jean-Pierre Maillard
Géomètre-expert foncier
Emmanuel Natchitz
Ingénieur géomètre

Elodie Sissler
Enseignant en topographie et foncier

Michel Trouillet
Ingénieur topographe

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothée Picard

ALBEDIA IMPRIMEURS

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



Dépôt légal

1^{er} 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 : 23 €

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 : Arbres présentant un risque dans l'emprise ferroviaire.
© ALTAMETRIS, filiale de SNCF Réseau.

afto 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>

Editorial 3

InfoTopo

> Les informations de la profession 5

Association

> Rassembler les acteurs de l'information géographique française
Jean-Marie SÉITÉ 9

Manifestation

> Bilan du Symposium sur la Navigation à Mystic Seaport en novembre 2017
Yves ROBIN-JOUAN 11

PRIX DE L'AFT

Lasergrammétrie

> Analyse du risque végétation dans les emprises ferroviaires à partir de données LiDAR acquises par drones
Luc PERRIN 15

Photogrammétrie

> Utilisation de la photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles de modèles physiques
Maxime CARTIER XATARD 22

Topométrie

> Arpent : un prototype de haute exactitude pour les mesures de grande distance
Maylis TEYSSENDIER DE LA SERVE
Jean-Pierre WALLERAND - Joffray GUILLORY
Daniel TRUONG - Christophe ALEXANDRE - José CALI
Stéphane DURAND 31

GNSS



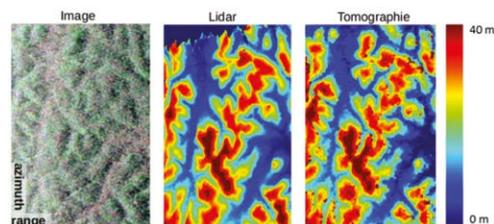
> Le réseau et les services Orphéon intègrent Galileo et BeiDou : quels sont les avantages pour le NRTK de haute précision ?
Xiaoguang LUO - Jun CHEN - Bernhard RICHTER
version française de François FUND 37

Géodésie

> Le CNIG et les références géodésiques
Françoise DUQUENNE 44
> Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations - Cas des territoires français
Françoise DUQUENNE 46

Récréation topographique ... 55

Téledétection



> Cartographier le relief sous les forêts, et le substrat sous les déserts de sable : les attentes de la mission radar Biomass
Laurent POLIDORI - Thierry KOLECK
Ludovic VILLARD - Mhamad EL HAGE
Philippe PAILLOU - Thuy LE TOAN 56

Auscultation

> Auscultation par GPS d'un barrage en enrochement : modélisation en 3D du comportement du barrage par l'utilisation du logiciel ANSYS
Nadia BOUHOUCHE - Bachir GOURINE 62

Art et géométrie

 > Stéphane Dafflon : U+25A6 ou le goût pour la nuance
Jean-Pierre MAILLARD 68

Ouvrages

André BAILLY 70

GSF

> La Team Teria participe au 17^e Raid Amazones au Cambodge et a choisi d'accomplir la performance pour GSF
Claire GALPIN 72

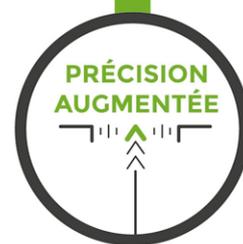
Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 71

PROCHAIN XYZ - n° 155
Scanner laser mobile sur bateau : méthode de comparaison de nuages de points 3D pour caractériser les éboulements



ORPHEON

UN SERVICE GEODATA DIFFUSION



LE PREMIER SERVICE D'AUGMENTATION DE PRÉCISION FULL GNSS* DE FRANCE

RECEVEZ LES
CORRECTIONS GALILEO

QUALITÉ, SERVICE, INNOVATION

NOUS PARTAGEONS LA MÊME EXIGENCE QUE VOUS !

+190 STATIONS

+10 ANS
D'EXPÉRIENCE

PLUS DE
6000 UTILISATEURS
SERVIS

- **Premium et Innovant**

Nouveau réseau **100% Multi-Constellation**
(GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo)

- **Couverture et maillage**

Couverture nationale **optimale**,
régulière et géométrique

- **Offres Tarifaires adaptées**

Dépensez à hauteur de vos **besoins**

- **Fiabilité et Service**

Sécurisation des données
et transfert en temps réel



Nos distributeurs
sont à votre écoute,
activation rapide en 48h !

contact@reseau-orpheon.fr

01 69 18 81 60

PART OF
HEXAGON

 **GEODATA**
DIFFUSION



Vers une association francophone de topographie ?

Les statuts de l'Association française de topographie permettent de créer des sections régionales. Si des dynamiques sections régionales ont fleuri dans la première décennie de la vie de l'AFT, il apparaît que celles-ci sont actuellement inexistantes.

C'est ainsi que le n° 18 de XYZ du mois d'avril 1984 nous informait des visites de la section Rhône-Alpes au barrage de Villerest, ou bien à l'usine Pernod solaire et aussi au métro de Lyon. Dans ce n°18 nous visitons aussi, avec la section de Bretagne-Pays de Loire, le Centre d'électronique et de l'armement de Rennes. De même les assemblées générales des sections régionales étaient dans l'agenda. Sans savoir depuis quand et pourquoi les sections régionales se sont étiolées, il est certain que cette floraison de sections régionales devait apporter à leur niveau la construction de réseaux professionnels, la participation à des événements techniques, académiques et leurs restitutions, voire à des réunions gastronomiques ou touristiques. En faisant connaître l'association, ces sections favorisaient le prosélytisme et ainsi le recrutement d'adhérents plein d'ardeur.

Alors, suggérons de relancer cette bonne idée. À l'échelon régional ou sous-régional, il suffit que des adhérents motivés se manifestent et qu'ils prennent contact avec notre conseil (info@aftopo.org) pour convenir de la marche à suivre. En effet le conseil se doit de délimiter l'emprise de la section en formation et faire connaître les contacts des adhérents susceptibles d'être intéressés. À vos idées, pour que vive l'AFT dans vos régions !

Nos collègues et amis belges n'ont pas attendu la parution de cet éditorial pour agir puisque depuis plusieurs mois des contacts informels puis officiels circulent entre nous.

Les Belges sont *"partis d'un constat simple : les associations en place sont des associations de géomètres. Elles s'occupent essentiellement de problèmes ayant une orientation administrative et également (malheureusement) sont freinées par des luttes intestines"*. Ils assurent que *"la topographie, qui n'est pas l'apanage du seul géomètre, n'est à notre avis pas mise en évidence actuellement"*. Ils confirment également que *"de nombreuses technologies sont apparues ces 20 dernières années qui procurent de nouveaux outils aux professionnels de la topographie : ces outils doivent être expliqués et mis en valeur avec une vision objective (pourquoi et quand utiliser telle technologie, tel outil...)"*. Enfin, ils ne peuvent *"plus rester isolés (les topographes) et donc veulent former une union, réseau, cercle... en vue de coopérer plus rapidement et d'échanger"*.

Finalement les buts de nos collègues d'outre-Quévrain rejoignent les principes fondateurs de l'AFT datés, nous le rappelons, de 1978. Nous correspondons donc avec eux avec grand intérêt et espérons rencontrer leurs représentants lors de notre prochain conseil du 15 mars.

Il ne suffirait plus qu'à changer le nom de notre association en Association francophone de topographie puis à inciter les professionnels des pays francophones à nous rejoindre. Seriez-vous prêt à sauter le pas ? En attendant, préparez votre candidature au conseil de l'AFT. Comme toutes les années paires vous recevrez en temps utile les documents nécessaires à la présentation de votre candidature en vue de l'élection de juin prochain.

Bernard FLACELIÈRE, rédacteur en chef

FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2018



L'Association française de topographie (AFT)
et le lycée Cantau, Anglet (Pyrénées-Atlantiques)



accueillent

le 14^e Forum de la topographie

le jeudi 29 mars 2018 de 9 h 00 à 17 h 30
1 allée de Cantau, 64600 Anglet

La cartographie mobile intérieure et extérieure

PROGRAMME

9 h 00 - 9 h 30	Ouverture du Forum et café de bienvenue	11 h 00 - 11 h 30	La parole aux exposants
9 h 30 - 9 h 45	Accueil des participants par Gérard MONPAYS, proviseur du lycée Cantau et Françoise DUQUENNE, présidente de l'AFT	11 h 30 - 13 h 00	Visite des stands
9 h 45 - 10 h 15	<i>"L'intérêt de la cartographie mobile pour les relevés topographiques à grande échelle",</i> Mikael ROYÈRE (GEOSAT)	13 h 00 - 14 h 00	Pause repas
10 h 15 - 10 h 45	<i>"La cartographie mobile et le géo-référencement précis de réseaux souterrains",</i> Quentin DARTIALH (IMAJING)	14 h 00 - 15 h 00	Café sur les stands
10 h 45 - 11 h 00	Baptême de la promotion GEO 3D par son parrain l'inspecteur général de l'éducation nationale et sa marraine la présidente de l'AFT	15 h 00 - 15 h 45	La parole aux exposants
		15 h 45 - 16 h 15	<i>"Préparation de la compétition internationale de localisation intérieure IPIN 2018 : cartographie de parcours piétons",</i> Valérie RENAUDIN (IFSTTAR)
		16 h 15 - 17 h 00	Remise du prix de l'AFT à Luc PERRIN, Maxime CARTIER XATARD et Maylis TEYSSENDIER DE LA SERVE (exposés de 10 mn chacun)
		17 h 15	Cocktail



■ Distinction à l'École nationale des ponts et chaussées



Sophie Mougard et le professeur Maksimovic

Le titre de Docteur *Honoris Causa* est le plus honorifique remis à une personnalité de nationalité étrangère en raison "de services éminents rendus aux sciences, aux lettres ou aux arts". Sophie Mougard, directrice de l'École des ponts ParisTech, a décerné au professeur Cedo Maksimovic ce diplôme prestigieux. Il vient honorer la qualité de ses recherches sur l'hydrologie urbaine. Ses travaux traitent notamment du drainage des eaux pluviales et de la gestion des inondations urbaines. L'École des ponts ParisTech a souhaité ainsi mettre à l'honneur une personnalité qui a consacré toute sa carrière à l'une de ses thématiques centrales : la recherche sur la ville résiliente.



■ LNE nouveau membre du Comité consultatif des unités

Lors de sa 106^e session, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a nommé le LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais) membre du Comité consultatif des unités (CCU). Ce dernier rassemble des experts internationaux afin de conseiller le CIPM sur les unités de mesures en général, leur réalisation ainsi que sur le développement et l'amélioration du Système international d'unités (SI), sur le plan scientifique ou technique. Le CIPM a reconnu les remarquables contributions scientifiques du LNE et des laboratoires du Réseau national de la métrologie française (RNMF) à la métrologie ainsi qu'à la future révision du Système international d'unités. En effet, en plus de son rôle d'institut national de métrologie, le LNE, grâce à d'excellents résultats obtenus pour les futures redéfinitions du kilogramme, du kelvin et de l'ampère, a aujourd'hui toute sa place dans ce comité.

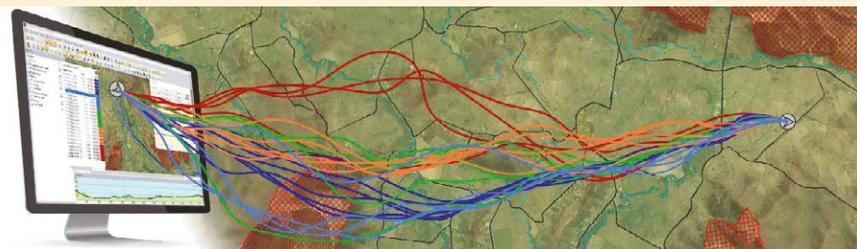
■ Société GEOCONCEPT - Master géomarketing

Après plus de 17 ans de collaboration avec l'UPEC (Université Paris-Est Créteil), GEOCONCEPT, éditeur de technologies d'optimisation géographique pour les professionnels, codirige désormais la formation de géomarketing en alternance, pour en assurer l'adéquation avec les besoins évolutifs du marché. Ce Master en géomarketing, unique en France, est proposé par la Faculté des Lettres, Langues et Sciences humaines (LLSH) de l'UPEC. Désormais, un collaborateur de GEOCONCEPT, maître de conférences associé, se voit confier la codirection de cette formation. Depuis sa création à l'UPEC en 2000, plus de 800 étudiants ont été formés vers une large palette de métiers ouverts aussi bien dans le secteur privé que dans les institutions ou les organisations publiques : chargé d'études, responsable géomarketing, directeur développement ou directeur en stratégie de développement, chef de marché et chef de produit, attaché territorial, consultant en marketing ou en géomarketing, etc.

► Sites : <http://www.geoconcept.com/> - <http://www.u-pec.fr/>

■ TRIMBLE Quantm Desktop 50

Quantm sont les solutions TRIMBLE de systèmes de planification des tracés. Trimble® Quantm® Alignment Planning System Desktop 50 est la nouvelle solution qui permet entre autres d'optimiser géométriquement un projet sur un MNT de 50 km sur 50 km, de visualiser de façon plus réaliste les tracés proposés et de montrer les économies de coûts avec des données quantitatives. Très utile pour des projets linéaires courts, des contournements ou des raccordements ferroviaires, cette solution aide à passer de la planification à la conception de manière plus transparente et avec une plus grande intégrité des données.



■ Le nouveau hub de data globales des Nations Unies s'appuie sur les technologies Esri

Esri a annoncé sa collaboration avec la Division Statistiques des Nations Unies. Esri travaille avec de nombreux états pour utiliser un hub de data, basé sur la solution ArcGIS et permet aux différents pays de mesurer, analyser et créer des rapports sur les objectifs de développement durable dans un contexte géographique. Cette collaboration permettra d'étudier l'évolution de l'éradication de la pauvreté, l'accès à l'eau potable, l'état des océans, l'égalité des sexes, l'action climatique, la paix et la justice, l'éducation et tout autre sujet majeur pour les Nations Unies. Elle met également en lumière le potentiel des systèmes d'information géographique (SIG) pour dresser un état des lieux par thématique et pour prendre les décisions stratégiques en conséquence.

■ Vedecom PPS géolocalise les véhicules au centimètre près

Depuis le 1^{er} janvier 2018, l'alliance Vedecom PPS a lancé le premier service mondial de localisation centimétrique en temps réel. Basé sur une hybridation des technologies de Géoflex, du CNES, de YoGoKo et de Sysnav, il s'adresse à l'industrie automobile et aux services de mobilité. Ce service utilise le PPP (Positionnement ponctuel précis) développé par le CNES et permet de déterminer une position avec une précision pouvant atteindre 4 cm et de retrouver ensuite ce point sur la carte à environ 2,5 cm près, soit la taille d'une pièce de deux euros. Et ce, partout dans le monde : sur terre, sur mer et dans les airs.

Note de la rédaction : cette information issue de la revue "Flottes Automobiles" mais largement diffusée au grand public par la presse généraliste doit être largement relativisée par les professionnels du positionnement GNSS. Nous vous invitons ainsi à lire l'article de Françoise Duquenne (et particulièrement sa conclusion) intitulé "Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations" dans ce numéro de XYZ, page 46.

■ Le récepteur de station de référence GNSS Trimble Alloy de nouvelle génération



Définissant un nouveau standard industriel avec 672 canaux, le récepteur Trimble Alloy CORS

(Continuously Operating Reference Station ou station de référence opérant en continu) permet aux utilisateurs et aux opérateurs un accès à plusieurs constellations et signaux en fournissant des données de référence robustes et fiables. Avec une classification IP68 pour la protection contre la poussière et l'humidité, le Trimble Alloy fonctionne même dans les environnements les plus difficiles pour répondre aux exigences des professionnels des sciences de la terre, de la topographie, de la construction, de la cartographie et de l'agriculture.

Fournissant des données GNSS de haute précision pour améliorer les performances et la fiabilité du RTN (Real Time Network ou réseau en temps réel), le récepteur GNSS Trimble Alloy permet à leurs propriétaires et opérateurs :

- de suivre et d'enregistrer tous les GNSS actuels et à venir ; alimenté par les nouveaux chipsets Trimble Maxwell™ 7 GNSS, Trimble Alloy suit et traite les signaux GNSS à des débits allant jusqu'à 100Hz, et est conçu pour les systèmes connus comme GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS, IRNSS ainsi que la gamme complète de SBAS,
- d'offrir une surveillance absolue de la position ; en s'appuyant sur la technologie de positionnement ponctuel précis (PPP) Trimble RTX™, le récepteur Trimble Alloy est en mesure de calculer sa propre position à un centimètre près en temps réel ; combiné avec la technologie avancée de surveillance Sentry™ de Trimble, le récepteur avertira automatiquement l'opérateur de tout changement d'état, y compris les changements de position,
- de permettre de nouveaux niveaux de confort ; un nouveau design de récepteur intelligent apporte un niveau d'utilisation sans précédent aux stations de référence GNSS, doté d'un écran OLED incliné à quatre lignes, le récepteur Trimble Alloy affiche des informations clés sans avoir à faire défiler plusieurs menus, les deux batteries remplaçables à chaud sont couplées à de multiples entrées d'alimentation et offrent aux utilisateurs des options d'installation flexibles, la connectivité Wi-Fi, plusieurs ports série et des options d'accès à distance permettent aux utilisateurs de configurer facilement l'appareil.

► Pour en savoir plus sur le nouveau récepteur de référence GNSS Trimble® Alloy™, visitez : www.alloy.trimble.com.

■ Scanner laser longue portée LEICA ScanStation P50

Leica Geosystems a sorti le Leica ScanStation P50, un scanner laser longue portée qui combine toutes les fonctionnalités du P40 avec une capacité de numérisation à plus d'un km. Robuste et polyvalent, il permet de capturer des données 3D à grande distance avec précision, de faibles émissions de bruit et une compensation à deux axes. Le ScanStation P50 permet désormais de scanner de grandes mines, longs ponts, barrages et gratte-ciel. Cette longue portée est particulièrement utile sur des infrastructures larges et hautes ou sur des sites dangereux. L'outil fournit des données 3D de grande qualité et une imagerie HDR à un taux de balayage extrêmement rapide sur des distances de plus d'un kilomètre.



■ Solution de Mobile Mapping Trimble MX7

Le Trimble MX7 est une solution novatrice pour la collecte de données SIG sur le terrain, avec une productivité et une facilité de mise en œuvre pour l'utilisateur. Un système de prise de vues haute résolution à 360°, représentant 90 % d'une sphère, est associé à un récepteur GNSS centimétrique et une centrale inertielle de précision. La suite logicielle Trimble MX assure la gestion, l'extraction et l'analyse des données structurées sous forme de points, lignes et surfaces et leurs attributs associés. Le calcul des positions s'effectue à partir des panoramas géoréférencés haute résolution produits à partir du Trimble MX7.



■ Esri et Autodesk s'associent pour optimiser la modélisation 3D de l'information du bâtiment

Esri et Autodesk ont annoncé avoir conclu un partenariat stratégique en novembre dernier. Les deux entités ont pour objectif de rapprocher le BIM et les SIG, et de permettre aux entreprises de bénéficier d'une meilleure visibilité des données liées à l'environnement et à l'urbanisme de demain. Ce nouveau partenariat va permettre à leurs clients communs d'intégrer les technologies BIM et SIG et les données correspondantes. Les utilisateurs bénéficieront ainsi de flux améliorés, optimisant la gestion de leurs projets de la phase de planification jusqu'à la construction. Cette collaboration marque un pas de plus vers la conception de villes toujours plus résilientes et connectées et avec des infrastructures axées sur le développement durable et répond à un besoin croissant, d'autant plus que 70 % de la population mondiale résidera en zone urbaine d'ici 30 ans. En combinant les outils BIM d'Autodesk et la plate-forme SIG d'Esri, les collectivités pourront facilement relier leurs données SIG et 3D.



■ Évolution du Havre en cartes et photos aériennes

Un nouveau site du CODAH (Communauté de l'agglomération havraise) permet de découvrir l'évolution du Havre de Grâce en 1500 au Havre en 2014 à travers des cartes et photographies aériennes. Il comprend 22 époques permettant par exemple de visualiser les premières photos aériennes du Havre avant bombardement (1939) et les premières photos après bombardement (1944).



► Site : <https://histoiredecartes.codah.fr/>

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BAILLY André,
ingénieur, Paris

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

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

CLÉDAT Emmanuel,
doctorant, EPFL (Suisse)

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

DURAND Stéphane,
maître de conférences, ESGT Le Mans

GRUSSENMEYER Pierre,
professeur des universités,
INSA Strasbourg

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

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

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA Strasbourg

LANDES Tania,
maître de conférences, INSA Strasbourg

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

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOREL Laurent,
maître de conférences, ESGT Le Mans

NATCHITZ Emmanuel,
ingénieur, EIVP Paris

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

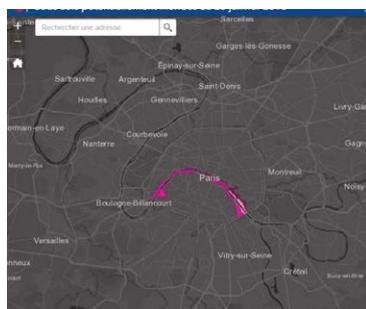
REIS Olivier, ingénieur,
traducteur Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval (Québec)

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

VIGUIER Flavien,
ingénieur topographe, Paris

■ Localisation des zones inondables en Ile-de-France



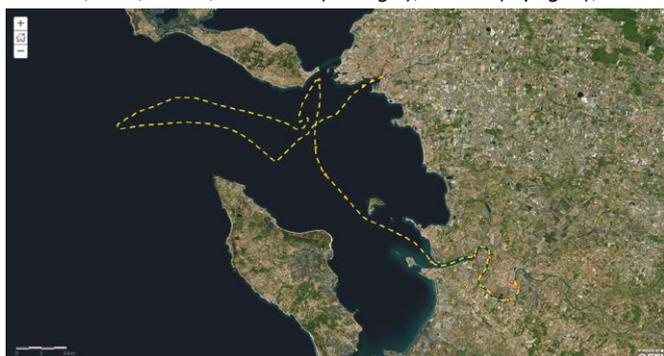
Cartographie de l'Institut d'aménagement et d'urbanisme Cartographie de la Mairie de Paris

Les logiciels d'Esri ont permis de mettre en évidence les zones inondables en Ile-de-France et plus particulièrement à Paris. L'Institut d'aménagement et d'urbanisme (IAU) a dressé une carte visant à informer le grand public des territoires potentiellement touchés par les inondations par débordements directs de rivières. La Mairie de Paris, quant à elle, a publié la carte des sous-sols potentiellement inondés au 26 janvier 2018.

► Liens : <https://cartoviz.iau-idf.fr/> - https://www.paris.fr/crue#carte-a-jour-des-sous-sols-potentiellement-inondes_6

■ Esri France cartographie le parcours de l'Hermione pour son nouveau voyage

Renouvelant son partenariat avec l'Association Hermione-La Fayette, Esri propose une cartographie quotidienne du parcours de cette frégate emblématique. Ces cartes narratives seront agrémentées de photos et de vidéos produites à bord. Intitulé "Libres ensemble de l'Atlantique à la Méditerranée", le voyage 2018 de la réplique de l'Hermione, la frégate sur laquelle La Fayette a navigué pour rejoindre l'Amérique en 1780, est parti de Rochefort le 30 janvier. Le navire, à bord duquel 100 jeunes issus des pays de la francophonie embarqueront au titre de gabiers volontaires, rejoindra ensuite La Rochelle, Tanger (Maroc), Barcelone (Espagne), Sète, Toulon, La Ciotat, Marseille, Port-Vendres, Nice, Bastia, Portimão (Portugal), Pasaia (Espagne), Bordeaux puis rentrera au port de Rochefort le 16 juin.



Site du voyage 2018 de l'Hermione : <https://www.hermione.com/voyage/voyage-2018/>



► Les tendances 2018 des SIG vues par Rony Gal, président et fondateur d'Esri France

Dans un communiqué de presse du 18 décembre 2017, Rony Gal, président et fondateur d'Esri France, présente sa vision des tendances 2018 des SIG.

Il insiste sur différents points tels que :

- l'accès aux données facilité par les formats ouverts et les standards d'échange ;
- l'ouverture du SIG auprès des citoyens ;
- le BIM ou la complémentarité du SIG et de la CAO ;
- la prise de décision sur le terrain en temps réel ;
- la vision intégrée de l'IoT (Internet des objets) ;
- la réalité virtuelle et augmentée ;
- l'observation et la simulation spatio-temporelle ;
- le Big Data.

Sa conclusion est la suivante : "... la spatialité de l'information géographique reste un marqueur fort de sa singularité. L'information géographique étend son champ des possibles, à travers le BIM, l'intégration de la dimension temporelle ou encore la réalité virtuelle. Autant de thèmes qui rendent cette



information différente des données alphanumériques. Néanmoins, ces tendances démontrent également que l'information géographique n'a jamais été aussi simple d'accès, aussi présente dans nos activités, aussi intégrée aux mutations technologiques que notre société vit. Sa spécificité n'est en aucun cas un frein au développement de sa discipline devenant ainsi « The Science of Where ».

► **Communiqué de presse complet : 20171218 Esri France - Tendances SIG 2018.pdf**
 Merci de contacter Esri France pour obtenir ce document.

► Nouvelle BCAA 5 "érosion" Carte des pentes du Géoportail



Une BCAA 5 (Bonnes conditions agricoles environnementales) "érosion" a été ajoutée aux règles de conditionnalité des aides PAC. Lorsqu'une parcelle présente une pente supérieure à 10 %, l'agriculteur bénéficiaire d'aides PAC est tenu de labourer perpendiculairement à la pente (en cas de labour réalisé entre le 1^{er} décembre et le 15 février) et d'implanter une bande enherbée large de 5 mètres en bas de parcelle. Une "orientation perpendiculaire à la pente" inclut toute orientation comprise entre +30° et -30° par rapport à la perpendiculaire stricte de la pente. Le Géoportail propose une cartographie des pentes supérieures à 10 % ; il est ainsi possible d'identifier les parcelles en intersection partielle ou totale avec ces pentes. Cela donne, à titre indicatif, les parcelles potentiellement concernées par la nouvelle BCAA. Grâce au Géoportail, les agriculteurs peuvent donc identifier les parcelles concernées et utiliser l'outil de profil altimétrique pour déterminer les pentes principales.

► **Lien :** <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-pentes-agriculture>.

Source : Coordination Rurale - <http://www.coordinationrurale.fr/nouvelle-bcae-5-erosion-etre-clous/>

Agenda des manifestations

■ **Le 29 mars 2018, Forum de l'AFT, lycée Cantau, Anglet (Pyrénées-Atlantiques)**
<http://www.aftopo.org/>

■ **Du 29 au 30 mars 2018, BIM World, Paris la Défense**
<http://bim-w.com/>

■ **Du 6 au 11 mai 2018, congrès de la FIG, Istanbul, Turquie**
<http://www.fig.net/fig2018/>

■ **Du 14 au 17 mai, European Navigation Conference (ENC2018), Gothenburg, Suède**
<http://enc2018.eu/>

■ **Du 22 au 23 mai, GeoBusiness à Londres**
<http://geobusinessshow.com/>

■ **Du 30 mai au 1^{er} juin, EUREF2018 Symposium à Amsterdam**
<https://euref2018.eventtouch.eu/>

■ **Du 21 au 23 juin, Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics) à Olsztyn, Pologne** - <http://www.bgc.geomatyka.eu/2018/>

■ **Du 25 au 28 juin, Conférence annuelle française de photogrammétrie et télédétection à Marne-la-Vallée**
<https://sfpt2018.ign.fr/>

■ **Du 26 au 28 juin, 44^e Congrès géomètres-experts, Bordeaux**
<http://www.geometre-expert.fr/>

■ **Les 27 et 28 juin, Innovative City à Nice**
<https://www.innovative-city.com/>

■ **Les 3 et 4 juillet, GeoDataDays au Havre** - <http://www.afigeo.asso.fr/>

■ **Du 19 au 21 septembre, 15^e journées de la topographie à l'INSA de Strasbourg** - <http://topographie.insa-strasbourg.fr/sujet/journees-de-la-topographie/>

■ **Du 24 au 27 septembre, 9^e IPIN2018 à Nantes**
<http://ipin2018.ifsttar.fr/>

■ **Du 24 au 28 septembre, ION GNSS+ à Miami, Floride**
<https://www.ion.org/gnss/>

■ **Du 5 au 7 octobre, FIG à Saint-Dié-des-Vosges** - <http://www.fig.saint-die-des-vosges.fr/>

■ **Les 10 et 11 octobre, SIG2018 conférence francophone Esri aux Docks de Paris**
<https://sig2018.esrifrance.fr/>

■ **Du 16 au 18 octobre, Intergeo à Francfort-sur-le-Main** - <http://www.intergeo.de/intergeo-en/trade-fair.php>

Rassembler les acteurs de l'information géographique française

En 2015, l'AFIGEO menait une réflexion sur son devenir et sa place dans l'écosystème de l'information géographique en France. C'était l'année où pour la première fois dans le monde, les échanges d'information avaient généré plus de flux financiers, que les échanges de marchandise.

Le constat rapidement mis à jour était double. D'une part, l'association qui fédérait un grand nombre d'acteurs au sein de ses trois pôles, usages, entreprises et enseignement-recherche ne parvenait pas à faire suffisamment entendre leurs voix et d'autre part le temps des pionniers devait laisser la place à une organisation plus structurée.

À la fin de l'année 2015, l'AFIGEO soutenue par l'IGN, prenait l'initiative d'une étude visant à explorer des pistes d'amélioration des structures d'animation et de coordination de l'information géographique en France. Le directeur général de l'IGN, Daniel Bursaux, confiait cette mission à Pascal Lory chef de mission CNIG, qui la conduisait accompagné des membres du bureau de l'AFIGEO.

L'étude menée de janvier à octobre 2016 confirmait la nécessité d'améliorer la lisibilité et la collaboration d'entités trop atomisées et nous éclairait sur les pratiques de nos voisins les plus performants. Néerlandais, Allemands et Danois fonctionnent sur des modèles différents mais tous intègrent un engagement fort de l'État et des collectivités. Leurs modes de financement sont variés, un financement public-privé aux Pays-Bas, l'organisation d'un événement annuel mobilisant les collectivités locales à Copenhague. À titre d'exemple, le budget de GEONOVUM rapporté au nombre d'habitants aux Pays-Bas et en France est dix fois plus élevé que celui du CNIG et de l'AFIGEO réunis. Les résultats sur le terrain s'en font sentir. Les

villes moyennes hollandaises sont dotées d'outils interactifs de participation citoyenne à leur gestion quotidienne. Les sociétés qui traitent des outils de géographie, d'histoire et de culture et pas uniquement des algorithmes y sont proportionnellement plus nombreuses. L'information géographique a su trouver sa place dans la gestion du territoire.

Le bilan de cette première partie de l'étude était clair, nos voisins étaient mieux armés que nous.

La seconde partie de l'étude ne préconisait pas d'évolution structurelle, mais une meilleure coordination entre le CNIG et l'AFIGEO adossée à des moyens plus ambitieux. La mise en place d'un centre commun de ressources pouvait permettre l'évolution progressive des mutualisations et une meilleure synergie. Ces deux structures se partagent le débat, la promotion des actions opérationnelles, la création de standards et la coordination INSPIRE.

Début 2017, le CNIG et l'AFIGEO, se sont engagés dans une période d'expérimentation de six mois visant par de possibles rapprochements à améliorer leur efficacité respective et la lisibilité de leurs actions auprès des acteurs du domaine.

Parmi les chantiers initiés, les plus significatifs étaient : la journée d'information et d'échanges sur COPERNICUS, la poursuite des travaux du groupe de travail PCRS du CNIG animé par l'AFIGEO et la conception et la mise en œuvre d'une conférence francophone de l'information géographique en parallèle à la conférence INSPIRE de Strasbourg.

L'AFIGEO sort de cette expérimentation

AFIGÉO
Association Française pour l'Information Géographique

ACCOMPAGNER LE DÉVELOPPEMENT DE LA GÉOGRAPHIE NUMÉRIQUE EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL

- DES PUBLICATIONS** pour partager et valoriser les expériences et savoir-faire français (French Tech, etc.)
- DES ÉVÉNEMENTS** pour favoriser les rencontres et inventer ensemble le secteur géométrique de demain
- DES THÉMATIQUES** pour initier et porter des actions collaboratives autour de sujets d'actualité (PCRS, Open Data, export, etc.)
- DES OBSERVATOIRES** pour suivre et analyser la dynamique du secteur (plateformes territoriales, entreprises, formations...)
- DES INFORMATIONS** pour suivre l'actualité législative, technologique... et les opportunités autour des géodatas

REJOIGNEZ L'AFIGEO
www.afigeo.asso.fr
afigeo@afigeo.asso.fr

DES PARTENAIRES
IGN, OGC, GeoRezo, DÉCRYPTAGEO, spatial, esri France, ENER'GIC, PENDINGATA, CITE, GEOSYSTEMS

avec une vision renforcée de ses futurs axes de développement, de meilleurs services rendus à ses adhérents, une capacité à associer des acteurs publics et privés sur des sujets variés et la capacité à organiser des événements s'adressant à l'ensemble des acteurs. Ces actions ont permis de démontrer notre capacité à associer des acteurs publics et privés sur des sujets variés et à identifier les pistes de notre future évolution. Elle passe par le rapprochement et la mise en œuvre de projets avec nos partenaires associatifs et ordinaux.

Pour faire entendre sa voix, l'information géographique française doit se rassembler, alors elle pourra convaincre les élus de la nécessité de la soutenir. ●

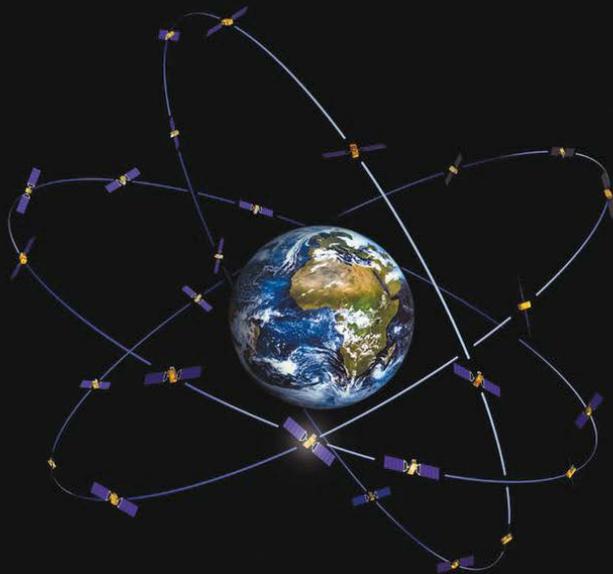
Jean-Marie SÉITÉ
Président de l'AFIGEO

VIENT DE PARAÎTRE

LES RÉFÉRENCES DE **TEMPS ET D'ESPACE**

UN PANORAMA ENCYCLOPÉDIQUE :
HISTOIRE, PRÉSENT ET PERSPECTIVES

Coordonné par Claude Boucher
Avec le concours de Pascal Willis




hermann

**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

Bilan du Symposium sur la Navigation à Mystic Seaport en novembre 2017

Yves ROBIN-JOUAN

Des Conférences sur les méthodes de navigation – historiques et modernes – sont plus ou moins régulièrement organisées par Frank Reed à Mystic Seaport (Connecticut, USA). Après celles de 2006, 2008 et 2010, l'édition 2017 a été un vrai succès. Frank Reed, physicien de formation, titulaire d'une thèse en gravitation, s'est fait connaître par la création du "Centennia Historical Atlas", retraçant l'histoire de la cartographie de l'Europe depuis l'an 1000 [1]. Il maîtrise largement les méthodes de navigation, est un expert reconnu de la méthode des Distances Lunaires et anime depuis des années le forum "Navlist" sur la toile internet. Ce forum, suivi à l'échelle internationale, est dédié à la navigation astronomique traditionnelle et à ses évolutions vers les technologies actuelles.

La Conférence a réuni théoriciens, praticiens et autres passionnés de navigation au planétarium Treworgy de Mystic Seaport, sur la côte Est américaine, face à la pointe de Long Island. L'Amérique, l'Australie, la Nouvelle-Zélande étaient représentées, mais aussi l'Europe par l'intermédiaire de l'auteur ! Mystic Seaport est un lieu prestigieux, à la fois un port et un village reconstitués à l'époque de la chasse à la baleine, un chantier naval de construction traditionnelle, mais aussi

un musée maritime vivant, un centre de recherche et de formation [2]. Il abrite quelques navires historiques, tels que le Charles W. Morgan, dernier baleinier survivant de l'Amérique, et la version reconstruite du Mayflower, en cours de restauration.

L'exposé qui suit a pour objet de donner un aperçu des sujets abordés et des contributions les plus significatives. Entre les contributions, les participants ont pu profiter de visites commentées du site de Mystic Seaport, ainsi que

d'interludes instructifs et amusants par Frank Reed sur les usages et coutumes des navigateurs. A noter que le reclassement en cinq sessions a été introduit par l'auteur pour mieux structurer son compte-rendu.

■ Session 1 : Accueil et approches

Frank Reed a ouvert la session en présentant une approche moderne et humoristique de la navigation astronomique. Diverses anecdotes ont été rappelées avec les grands océans en toile de fond. Notamment, ont été évoqués les cahiers publiés régulièrement à Gênes par le Baron de Zach – émule de Lalande et fervent de la loi de Bode – au début du XIX^e siècle, et l'un des complots montés pour libérer Napoléon de sa réclusion à Sainte-Hélène.

Mark Coady a magistralement déclamé une ode originale à la navigation astronomique, dans le vent, à bord du Charles W. Morgan. Après quoi, Tamara Plakins Thornton a présenté sa nouvelle biographie de l'illustre Nathaniel Bowditch [3] en montrant le développement commercial encouragé par son "Guide pratique du navigateur américain", dont l'édition régulière perdure jusqu'à nos jours.

■ Session 2 : Navigation traditionnelle et perfectionnements

Récemment retraité de l'US Naval Observatory, George Kaplan est revenu sur le remplacement progressif des instruments optiques classiques par des instruments électroniques dans les années 1980. Les instruments classiques utilisaient une cuve de mercure comme référence horizontale. Or les déviations locales dues à la gravimétrie constituent une limitation majeure de la précision de la navigation astronomique. Il se trouve qu'à Greenwich la déviation est de 5,502" vers l'Est. En conséquence le méridien de Greenwich



Le Mayflower II dans "tous ses états". En 2020, il rejoindra son attaché à Plimoth Plantation



Gabiers en formation à bord du Charles W. Morgan : 1 200 m² de voilure, 133 pieds hors tout (1841)



a dû être décalé d'environ 102 m parallèlement à lui-même lors de la définition du système géodésique WGS 84. Les mouvements du pôle n'ont pas affecté sensiblement ce décalage depuis 1984. Quant à la dérive "continentale" des îles Britanniques, elle n'excède pas 3 cm par an [4].

Frank Reed a repris les principes de la méthode des Distances Lunaires, en soulignant l'intérêt de son indépendance non seulement par rapport à l'horloge du bord, mais aussi par rapport à l'horizontale locale (et aux corrections associées). En contrepartie, la mesure des Distances Lunaires introduit des incertitudes nettement plus significatives que le calcul par les droites de hauteurs. Frank Reed a présenté les résultats intéressants d'un retraitement moderne d'exemples historiques issus de livres de bord [5].

Ancien du CERN, Robin Stuart est connu pour avoir développé une projection stéréographique qui exploite une formulation dans le corps des complexes (nombres imaginaires) pour la navigation astronomique [6]. Il a présenté une solution exacte au problème du transport du cercle de position sur une sphère, applicable localement à partir des formules classiques de trigonométrie sphérique. Une extension au transport sur un ellipsoïde ne pose pas de problème.

Robert Peterson est le représentant d'une profession qui se fait rare : l'ajustement, c'est-à-dire la compensation des compas de passerelle. Après un rappel des outils et conditions d'exercice, il a présenté les deux classes de méthodes pratiquées : le recours à un

gyro-compas ou les visées au taximètre du soleil à partir de son azimut calculé. Des courbes et résultats d'expérience ont été affichés. L'intérêt d'un compas à vanne de flux (*fluxgate*) est de s'affranchir de l'inclinaison du champ magnétique terrestre et des perturbations par les masses métalliques. De ce fait, il possède une certaine capacité d'auto-calibration [7].

■ Session 3 : expérience d'enseignement et sources d'erreurs

Philippe Sadler est professeur à Harvard et spécialiste en pédagogie. Depuis 1896, c'est une tradition à Harvard d'enseigner la navigation astronomique. La prise de notes sous forme de journaux individuels a conduit à recenser les préjugés et incompréhensions rencontrés chez les élèves. Cela va de l'ignorance du mouvement de la lune et des astres, aux généralisations hâtives et au plaquage de modèles sommaires sur la réalité. La réactivité des enseignants à adapter le contenu a permis la réduction des erreurs recensées et une appréciation de plus en plus favorable du cursus par les promotions d'élèves. Pour sa part, Bob Dugan a témoigné de son expérience de la navigation astronomique durant la course Marion-Bermudes de 2017. Formé à l'école de Frank Reed, il a relevé le défi d'être navigateur sur *Tiara*, en exploitant ainsi le bonus offert pour une traversée sans GPS. A *Mystic Seaport*, il a raconté ses difficultés, ses doutes et celles de l'équipage, avant qu'il puisse acquérir une certaine maîtrise technique. *Tiara*, sloop de 36 pieds, s'est classé second de la course ! [8]

Stan Klein enseigne la navigation astronomique aux US Power Squadrons. Il a beaucoup travaillé à partir du *Nautical Almanac* et en a constaté quelques faiblesses. Pour les besoins des USPS, il a développé un logiciel d'éphémérides, avec un soin particulier pour le Soleil et Vénus. Ce logiciel a été porté sur Windows™ en 2004 et des versions existent maintenant pour iPhone™ et smartphone [9]. Il a permis de déceler beaucoup d'erreurs sur les décimales du *Nautical Almanac officiel*. Catherine Hohenkerk, astronome retraitée du Bureau Hydrographique du Royaume-Uni (UKHO), a assuré que jamais une telle réactivité n'avait été constatée auparavant.

■ Session 4 : emploi de l'astronomie en vol – Essor du GPS

Tracy Shrier est venu témoigner de son expérience de pilote de moyen-courriers, notamment sur Bombardier. Certes les avions actuels disposent de tous les moyens modernes de navigation, à base de satellites et de balises électroniques au sol. Mais Tracy Shrier persiste à pratiquer la navigation astronomique en vol, avec les outils traditionnels : règles de conversion pression/altitude, sextant à bulle A-12 (pour s'affranchir du flou de l'horizon), tables HO 249, Air Almanac de l'USNO et manuels de Weems. Il a pris l'habitude de corriger la verticale qu'affiche la bulle du sextant, par l'accélération de Coriolis. Cette correction peut amener un décalage transversal jusqu'à 5 milles aux vitesses des jets actuels. Un certain nombre de points précis, pratiqués en temps réel, ont été présentés. Les plus récents (2016-2017) ont été réalisés sur trépied au sol.



Mystic Seaport : vue d'ensemble et quelques instruments du musée



Richard Easton est intervenu en tant que fils de Roger L. Easton, décédé en 1993, l'un des inventeurs du GPS avec Jim Van Allen et quelques autres [10,11].

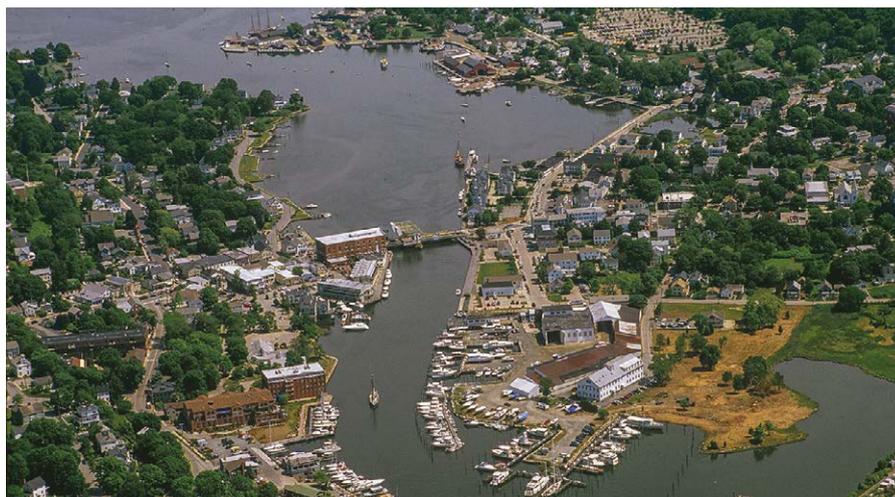
C'est l'orbitographie précise des satellites qui est la technique à l'origine du GPS (le précurseur Vanguard 1 est toujours en orbite). Le principe de la mesure passive de distance par le temps de vol à partir d'horloges atomiques remonte à 1964 (Arnold Shostak à l'ONR). Le rôle du Colonel Brad Parkinson a été décisif comme directeur opérationnel du programme GPS inter-Armes à partir de 1973. Le savoir-faire du programme TIMATION a été mis à profit. La génération "Block 1" a été lancée à partir de 1978.

Richard Easton a insisté sur la volonté initiale de construire un système dual, associant le monde civil qui a pu l'utiliser en topographie dès 1982¹. C'est la première Guerre du Golfe Persique qui a développé l'usage militaire du GPS, au-delà de toute prévision. Aujourd'hui où la précision et la miniaturisation des récepteurs sont optimisées, le système GPS entraîne une dépendance stratégique de beaucoup d'infrastructures gouvernementales et civiles, que seuls d'autres systèmes GNSS peuvent tempérer. Le marché aval du GPS pour les USA est de \$ 75 Milliards annuels, dont 10 relevant de l'agriculture et déjà autant de l'automobile en 2015. Le coût du développement du GPS est dorénavant amorti par les bénéfices dégagés aux USA par les myriades d'applications, sans parler du reste du monde.

■ Session 5 : tendances vers une navigation moderne

En réponse aux besoins du Navire Autonome comme du Véhicule Autonome, Yves Robin-Jouan a présenté un processus de navigation hybride directe, avec la Méthode du Plan des Sommets (MPS) comme base algorithmique commune. Cette méthode travaille sur les données brutes issues des capteurs, pour une hybridation en couplage serré, qui peut éventuellement se passer de moyens inertiels. La formu-

¹ Le premier récepteur GPS français a été réalisé et rendu opérationnel en 1984 au Laboratoire Central de Télécommunications (groupe ITT, Vélizy) où travaillait l'auteur.



© Jim Wark - AirphotoNA.com

Vue aérienne (Mystic Seaport en haut)

lation est globalisée sous forme d'une équation matricielle unique intégrant les mesures de tous les capteurs. A Mystic Seaport, des détails ont été fournis sur les caractéristiques analytiques des Sommets, pour 4 classes de cibles mesurées : astre, satellite, amer terrestre isolé ou couple d'amers distants.

Le traitement de quelques cas canoniques a montré comment la méthode MPS sait calculer un point par hybridation de relevés célestes et de visées terrestres. Des conclusions en ont été tirées sur le pilotage automatique des navires et sur la conduite autonome des véhicules. Le principe d'une hybridation à 3 niveaux de couplage a été évoqué [12].

George Kaplan a ciblé sa seconde intervention sur les orientations actuelles de la navigation, notamment au sein de l'US Navy. L'impact des limitations du GPS, d'origine accidentelle ou malveillante, est accru par la disparition des alternatives historiques. Or le coût unitaire des brouilleurs est descendu en dessous de \$ 200 sur le marché, sous l'effet d'une demande plus ou moins légitime ! Une première réponse est apportée par le durcissement du GPS III, le recours à des antennes directives en réception et la focalisation sur des empreintes au sol réduites ("spots") pour la couverture des services gouvernementaux en code M. Par ailleurs, les GNSS peuvent être aidés par des pseudolites sur certaines emprises (théâtres d'OPEX, aéroports...), et une hybridation avec des capteurs inertiels pour l'extrapolation à court terme. De nouvelles

constellations en orbite basse arrivent, en dégageant des marges de puissance. L'hybridation peut être étendue à la bathymétrie, au radar, et aux variations du champ magnétique terrestre.

Mais il reste qu'une automatisation de la navigation astronomique est réaliste sur un porteur aérien, avec une disponibilité meilleure que 80 % à 10 000 m. Le principal obstacle est la mesure de la verticale vraie, notamment en s'affranchissant des accélérations du porteur. Une approche optique plus robuste consiste à viser des objets célestes proches (satellites LEO ou MEO) et à repérer leur position sur le fond du ciel (dans le visible ou l'Infra-Rouge). Cela permet de se libérer de la verticale, mais réclame une résolution fine de l'optique. A cet effet, le DoD entretient un groupe de travail sur les suiveurs d'étoiles, avec des collaborations industrielles. La navigation en aval utilise un algorithme de moindres carrés sur les distances entre lieux estimés et lieux mesurés. Une précision de 20 m peut être obtenue à partir de satellites LEO une fois leurs éphémérides corrigées.

Les difficultés nouvelles soulevées par le brouillage et l'intrusion par masquerade dans les GNSS sont effectivement à prendre en compte. Frank Reed a construit une application tournant sur smartphone, qui est capable de détecter rapidement une certaine divergence de la navigation satellitaire, en s'appuyant sur des visées astronomiques au sextant. Depuis la Conférence, cette application a fait l'objet d'expériences croisées dont le détail figure dans le forum Navlist [13].



Conclusion

L'exposé précédent ne prétend pas être exhaustif. Dans une telle synthèse l'auteur ne peut éviter une part d'interprétation et certaines nuances introduites lors de la traduction. Le rôle de Frank Reed a été celui d'un animateur omniprésent, avec de multiples interventions aux plans historique, anecdotique et méthodologique, souvent entrelacées d'humour. L'accueil au Mystic Seaport a été chaleureux et la visite du musée est à recommander, notamment pour la qualité des objets présentés et l'ambiance "vintage" que chacun peut y apprécier.

En outre, Mystic est une jolie petite ville, blottie au bord de sa ria, où l'on peut admirer un magnifique pont à bascule de 1920 mais aussi déguster une pizza qui a rendu célèbre un certain film, et non l'inverse. C'est du moins ce qui se dit sur place à propos de "Mystic pizza" ! ●



Une recette devenue légendaire

Contact

Yves ROBIN-JOUAN
NAVECOM - Membre IFN, ION
Pôles PMB, MOV'EO, System@tic
yrobinjo@free.fr

Références et notes

- [1] Institute of Physics: "Once a Physicist : Frank Reed", Feb 06, 2017 http://www.iop.org/careers/working-life/profiles/page_57880.html
- [2] Stephen C. White: "Mystic Seaport, the museum of America and the Sea", 2017 <https://www.mysticseaport.org/about/>
A noter que le Mayflower II participera au 400^e anniversaire de l'arrivée des Pères pèlerins à Plymouth, en 2020
- [3] Tamara Plakins Thornton: "Nathaniel Bowditch and the power of numbers", "how a 19th century Man of business, Science and the Sea changed American life", University of North Carolina Press, Chapel Hill, 2016, ISBN 978-1-4696-2693-2
- [4] George Kaplan et Al.: "Why the Greenwich meridian moved", Journal of Geodesy, Volume 89, Issue 12, Dec 2015, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00190-015-0844-y>
A ce sujet, il faut aussi noter l'article en français de la présidente de l'AFT : Françoise Duquenne : "Le buzz autour du méridien de Greenwich", XYZ, N°145, 4^e trimestre 2015
- [5] Frank Reed: "My Lunar Distance Tables", Navlist forum, May 11, 2014 <http://fer3.com/arc/m2.aspx/My-lunar-distance-tables-FrankReed-may-2014-g27716>
- [6] Robin Stuart: "Application of complex analysis to celestial navigation", Navigation ION, volume 56 N°4, Winter 2009
- [7] E.S. Ritchie : "Why a compass?", instructions for compass use / compensation <https://www.ritchienavigation.com/resource-center/>
- [8] "Marion-Bermuda 2017 aboard Tiara" <https://www.youtube.com/watch?v=10jAG4WRbmU>
- [9] "ezAlmanac: a digital multi-year nautical almanac with digital sight reduction tables for CelNav". Up to 2059, to be used in the same way as published Almanac and HO-229. <https://ezalmanac-pro-ios.soft112.com/>
- [10] Richard D. Easton & Eric F. Frazier : "GPS declassified, from Smart Bombs to Smartphones", Potomac books, Nebraska University, October 2013, ISBN 978-1-61234-408-9
- [11] Ivan Alexander Getting ; "All in a lifetime, Science in the Defense of Democracy", chapter 28, Vantage Press, New-York 1989, ISBN 0-533-08220-X
- [12] Yves Robin-Jouan : "Navigation hybride en couplage serré associant amers célestes et amers terrestres par la Méthode du Plan des Sommets", à paraître dans XYZ
- [13] Frank Reed: "GPS Anti Spoof app", Navlist forum, Jan 8, 2018 and before <http://fer3.com/arc/m2.aspx/GPS-Anti-Spoof-app-FrankReed-jan-2018-g41122>

Olivier Reis

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

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

Reinhard Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe
Interprète diplômé de la
Chambre de commerce et d'industrie de Berlin
Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60
Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61
Courriel : stoelzel@aol.com

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

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service



Analyse du risque végétation dans les emprises ferroviaires à partir de données LiDAR acquises par drones

■ Luc PERRIN

La gestion du couvert végétal présent dans les emprises ferroviaires se pose comme un enjeu majeur pour SNCF. Les drones offrent une solution efficace de cartographie car ils permettent une grande souplesse d'intervention, sans perturbation du trafic ferroviaire. Ce projet d'étude a pour objectif l'exploitation des données du système LiDAR aérien VUX-1 UAV pour la cartographie des risques liés à la végétation. Les travaux menés ont permis de valider la qualité des données acquises et de préciser les protocoles de captation. Par ailleurs, pour parvenir à la détection de la végétation et des infrastructures, une chaîne de classification a été mise en place et intégrée aux processus. Différents modèles d'analyse de risque végétation ont alors été proposés et étudiés ; la perspective d'une individualisation des arbres a enfin été abordée. Sur la base des travaux de ce projet, l'industrialisation et la mise en production de l'analyse des dangers végétation est désormais possible.

■ MOTS-CLÉS

LiDAR aérien, drones, risque végétation, classification, précision, exactitude, nuage de points, emprises ferroviaires, individualisation d'arbres

Conscient des possibilités offertes par la récente émergence des drones, SNCF Réseau a mis en place dès 2014 un pôle dédié à l'exploitation des solutions drones, chargé de missions d'inspections, de cartographie et de surveillance des installations du Réseau ferré national (RFN). La photogrammétrie jusqu'alors utilisée pour répondre aux besoins présente des limites importantes, notamment en matière de mesures sous le couvert végétal. La technologie LiDAR, configurée sur des vecteurs drones (Figure 1), apparaît en revanche comme une solution très prometteuse. Dans cette perspective, le Pôle Drones de SNCF Réseau a récemment fait l'acquisition d'un système LiDAR hautement performant, constitué d'un scanner laser Riegl VUX-1 UAV et d'une centrale inertielle Applanix AP20.

Le sujet qui m'a été confié s'inscrit dans le programme d'intégration du système VUX-1 UAV et du traitement de ses données. Ce projet a été réalisé au sein du Pôle Drone de SNCF Réseau (officiellement filialisé en l'entreprise Altametris le 3 avril 2017) et a pour but la cartographie du risque végétation dans les emprises ferroviaires. Pour y parvenir, il sera nécessaire de quantifier la qualité des données acquises par le

Introduction

Avec ses quelque 33 000 km de lignes, SNCF (Société nationale des chemins de fer français) assure la gestion d'un des réseaux ferrés les plus importants d'Europe. Ce patrimoine nécessite une maintenance et un entretien sans faille afin de garantir la sécurité des équipements, du personnel et des voyageurs. C'est pourquoi SNCF effectue quotidiennement, à l'échelle du réseau, des opérations d'inspection et de surveillance des installations.

Le suivi et la maîtrise du couvert végétal représentent le deuxième poste de coût de maintenance, atteignant plusieurs dizaines de millions d'euros de dépenses annuelles. Les enjeux économiques, sociaux, sécuritaires et écologiques de la maîtrise de la végétation sont considérables. À ce titre, notons que l'ensemble des retards dus aux causes liées à la végétation sont estimés à 8 000 heures annuelles, chaque heure pouvant avoir un impact de plusieurs dizaines de milliers d'euros. C'est pour ces raisons que SNCF s'est

fixé l'objectif d'atteindre l'excellence opérationnelle en matière de maîtrise du couvert végétal (Viguié et al., 2015).

L'usage de drones se présente comme une solution efficace, car il permet une grande souplesse d'intervention, sans perturbation du trafic ferroviaire. Ces aéronefs télépilotés qui peuvent embarquer un large panel de capteurs rendent possibles des mesures par photogrammétrie, caméras thermiques et multi-spectrales, ou encore LiDAR (*Light Detection And Ranging*).



Figure 1. Drone RiCOPTER et système LiDAR VUX-1 UAV en vol.

► système LiDAR, d'établir une chaîne de classification de ces données et de définir des processus de traitement pour détecter les lieux où le couvert végétal présente un danger pour les infrastructures ferroviaires.

À terme, ces travaux devront permettre d'anticiper les incidents végétation, d'optimiser les missions d'élagage sur le terrain et donc de réduire considérablement les coûts de maintenance.

Étude de précision et d'exactitude du système LiDAR

Afin d'exploiter les données provenant de tout système de mesure, il est indispensable d'estimer quantitativement leur qualité. Cette étape est primordiale pour déterminer la précision des livrables, mais également pour optimiser les processus d'intervention terrain. Afin d'apprécier la qualité des nuages de points issus du système LiDAR, nous procédons à une étude de ses composants et de l'ensemble des traitements qui permettent de générer les nuages.

■ Le système VUX-1 UAV

En cartographie mobile, que ce soit par vecteur terrestre ou aérien, le système de mesure est soumis à des déplacements tant en position qu'en orientation. Pour géoréférencer les mesures, on ne peut donc se dispenser de la détermination complète de la trajectoire. Ceci est réalisable grâce aux capteurs GNSS¹ et aux unités de mesures inertielles.

Comme le décrit Jacquin (2015) le positionnement inertiel seul ne suffit pas à une détermination juste de la trajectoire du drone car il subit une dérive rapide dans le temps qui augmente exponentiellement. De même, les capteurs GNSS seuls ne sont pas non plus suffisants car ils ne fournissent pas d'information d'orientation. Les deux systèmes sont donc complémentaires. Dans le cadre de cette étude, l'antenne GNSS utilisée est du type G5ANT de la marque Antcom et la centrale inertielle est l'Applanix AP20. Enfin, le LiDAR

¹ Acronyme anglais pour Global Navigation Satellite System, c'est-à-dire système de positionnement par satellites.

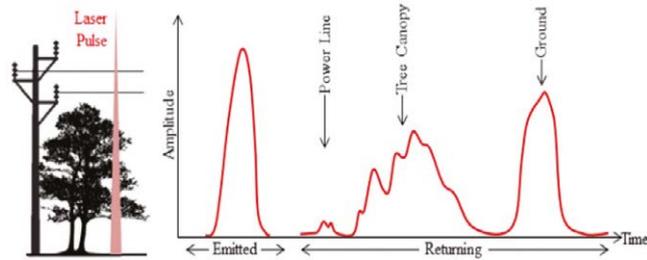


Figure 2. Illustration du retour d'onde complet d'une émission LiDAR, Kashani et al (2015).

utilisé est le VUX-1 UAV du constructeur Riegl. Ce scanner est dit multi-échos car il a la particularité d'enregistrer l'intégralité du retour de l'onde pour en extraire différents échos caractérisant les impacts du laser sur l'objet scanné (Figure 2). L'instrument s'avère ainsi très approprié pour des mesures sous le couvert végétal.

■ Le traitement des données captées

À l'issue de la captation, des informations inertielles GNSS et LiDAR ont été acquises. Il convient alors de traiter l'ensemble de ces données pour obtenir le nuage de points brut. Pour cela, les traitements sont divisés en trois étapes majeures.

Tout d'abord, le post-traitement des données trajectographiques permet de calculer précisément la trajectoire du drone à partir des données GNSS et inertielles mesurées en vol, ainsi que des observations du Réseau GNSS Permanent (RGP). L'étape est cruciale car sa qualité va impacter la suite des traitements. Décrite par Jacquin (2015), la méthode la plus adaptée à la fusion de ces données est le filtre de Kalman qui utilise des méthodes de compensation par les moindres carrés pour prédire et corriger les erreurs liées aux systèmes de mesure. La trajectoire ainsi calculée a une précision d'environ 2 centimètres.

La deuxième étape correspond au calcul des angles de calibration de système.

En effet, le système est régulièrement amené à être déplacé et repositionné sous le drone engendrant ainsi des variations angulaires non négligeables entre le repère du drone et celui du LiDAR. La mesure physique des écarts angulaires de la calibration n'étant pas réalisable, on recourt à un traitement logiciel des acquisitions pour déterminer ces angles. La solution développée par Riegl se base sur la mise en correspondance de plans détectés dans différentes bandes de scannage. Les valeurs calculées sont les trois angles de calibration (roulis, tangage et lacet) qui minimisent, au sens des moindres carrés, les écarts entre les plans détectés et appariés. Les tests réalisés ont permis d'établir un protocole précis d'acquisition terrain afin d'obtenir des valeurs de calibration fiables, valeurs indispensables pour la fourniture d'un nuage de points de qualité.

La dernière étape correspond à un calcul permettant d'affiner la détermination de la trajectoire pour limiter l'impact de l'incertitude sur la trajectoire post-traitée dans le nuage de points généré. Au sein d'une même zone couverte par différentes bandes de balayage laser, nous pouvons constater des décalages de plusieurs centimètres dans le nuage. Ce calcul d'amélioration trajectographique se base sur l'utilisation de points d'appui (préalablement pointés), et de primitives géométriques automatiquement détectées dans les nuages. Des corrections angulaires et tridimension-

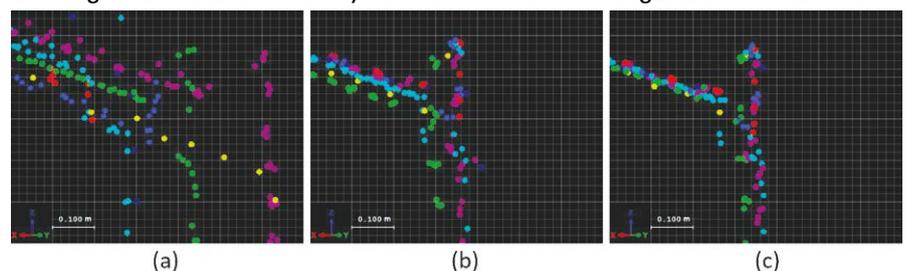


Figure 3. Visualisation de l'amélioration de la précision du nuage au fil des traitements ; coupe sur un bâtiment ; une couleur par bande de balayage. (a) Sans calibration ; (b) Après calibration ; (c) Après calibration et calcul d'affinement trajectographique.



nelles sont appliquées tout au long de la trajectoire améliorant ainsi la précision relative et absolue du nuage. La *Figure 3* illustre l'amélioration de la précision du nuage au fil des traitements.

■ La précision des acquisitions

La qualité des acquisitions est intrinsèquement liée aux conditions d'acquisition, et donc au drone, à sa vitesse et sa hauteur d'évolution. Au sein d'Altametriz, le système LiDAR peut être embarqué à bord de deux types de drones :

- Le drone à voilure fixe DT-26 conçu par Delair-Tech pour des acquisitions sur de longs linéaires.
- Le drone à voilure tournante RiCOPTER construit par Riegl pour des captations localisées.

Plusieurs missions terrain ont alors été menées afin d'estimer la qualité des données acquises dans les conditions classiques d'utilisation de ces deux drones. Le *Tableau 1* résume les principaux résultats ainsi obtenus.

La précision relative est quantifiée par étude de la dispersion locale des points autour de leur valeur moyenne. La précision absolue est, quant à elle, obtenue par comparaison de pointés de cibles (dits points de contrôle) aux coordonnées GNSS mesurées sur le terrain. Enfin, l'exactitude quantifie les écarts entre les pointés sur cibles et leurs coordonnées vraies. Pour être calculée, elle nous a nécessité des acquisitions de précision des GCP (*Ground Control Points*, c'est-à-dire points d'appui) et des points de contrôle par levé statique de 30 minutes à l'aide de récepteurs équipés d'antennes GNSS *choke rings*.

En définitive, cette étude nous a permis de montrer que selon le protocole terrain, la précision absolue du nuage peut être meilleure que deux centimètres, ce qui est conforme aux critères SNCF en matière de cartographie de la végétation, et suffisamment performant pour investiguer des solutions d'individualisation de la végétation.

Drone	Hauteur d'évolution	Vitesse de vol	Densité de points	Précision relative	Précision absolue	Exactitude à 7 GCP/km
RiCOPTER	50 m	7 m/s	250 pts/m ²	0,017 m	0,019 m	–
DT-26	80 m	17 m/s	100 pts/m ²	0,031 m	–	4 cm

Tableau 1. Bilan des principaux résultats de précision et d'exactitude du système VUX-1 UAV

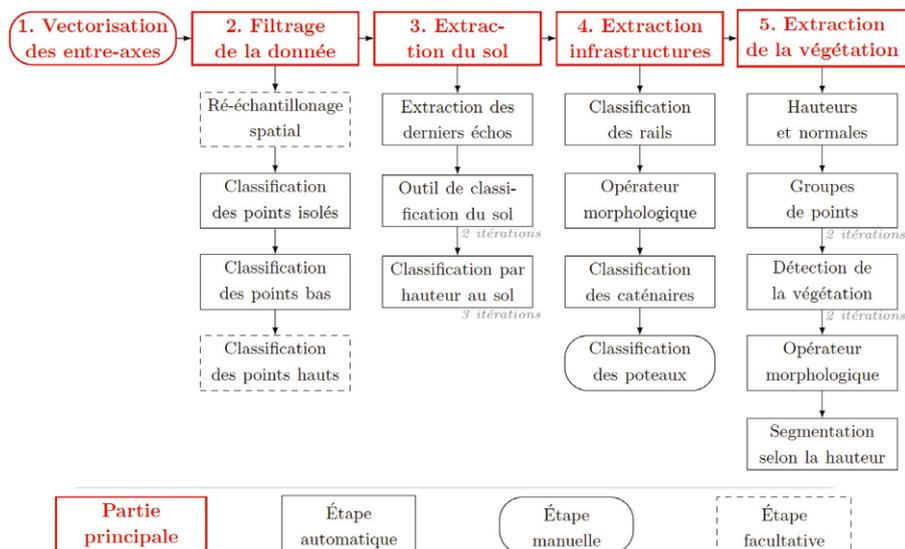


Figure 4. Chaîne complète de classification.



Figure 5. Exemple de résultat de la chaîne de traitement de classification.

Classification de données LiDAR

La localisation du risque végétation implique la connaissance de la position du couvert végétal et des infrastructures. Pour détecter et dissocier ces éléments, une classification des nuages LiDAR est nécessaire.

■ La mise en place d'une chaîne de classification

La première étape consiste à cibler précisément les classes à extraire. Il nous faut bien entendu extraire les infrastructures les plus impactées par les chutes de végétation. Celles-ci sont les rails, les fils caténaires et les poteaux caténaires. Par ailleurs, comme nous visons la détection des dangers macroscopiques de la végétation, celle-ci a été

segmentée en deux classes selon sa hauteur : la haute végétation (HV) qui est le cœur de notre étude (supérieure à 2 m) et la basse végétation (BV, inférieure à 2 m). Toutefois, Xu et al (2014) montrent que l'extraction de ces classes nécessite la classification préalable du sol et le filtrage des points isolés.

La qualité de classification du sol ayant un impact sur l'extraction des autres classes, nous avons confronté la solution CSF développée par Zhang et al (2016) à celle de TerraScan. Bien que plus lente cette dernière a été retenue car plus qualitative. Pour une extraction robuste des éléments linéaires (fils caténaires et rails), nous avons fait le choix de procéder en amont à une digitalisation des entre-axes des voies. En raison de sa forme hétérogène, la classification de la végétation est assez complexe. Plusieurs approches géométriques et même neuronales ont été investiguées. C'est à la parution de l'article GeoCue (2017) qu'une solution morphologique par groupes de points a été retenue.





Cette chaîne de classification a été mise en œuvre par édition de macros concaténant différents outils et fonctions proposés par le logiciel TerraScan. La Figure 4 résume la chaîne de classification mise en place et un exemple de résultat est donné en Figure 5.

Analyse qualitative de la chaîne de classification

La chaîne de classification étant établie, il est du ressort de l'ingénieur géomètre de l'analyser. Pour cela la littérature distingue deux principaux critères : l'efficacité (relative aux temps de traitement homme et machine), et l'exactitude (relative à sa qualité). Le Tableau 2 résume les temps de traitement de la chaîne de classification.

Pour déterminer l'exactitude d'un nuage, il est nécessaire de le comparer à une donnée de référence considérée comme exacte. Confronté à une classification manuelle et minutieuse, chaque point du nuage se voit recevoir deux attributs de valeur de classification : l'un obtenu par la chaîne de traitement, l'autre obtenu manuellement. Il est alors possible de dresser une matrice de confusion (Tableau 3) recensant pour chaque classe les taux d'exactitude (sur la diagonale) et taux d'erreur. On distingue deux types d'erreurs en matière de classification. D'une part les erreurs d'excédent (également

appelés faux positifs en statistique) qui quantifient pour une classe donnée le pourcentage de points attribués à tort à cette classe. D'autre part les erreurs de déficit (également appelés faux négatifs en statistique) qui quantifient le pourcentage de points qui n'ont, quant à eux, pas été placés dans cette classe. À partir de ces taux d'erreur et d'exactitude, le coefficient Kappa de Cohen présenté par Girard et Girard (1999) permet de calculer un coefficient indexé d'exactitude globale de la classification. Signalons que pour homogénéiser ce coefficient au regard de la grande disparité des points au sein des différentes classes, le calcul a été normalisé en fonction du nombre de points de chaque classe.

Les performances atteintes, tant en termes d'exactitude que de rapidité de traitement, ont permis l'intégration de la chaîne développée aux processus de production d'Altametris.

Analyse du risque végétation

Fort de cette classification des données, il nous est désormais possible d'entreprendre l'analyse des dangers végétation sur les infrastructures. Les spécialistes végétation de SNCF Réseau définissent principalement le risque végétation comme un danger immédiat pour les infrastructures. Ces risques ont été segmentés en deux classes selon leur imminence :

- **Catégorie U1** : l'arbre engage le gabarit ferroviaire et affecte à court terme la sécurité des installations. Cette catégorie nécessite la planification immédiate d'une intervention.

- **Catégorie U2** : l'arbre présente un risque de chute possible sur les installations. La programmation d'une intervention est à établir sans caractère prioritaire.

Dans notre étude nous proposons trois approches de détection des dangers végétation :

■ Approche curative : identification des risques imminents

Le but de cette approche est l'identification des risques immédiats de la catégorie U1. Ceci équivaut à effectuer une classification de la végétation par distance horizontale aux infrastructures. Pour conserver une certaine gradation dans la notion de danger, nous avons choisi de calculer la distance horizontale de tous les points de la végétation aux plus proches infrastructures. Les points dont la distance est inférieure à 3 mètres sont colorisés et représentent les dangers imminents à curer au plus vite. Pertinent et efficace, le modèle trouve néanmoins rapidement ses limites en présence d'arbres de grande taille au-delà de cette bande de proximité. Il nous faut donc considérer la hauteur des arbres.

■ Approche préventive : maîtrise du risque

Cette nouvelle approche vise à détecter l'intégralité des dangers végétation susceptibles d'impacter par chute les infrastructures ferroviaires. L'idée du modèle est donc de comparer en tout point du sol, la hauteur maximale de la végétation (H_v), à la plus courte

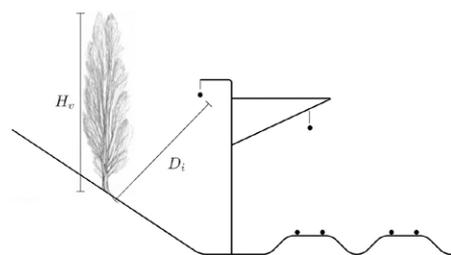


Figure 6. Schéma de principe de la détermination de la présence de danger végétation.

Classification manuelle	Classification semi-automatique	
Total : t ≈ 9 heures	Phase manuelle : t = 2'30"	Phase automatique : t = 10'30"
	Total : t = 13'	

Tableau 2. Bilan des temps de traitement de la chaîne de classification sur un nuage de 10,6 millions de points.

Classification automatique	Classification manuelle						Erreur d'excédent
	Autre	Sol	BV	HV	Fils	Rails	
Autre	95,7 %	0,1 %	1,4 %	0,1 %	0,6 %	0,3 %	0,42 %
Sol	2,9 %	98,5 %	5,8 %	0 %	0 %	0 %	1,44 %
BV	1,3 %	1,3 %	91,9 %	0,3 %	0 %	0 %	0,49 %
HV	0 %	0 %	0,9 %	99,6 %	0 %	0 %	0,15 %
Fils	0,1 %	0 %	0 %	0 %	99,4 %	0 %	0,01 %
Rails	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	99,7 %	0,00 %
Erreur de déficit	0,71 %	0,71 %	0,25 %	1,35 %	0,06 %	0 %	$\kappa = 97 %$

Tableau 3. Matrice de confusion de la classification et Kappa associé. Étude effectuée sur 7,6 millions de points. HV : haute végétation, BV : basse végétation



Figure 7. Exemple de résultat de l'identification de risque par approche préventive (sans échelle).

distance aux installations (D_i). Si cette première est supérieure à la seconde, il y a danger possible (Figure 6). La valeur du danger se calcule alors immédiatement par la formule ci-dessous :

$$D_{\text{danger}} = D_i - H_v$$

Un exemple de résultat du modèle est donné dans la Figure 7.

Ce modèle plus complet met en évidence davantage de risques. Cependant, certains de ces risques détectés n'en sont pas réellement au vu de la topographie du terrain. La présence de déblais aux abords des voies peut diminuer drastiquement la probabilité de chute de l'arbre sur la voie.

■ Approche prédictive : anticipation du risque

Afin d'apporter une réponse au besoin de gestion anticipative du couvert végétal, nous proposons un modèle qui est une première solution en vue de la

mise en place d'une approche prédictive complète. Ce modèle vise donc à pondérer de façon probabiliste la précédente approche au regard du profil du terrain. Elle nous permettra d'exclure un certain nombre d'arbres faussement dangereux et d'affiner la détection des risques.

Pour cela nous calculons les pentes du sol sous la végétation. Assali (2014) montre que deux informations viennent caractériser ces pentes (Figure 8) :

- La direction de pendage. Dans notre étude c'est la direction par rapport aux infrastructures que nous retenirons (α_R)

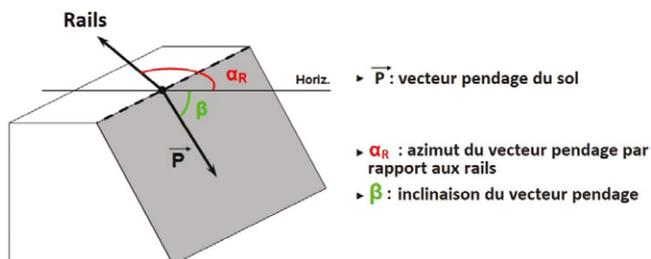


Figure 8. Représentation des notions de pendage, Assali, (2014) modifié.



Figure 9. Comparaison des résultats obtenus par les approches préventive (à gauche) et prédictive (à droite) (sans échelle).

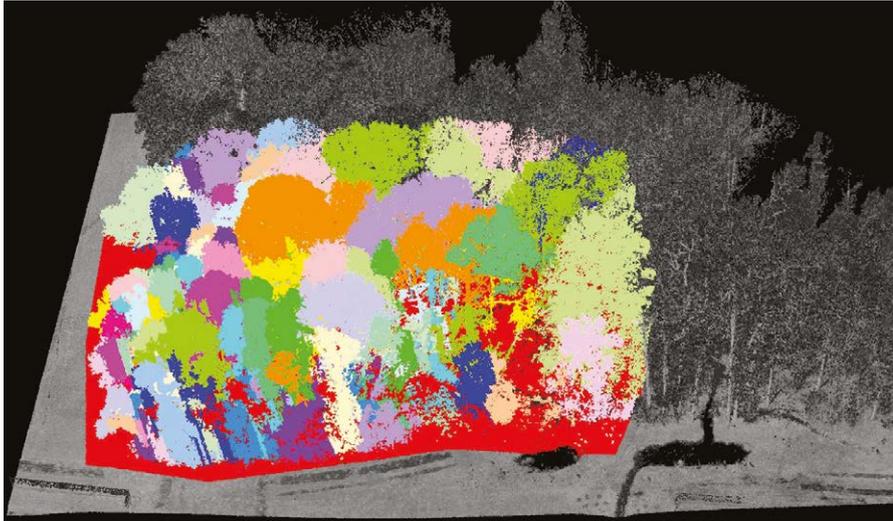


Figure 10. Individualisation de la végétation (*CompuTree*, sans échelle).

► faudrait des échantillons statistiques acquis sur plusieurs années. Ne disposant de telles données, nous avons retenu la définition telle que vue précédemment. Il est probable que cette pondération soit légèrement trop faible. Ces trois modèles ont été conçus pour être déployés sur des données spatialement rééchantillonnées. Ainsi, dans le but d'une création de carte de risques, il est possible de rasteriser les données, les temps de traitement s'en trouveront drastiquement diminués.

Toutefois, dans ces trois approches, le danger est obtenu comme un attribut des points et non comme caractéristique de l'arbre. Ainsi, la limite de ces modèles réside dans le fait que l'entité de référence demeure le point et non l'individu. Progressivement, la direction de la Maintenance de SNCF Réseau se tourne vers une caractérisation individuelle des arbres.

Vers une individualisation de la végétation

En complément de nos études et dans la continuité des travaux de Pereira (2015), nous avons investigué plusieurs solutions d'individualisation des arbres. Au vu de la haute densité des données issues du système LiDAR, et de leur précision élevée, notre état de l'art nous a conduits à envisager des solutions issues du traitement de données laser acquises par voie terrestre.

La première solution est *CompuTree*,

le logiciel libre développé par l'Office National des Forêts (ONF). Les traitements sont divisés en deux étapes majeures :

- Extraction des troncs dans une fine bande de la végétation parallèle au sol. Le résultat est plusieurs fois statistiquement filtré de sorte à n'avoir plus que des points sur les troncs.
- Les points de chaque tronc sont alors groupés sous forme d'un ensemble de points (*clustering*) et les groupes sont propagés de proche en proche aux branches puis aux feuilles.

Bien que déjà très prometteur, le résultat de ce traitement automatique présente un certain nombre d'erreurs (*Figure 10*) dues à la sensibilité trop élevée des groupes de points générés (*clustering*).

Nous nous sommes alors tournés vers une autre solution à l'aide du logiciel

libre *CloudCompare*. Ici encore, les traitements ont été divisés en deux temps :

- Extraction des troncs et branches principales à partir d'une sélection des derniers échos du LiDAR et de filtres statistiques.
- Explosion itérative du nuage des troncs et branches principales, de sorte que chaque nuage ainsi créé soit un arbre.

Comme le montre la *Figure 11*, les résultats sont très encourageants. Un gain en qualité est encore atteignable par itération automatique de l'explosion des groupes en fonction de leur taille et du nombre de points.

Les perspectives se tournent alors vers un couplage des deux solutions testées, puis vers une caractérisation individuelle de chaque arbre, de façon à en extraire les caractéristiques dendrométriques principales (hauteur, taille du houppier, diamètre du tronc, coordonnée du tronc, puis distance aux infrastructures).

Couplée à la cartographie des risques végétation, l'individualisation de la végétation nous permet de détecter les arbres dangereux (*Figure 12*). L'ensemble des informations de chaque arbre peut alors être automatiquement regroupé dans le Système d'Information Géographique (SIG) de maîtrise arbustive de SNCF Réseau, intégrant également plusieurs coupes pour une bonne visualisation. Ces informations permettront à SNCF d'optimiser les processus de maintenance (définition de zones prioritaires, choix des moyens d'élagage, etc.) et de réduire les coûts d'intervention tout en éliminant le risque végétation.

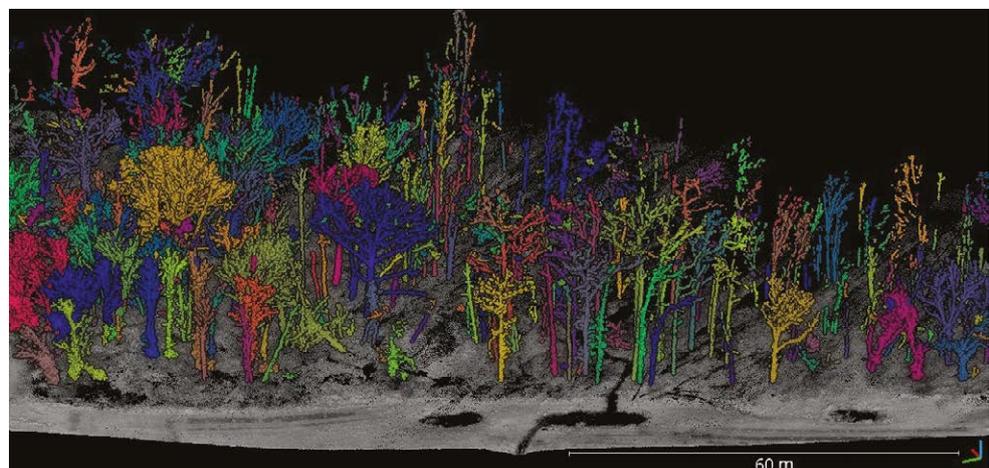


Figure 11. Individualisation de la végétation (*CloudCompare*).

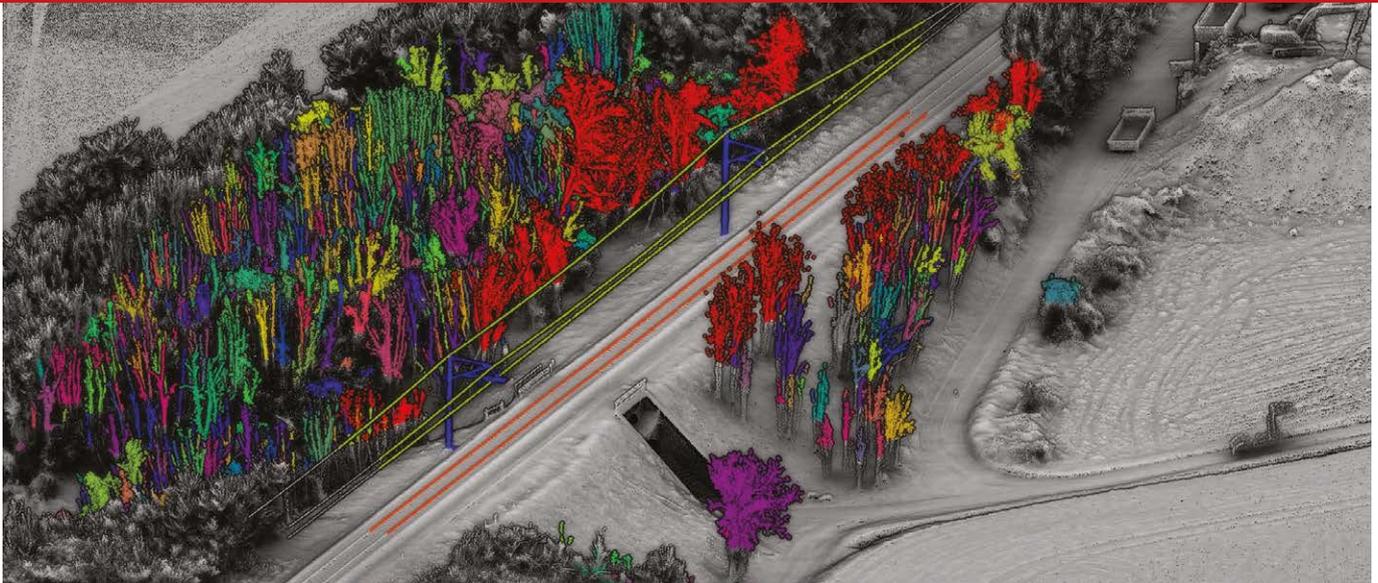


Figure 12. Identification des arbres dangereux (en rouge, sans échelle).

Conclusion

Les travaux menés nous ont tout d'abord permis de quantifier la précision et l'exactitude des données issues du système LiDAR VUX1-UAV. La chaîne de traitement de ces données a été affinée et les protocoles terrain optimisés. La qualité des données du système LiDAR permet de répondre aux exigences de surveillance et de maintenance du RFN, repoussant les limites des méthodes photogrammétriques. Dans le but de cartographier le couvert végétal, une chaîne de classification des données a également été établie et intégrée aux processus de traitement, et est désormais déployable efficacement à grande échelle. Les objectifs de cartographie du risque végétation ont été atteints : les travaux permettent de détecter automatiquement sur de grands linéaires la présence de tout risque végétal selon plusieurs approches d'imminence du risque.

Aujourd'hui, le vecteur employé au sein d'Altametrus est le drone, car il permet des acquisitions habiles et non intrusives sur des zones localisées du RFN. Pour une cartographie sur l'ensemble du réseau, il nous faut nous tourner vers des acquisitions à partir d'autres vecteurs comme le train (déjà existant au sein de SNCF) ou encore l'hélicoptère (à venir chez Altametrus).

À moyen terme, la cartographie des risques végétation sur l'ensemble du RFN permettra une meilleure gestion du couvert végétal du réseau, garantissant gains économiques et meilleure disponibilité du Réseau ferré national. ●

Contact

Luc PERRIN
luc.perrin@altametrus.com

Bibliographie

- [Assali, 2014] ASSALI, P. (2014). *Modélisation géostructurale 3D de parois rocheuses en milieu ferroviaire, application aux ouvrages en terre*. Thèse de doctorat, Ecole doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur.
- [GeoCue, 2017] GeoCue (2017). *TerraScan : Classify Groups*. URL : <http://support.geocue.com/terraSCAN-classify-groups/>, consulté le 29/07/2017.
- [Girard et Girard, 1999] GIRARD, M.-C. et GIRARD, C.-M. (1999). *Traitement des données de télédétection*. DUNOD Ed. Paris, 529 :326-334.
- [Jacquin, 2015] JACQUIN, A. (2015). *Qualification de la précision des données topographiques issues d'acquisitions par méthode scanner laser dynamique ferroporté au sein de la SNCF*. Mémoire de master, INSA de Strasbourg – SNCF Direction de l'Ingénierie.
- [Kashani et al., 2015] KASHANI, A.G., OLSEN, M.J., PARRISH, C.E., WILSON, N. (2015). *A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration*. *Sensors*, 15(11), 28099-28128.
- [Pereira, 2015] PEREIRA, A. (2015). *Valorisation des données acquises par drone sur le réseau ferré national*. Mémoire de master, INSA de Strasbourg – SNCF, Pôle Drones.
- [Viguié et al., 2015] VIGUIER, F., PEREIRA, A., BAH, F., BERTHAUD, C., CAPRINI, P., DURAND, A., STUDER, M., HUGONET, B., GOINEAU, A. et MAATOUG, L. (2015). *Le contrôle de la végétation dans les emprises ferroviaires : une approche multi-scalaire*.

XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie, 144:25-40.

[Xu et al., 2014] XU, S., VOSSelman, G. et ELBERINK, S.O. (2014). *Multiple-entity based classification of airborne laser scanning data in urban areas*. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 88:1-15.

[Zhang et al., 2016] ZHANG, W., QI, J., WAN, P., WANG, H., XIE, D., WANG, X. et YAN, G. (2016). *An easy-to-use airborne lidar data filtering method based on cloth simulation*. *Remote Sensing*, 5(8):3749-3775.

ABSTRACT

Key words: Airborne LiDAR, vegetation risk, UAV, precision, accuracy, classification, point cloud, railway rights-of-way, trees individualisation

Vegetation management along railway rights-of-way is a major stake for SNCF (France's national state-owned railway company). Due to their high flexibility, UAVs appear as an efficient solution for cartography, without disruption of rail services. This master thesis aims to evaluate VUX-1 UAV LiDAR system to analyse vegetation risks. Through experiences we led, we managed to validate system's data quality and we refined acquisition protocols. Besides, we set a classification process up in order to achieve vegetation and infrastructure detection. We developed several models of vegetation danger analysis, and studied the perspective of trees individualisation. Thanks to this work, it is possible to produce and industrialise risk vegetation cartography.

Utilisation de la photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles de modèles physiques

■ Maxime CARTIER XATARD

La photogrammétrie est un domaine en plein essor. L'arrivée des drones sur le marché a permis un grand bond en avant dans le progrès des techniques d'acquisition et ainsi diversifier l'utilisation traditionnelle qui lui était réservée jusqu'à présent. La question se pose aujourd'hui quant à son utilisation en bathymétrie. Ce projet de fin d'étude au sein de la CNR s'articule suivant deux axes : l'acquisition et le traitement des données. Une solution d'acquisition photogrammétrique à travers l'eau et adaptée à l'échelle d'un modèle physique est d'abord développée. Dans un second temps, une chaîne de traitement des photos et un algorithme de correction de la réfraction sur les données sont combinés pour obtenir des résultats utilisables en aval pour des études sédimentaires. Des protocoles pour chaque étape sont alors rédigés pour les futures études.

MOTS-CLÉS

Photogrammétrie, Correction, Réfraction, Modèle physique, Fonds mobiles

L'aménagement de Bellevue, zone d'étude préférentielle

L'étude se focalise sur une portion du lit de la Loire et notamment au niveau du pont de Bellevue. L'opération prévue a pour objectif de réduire la pente de la ligne d'eau, afin de favoriser le dépôt d'une partie du sable transporté par le fleuve. Elle constitue la clé de voûte de la stratégie de restauration du lit et sans doute l'action la plus délicate à réaliser, car il s'agit d'obtenir le meilleur résultat tout en minimisant les impacts sur les usages, le milieu naturel et les lignes d'eau en crue.

Du terrain au laboratoire : le modèle physique

Le modèle physique permet d'étudier les phénomènes hydrauliques encore non accessibles aux modèles numériques et de définir ainsi les meilleurs choix possibles tant du point de vue technique, économique que de la sécurité. Une vulgarisation de la définition du terme de modèle physique serait une maquette dont le but est de reproduire la réalité à une échelle réduite et ainsi voir en laboratoire ce qui se passe sur le terrain. Dans la conception d'un nouvel aménagement ou dans l'optimisation d'un ouvrage existant, le modèle traite les problèmes complexes hydrauliques en prenant en

Introduction

Spécialisé dans la réalisation de modèles physiques réduits servant à l'étude des phénomènes hydrauliques, le Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques (CACOH) de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) traite les problèmes complexes en associant la modélisation physique et les modèles numériques dans une totale complémentarité. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de fin d'étude (PFE) à l'INSA de Strasbourg. La mesure et la modélisation des fonds mobiles sont cruciales dans la compréhension et la prévision du processus de déplacement des sédiments. Des systèmes passifs tels que la photogrammétrie aux systèmes actifs tels que le LiDAR, les progrès technologiques actuels en matière d'acquisition 3D permettent une production importante de données 3D dans des temps très réduits, et notamment avec un grand degré d'automatisation, sans contact, évitant ainsi de corrompre les scènes d'étude.

La CNR souhaite la mise en place d'une solution faisant intervenir la

photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles de modèles physiques à travers l'eau. Ce projet a donc eu pour aboutissement :

- Le développement d'une méthodologie d'acquisition semi-automatisée de photos en vue d'une étude photogrammétrique.
- L'étude de l'influence et des possibles corrections de la réfraction dans le cas de la photogrammétrie multimédia.
- La rédaction d'un protocole d'acquisition et de traitement des données récoltées.

L'étude et les essais réalisés au cours de ce PFE ont été effectués dans le cadre du modèle physique de grande envergure représentant une portion du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes et s'inscrivent dans une étude plus globale du lit de la Loire.

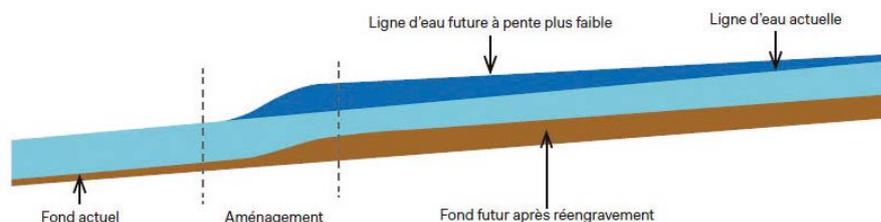


Figure 1. Finalité du projet d'aménagement du lit de la Loire



compte les écoulements tridimensionnels. Les équipes du Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques associent modèles physiques et modèles numériques dans une totale complémentarité.

Le modèle physique de la Loire

Le modèle physique doit permettre d'appréhender à l'échelle des aménagements projetés la dynamique sédimentaire de la Loire en situation actuelle et pour différentes configurations d'aménagement. Ce modèle physique permettra d'optimiser les performances recherchées par les travaux en termes de remous solide, dans le respect des exigences demandées par les partenaires du programme en termes environnemental, d'usages et de maîtrise des inondations.

Les objectifs principaux sont donc de :

- vérifier l'impact sédimentaire de l'aménagement de Bellevue sur un horizon de 15 ans en termes de tendance morphologique ;
- définir la configuration ou les configurations possibles des aménagements permettant de répondre à l'objectif

de création d'un remous solide, tout en respectant les contraintes du site (navigation actuelle sur le fleuve, circulation piscicole, maintien des fonctionnalités des bras secondaires de l'île Clémentine et du bras du Thouaré connectés à l'aménagement...),

- vérifier la loi de perte de charge nécessaire pour créer les conditions de dépôt solide des matériaux en amont pour les débits morphogènes dominants ;
- vérifier que l'aménagement proposé ne génère pas de survitesses trop importantes au droit des piles du pont de Bellevue, ce qui pourrait provoquer potentiellement des affouillements ;
- les échelles retenues pour le modèle sont les suivantes :

Échelle verticale	1/50
Échelle horizontale	1/100
Distorsion verticale	2
Échelle sur la pente	1/0.5

Le rôle de la photogrammétrie dans l'étude

Lors de ce projet, il est question d'étudier la bathymétrie d'une portion du lit de la Loire. Pour ce faire, et comme expliqué précédemment, un modèle

physique modélisant les transports sédimentaires a donc été conçu pour en étudier l'évolution.

Pour procéder au relevé en 3D de la morphologie des fonds d'un modèle après essai, il est coutume de drainer le modèle sur une longue durée afin d'éviter les déformations et ainsi observer les fonds hors eau pour procéder à un relevé lasergrammétrique. Cependant, cette méthode est chronophage et un drainage, bien que réalisé méticuleusement engendre inévitablement une dégradation de l'état originel des fonds après essai.

Une autre approche évitant le drainage du modèle est la réalisation de profils bathymétriques à l'aide d'un capteur à ultrasons. Cependant, cette technique ne permet de recueillir que des données non globales et souvent entachées d'erreurs difficiles à quantifier. En effet, le principe de l'appareil utilisé (Ultralab) réside dans la mesure du point le plus haut détecté dans le cône de mesure, ce qui résulte certes à une précision altimétrique de l'ordre du millimètre mais difficile à estimer au niveau planimétrique.

C'est dans cette optique que le projet de photogrammétrie a été développé afin de pouvoir trouver une alternative au drainage et effectuer une acquisition de données en eau de manière rapide et non destructive vis-à-vis des fonds mobiles du modèle. Le développement d'une méthodologie d'acquisition permettrait ainsi de :

- passer d'une étude en profils des fonds à une étude surfacique ;
- amener une meilleure vision et compréhension de la dynamique sédimentaire dans le modèle physique.

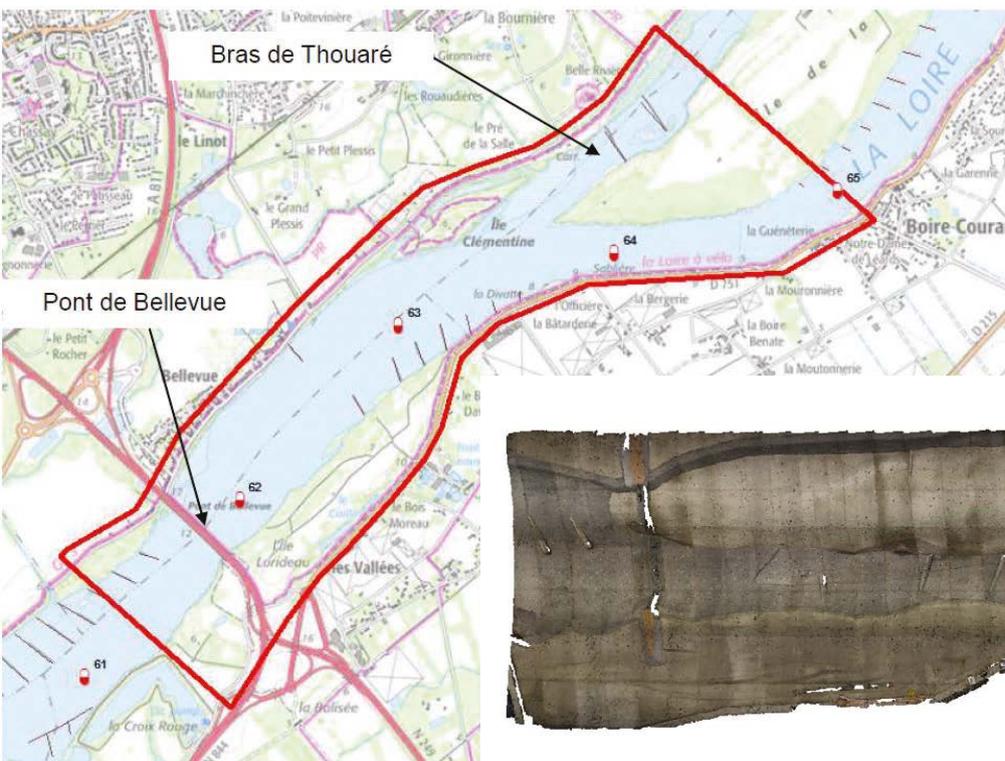


Figure 2. Localisation du projet de Bellevue et rendu 3D du modèle physique de la Loire sous Photoscan, sans échelle

► Hypothèses et contraintes de l'étude

Il est important de souligner que cette étude est originale et novatrice de par son utilisation de la photogrammétrie. L'utilisation du modèle physique pour observer des phénomènes à une plus grande échelle se base sur la photogrammétrie et ce à travers l'eau. La mise en place opérationnelle a été jalonnée de contraintes qu'il a fallu respecter et d'hypothèses à vérifier. Dans cette étude, nous avons pu diviser les contraintes suivant plusieurs critères.

Du point de vue du matériel, il est imposé l'utilisation de boîtiers EOS 1000D déjà en possession du laboratoire. Il s'agit là d'un premier frein sachant que les appareils photos datant de 2008, sont équipés de capteurs APS-C de 10,1 Mégapixels pour une résolution 2592 x 3888. Une seconde contrainte a été le respect des normes relatives au chariot instrumenté sur lequel sont placés les appareils. La pose des bras déportés par rapport aux traverses a nécessité le calcul des forces exercées et impliqué de limiter au maximum le poids de charge du chariot. Il est à noter de plus que l'utilisation de la photogrammétrie sur un modèle physique en eau exclut toute possibilité de positionner des luminaires au-dessus du plan d'eau sans quoi des masques peuvent se créer sur les photos. Il a donc été choisi une nouvelle fois d'équiper le chariot à l'aide de lampes tungstène de 600 W sur ses extrémités. Cette solution permet ainsi une diffusion homogène de la lumière tout au long de l'acquisition tout en évitant la création d'ombres sur le modèle, phénomène handicapant lors des traitements avec le logiciel Photoscan. Enfin, il a fallu élaborer une stratégie pour le positionnement des points de calage servant au géoréférencement et à la reconstruction du modèle. Ces points de calage avaient pour contraintes d'être matérialisés de façon durable et d'être résistants à l'eau mais ne devaient pas perturber l'écoulement du modèle par leur positionnement. La solution retenue est exposée dans le paragraphe "Solution opérationnelle retenue".



Figure 3. Chariot instrumenté du modèle physique

Le second aspect contraignant s'est porté sur la sécurité relative à l'installation de la solution. Le câblage des appareils photos et des luminaires doit respecter un cahier des charges et exclut notamment toute présence de prise de 220 volts sur le portique. Des *battery grips* (poignées d'alimentation) ont ainsi été ajoutés à chaque appareil pour permettre une plus longue autonomie et un accès rapide aux batteries sans démonter l'installation.

Enfin, étant donné que plusieurs acteurs interagissent sur le modèle physique, la coordination et la mise en correspondance des plannings pour permettre l'avancement des différentes opérations s'est révélée être un véritable défi. L'étalonnage des différents capteurs du chariot et les essais de calage du modèle nécessitent plusieurs phases de remplissage et drainage du bassin ainsi qu'un grand nombre de manipulations du chariot, le rendant inaccessible.

Les principales contraintes sont résumées dans le tableau suivant :

Une fois que les contraintes ont été respectées, il a été nécessaire d'émettre des hypothèses. Ces dernières permettent par la suite de s'affranchir de certains phénomènes et de simplifier l'étude sur certains aspects. Parmi ces dernières on peut citer les plus notables selon lesquelles :

- l'éclairage est uniforme sur les modèles photographiés,
- le plan d'eau du modèle est planaire et horizontal,
- l'interface air-eau est sans épaisseur et négligeable,
- les instruments sont utilisés dans les limites d'utilisation optimales,
- les calibrations utilisées sont supposées inchangées lors de l'étude,
- la turbidité de l'eau n'influe pas sur l'acquisition de mesures,
- les photos sont capturées aux alentours de la verticale (moins de 10° par rapport au nadir).

Le dernier point à souligner et sûrement la plus grande contrainte de ce projet est la réfraction qui s'opère au niveau de l'interface air-eau du modèle.

Type	Matériel	Logiciel	Opérationnel et technique	Organisationnel
Contraintes	Utilisation de boîtiers EOS 1000D	Utilisation d'Agisoft Photoscan	Respect des normes de sécurité Présence d'eau Réflexion des lumières sur l'eau Matérialisation des points de calage	Intervention des différents acteurs du projet sur le modèle

Tableau 1. Liste des contraintes imposées pour le projet



Le paragraphe suivant s'attache à décrire ce phénomène.

La réfraction en photogrammétrie et l'algorithme de J. T. Dietrich

La photogrammétrie nécessitant le tracé des rayons optiques à travers plusieurs milieux d'indices de réfraction différents est appelée "multimedia photogrammetry" dans la littérature scientifique anglaise. Elle est caractérisée par la réfraction des faisceaux optiques à la transition entre les différents milieux. On peut associer à ce phénomène la notion de point apparent. En effet, celle-ci constitue l'essence même du phénomène de réfraction et provient de l'erreur systématique causée par la réfraction à l'interface air-eau et qui a pour effet de modifier la perception de la profondeur et donc en retourner une valeur faussée ou corrompue.

Lors du projet de recherche technologique du même titre, l'algorithme de James T. Dietrich, exposé dans son article "Bathymetric Structure from Motion : Extracting shallow stream bathymetry from multi-view photogrammetry" avait été retenu comme solution de correction de la réfraction pour notre cas d'étude. Des résultats prometteurs avaient déjà été trouvés et ceux obtenus dans ce PFE nous ont permis de confirmer l'efficacité de ce procédé.

L'objectif est ici de corriger l'influence de la réfraction sur la profondeur des points et l'entière de la démarche de calcul découle de la loi de Snell illustrée figure 4 selon laquelle :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Il a été posé comme hypothèse d'étude que les photographies avaient été prises à la quasi-verticale et donc avec des angles inférieurs à 10° par rapport au nadir. On parle alors ici en anglais de "Nadir SfM Imagery". Cette hypothèse permet d'utiliser une version simplifiée de la loi de Snell qui utilise la substitution des sinus des petits angles par leur tangente. On peut alors poser les équivalences suivantes :

$$\sin i \cong \tan i = \frac{x}{h} \quad \sin r \cong \tan r = \frac{x}{h_a}$$

En posant $n_1 = 1$ l'indice de réfraction de l'air et $n_2 = 1.337$ l'indice de réfraction de l'eau, l'équation (1) devient :

$$h = 1.337 \times h_a$$

La distance Euclidienne D et la différence de hauteur dH sont calculées suivant les expressions :

$$D = \sqrt{(X_c - X_a)^2 + (Y_c - Y_a)^2}$$

$$dH = (Z_c - Z_a)$$

En prenant cette expression pour D, il est possible de calculer la valeur de r :

$$r = \tan^{-1} \frac{D}{dH}$$

Pour la suite des calculs, il est nécessaire de calculer h_a et en se basant sur

la figure :

$$h_a = WS_z - Z_a$$

Le calcul de la réfraction est maintenant possible en calculant le reste des variables inconnues de la figure 4 :

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin r \right)$$

$$x = h_a \times \tan r$$

$$h = \frac{x}{\tan i} = \frac{h_a \times \tan r}{\tan \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin r \right) \right]}$$

$$Z_p = WS_z - \bar{h}$$

L'altitude réelle corrigée du point est désignée par Z_p .

Il est important de noter qu'étant donné qu'il s'agit ici d'un nuage de points, Z_a et h_a ne sont par conséquent pas des valeurs fixes pour chaque point. Ainsi, une différence sera observable entre les valeurs de x et h pour un même point depuis chaque caméra depuis lequel il est visible. Z_p et h auront donc plusieurs valeurs pour un même point et la valeur définitive Z_p de l'altitude du point sera obtenue à partir de la moyenne de toutes les valeurs de h .

Dans son article, James T. Dietrich pose ces calculs sous la forme d'un algorithme Python directement applicable sur un fichier de points.

Les bases de calculs de l'algorithme posées, il reste alors à effectuer quelques étapes de traitement en amont de son application au nuage.

Étapes de traitements préalables

■ Modélisation de la surface de l'eau

Il faut sélectionner des points sur la berge au niveau de la surface de l'eau. Pour ce faire, il est utile de se référer au changement de couleur des points du nuage. Une fois plusieurs points sélectionnés sur le pourtour du bassin, il faut les exporter sous la forme d'un nouveau nuage auquel est ajouté l'attribut Z.

Dans l'article de James T. Dietrich, ce dernier avait effectué un relevé de plusieurs points de la surface de l'eau sur les berges et a ensuite importé les points levés dans CloudCompare

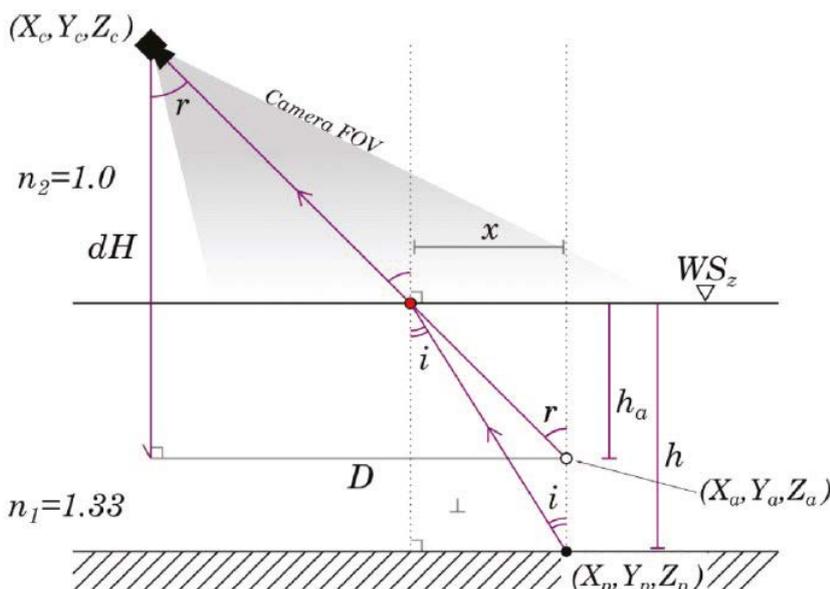


Figure 4. Figure de réfraction, J. T. Dietrich 2016

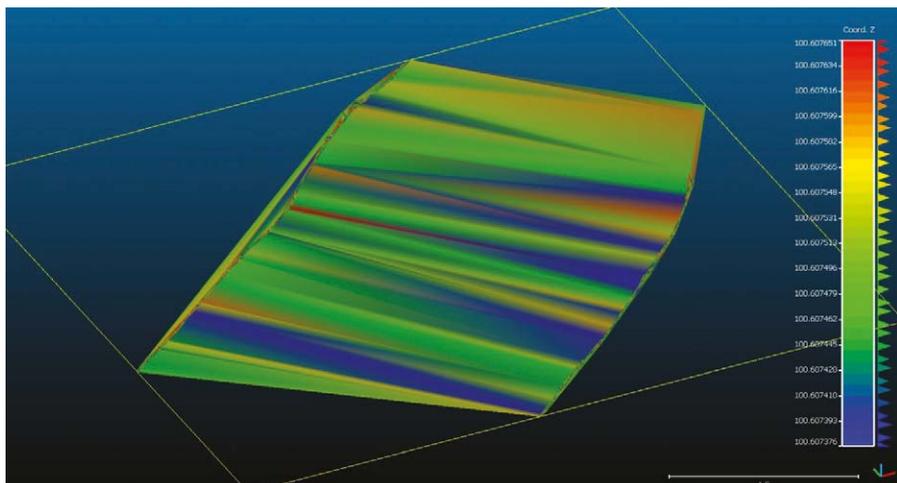


Figure 5. Maillage de la surface de l'eau à l'aide du logiciel *CloudCompare*

► pour fusionner ces derniers avec les points précédemment sélectionnés dans un seul et même nuage. Dans le cas présent, il n'a pas été possible de relever ces points : une coupe dans le nuage a été effectuée au niveau des berges en se référant à la coloration des points.

L'étape suivante dans la modélisation de l'eau est la création d'un maillage de Delaunay en 2,5D. Il est important de vérifier si le maillage ne présente pas d'anomalies notamment au niveau des berges, car dans le cas où un mauvais point a été sélectionné, des changements abrupts d'altitudes peuvent apparaître. L'échelle de couleur du maillage permet de repérer rapidement ces erreurs possibles. Un aperçu du maillage est visible dans la *figure 5*. Il est à noter que les valeurs d'altitude maximale et minimale sur l'échelle de droite sont séparées de moins d'un millimètre et la présence du grand nombre de couleurs ne traduit pas ici des erreurs dans le maillage.

■ Rééchantillonnage du nuage de points

Il est nécessaire de minimiser le bruit dans le nuage et c'est pourquoi un rééchantillonnage est envisagé. Il faut tout d'abord commencer par supprimer les champs scalaires qui sont inutiles pour la suite de l'étude. En second lieu, l'outil "*Rasterize tool*" est utilisé pour effectuer un rééchantillonnage en spécifiant la direction en Z et l'écart entre les points. Le nuage rééchantillonné est ensuite exporté sous la forme d'un nouveau nuage. Ce rééchantillonnage

est un point négatif pour l'étude étant donné que cela traduit une perte d'informations dans le nuage, mais le but premier est ici d'effectuer une correction de la réfraction. L'étude de l'influence de ce rééchantillonnage interviendra peut-être dans des études futures.

■ Calcul des attributs nécessaires à l'application de l'algorithme

La suite des opérations s'effectue sur le nuage rééchantillonné. La première étape revient à calculer la distance du nuage au maillage de la surface de l'eau. Le champ scalaire "*C2M Signed Distance*" créé représente la "profondeur" des points en dessous de la surface maillée. On sélectionne ensuite seulement les points immergés en filtrant les points par leur valeur de profondeur et en ne gardant que ceux avec une valeur inférieure à zéro.

Il ne reste plus qu'à convertir la profondeur de chaque point pour obtenir l'élévation de la surface de l'eau pour chaque point. Cette étape est possible

grâce à l'outil "*Calculator*" qui permet de soustraire la valeur négative de profondeur (et donc de l'ajouter) aux altitudes des points immergés et ainsi obtenir l'altitude de la surface de l'eau. Les champs scalaires sont par la suite correctement renommés de manière à ce qu'ils soient reconnus lors de l'exécution de l'algorithme.

Une fois l'étape de prétraitement du nuage réalisée, il est nécessaire de recueillir les différents fichiers en entrée de l'algorithme :

- fichier de points au format .las ou .csv de préférence,
- fichier de capteur comportant focale et dimensions du capteur,
- fichier comportant les orientations et positions des caméras. Ce dernier doit comporter :
 - les coordonnées XY Z des caméras dans le même système de référence que le fichier de points,
 - les angles d'orientation des caméras (tangage, roulis, lacet).

Le logigramme en *figure 6* présente la logique selon laquelle s'articule le logiciel ainsi que les fichiers en entrée et sortie de l'algorithme.

Solution opérationnelle retenue

Ce paragraphe s'attache à la description en détail de l'ensemble du matériel et des moyens mis en place pour aboutir à la solution finale retenue.

Le premier point concerne l'appareillage du chariot : nous avons comme exposé précédemment, positionné 5 appareils photo EOS 1000D équipés d'objectifs SAMYANG 10 mm.

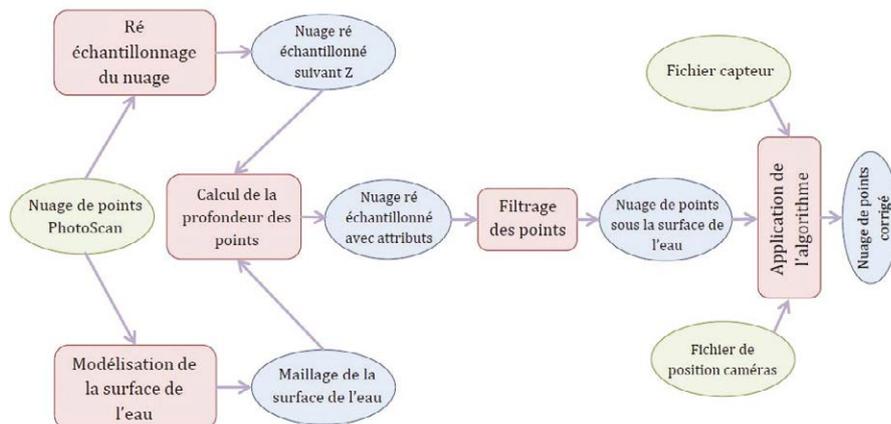


Figure 6. Logigramme des étapes de traitement de l'algorithme de correction utilisé



Les boîtiers utilisés présentent les caractéristiques et réglages suivants :

Nombre de pixels	Dimensions du capteur (pixels/mm)	Focale	ISO	Ouverture de diaphragme	Temps d'exposition	Mise au point
10.1 Mpx	2592 x 3888 14.8 x 22.2	10 mm	200/400	2.8	1/10 à 1/100	À l'infini

Afin de les fixer sur le chariot traversant, des bras supports ont été modélisés numériquement puis montés et installés en vue d'accueillir les appareils. Un rendu 3D est présenté dans la *figure 7*.

L'alimentation des appareils étant restreinte de par les règles de sécurité et l'interdiction de poser une prise de 200V sur le chariot au-dessus de l'eau, des socles permettant d'intégrer une seconde batterie aux appareils ont été installés.

L'éclairage lors des essais en eau est réalisé grâce à deux boules "chinoises" de 600 W chacune, fixées en bord de chariot et branchées à des alimenta-

tions externes. L'utilisation de lampes tungstènes a été préconisée face aux lampes LED dont la fréquence de scintillement était incompatible avec l'acquisition des clichés.

Enfin, afin de pouvoir recalibrer et géoréférencer les nuages de points générés, il a été nécessaire d'installer des cibles connues en coordonnées. Nous avons alors utilisé les patrons des cibles codées en 12 bits fournies par le logiciel PhotoScan qui permettent une détection automatique dans le logiciel. Les cibles ont été imprimées avec un diamètre de 4 cm sur des planches de PVC de 3 mm d'épaisseur avant d'être découpées au laser.

Le diamètre choisi n'est pas arbitraire : des recherches sur le forum du logiciel Agisoft PhotoScan ont permis d'aboutir à la conclusion selon laquelle une détection concluante des cibles devait répondre à plusieurs critères. Ainsi, le diamètre du rond central de la cible doit avoir pour diamètre au minimum entre 9 et 10 fois la taille d'un pixel au sol. Ayant des pixels au sol de 1,1 mm, le centre de notre cible fera entre 9,9 et 11 mm. Le diamètre global de la cible faisant 3,5 fois celui du rond central, on a donc au final des cibles de 4 cm de diamètre afin d'avoir un peu de marge pour la détection.

Le placement des cibles est visible dans la *figure 8* ci-dessous.

Nous avons également envisagé la matérialisation de points virtuels. En effet, nous étions restreints dans l'installation des cibles, car elles pouvaient perturber l'écoulement et nous ne pouvions donc les positionner que sur les berges. Nous avons alors suggéré l'installation de lasers de positionnement dont la projection forme une croix. Identifiable sur les photos et ne perturbant pas les fonds mobiles, cette solution s'avérait prometteuse. Le chariot s'arrêtant à des positions données et les lasers étant fixés sur ce dernier, il nous était alors possible de connaître précisément les coordonnées planimétriques de ces points virtuels.

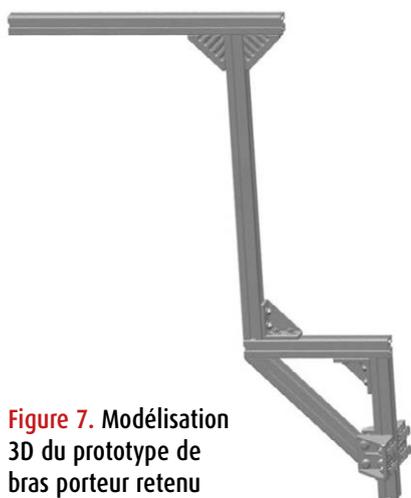


Figure 7. Modélisation 3D du prototype de bras porteur retenu



Figure 8. Vue de haut du modèle et de la disposition spatiale des cibles PVC



Figure 9. Exemple de motif de cible PVC utilisée

Cependant, pour connaître leur altitude, il fallait utiliser l'Ultralab, un capteur à ultrasons retournant le point le plus haut dans son cône de mesure. Hors, ce cône présente un diamètre incompatible avec la résolution des images. Cette solution a donc été abandonnée et seules les cibles en PVC ont été installées. Un exemple de motif utilisé pour les cibles est présenté dans la *figure 9* ci-contre.

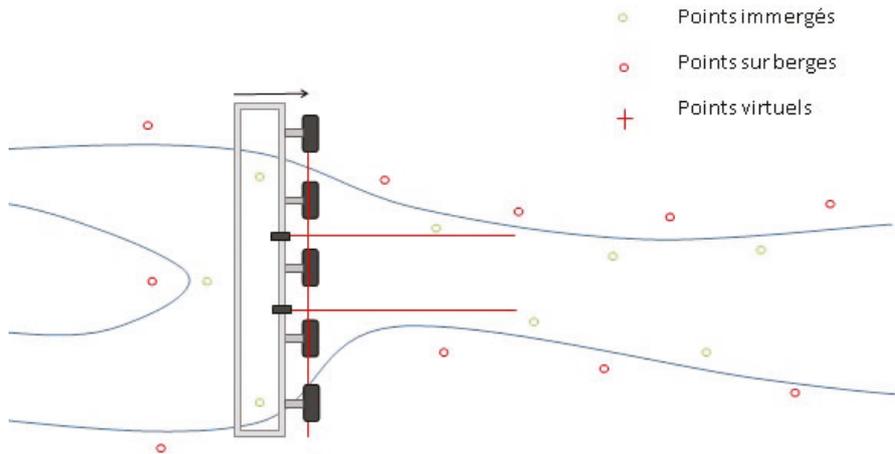


Figure 10. Schéma conceptuel de la solution de matérialisation de points virtuels avec des lasers

- le premier jeu est celui de la chape du modèle physique lorsque celui est vide et constitue donc le jeu de référence,
- le second jeu a été réalisé une fois le modèle rempli avec une hauteur d'eau dont l'altitude de la surface est connue dans le référentiel du modèle physique.

Influence de la réfraction

Pour estimer de manière quantitative les effets de la réfraction sur la génération du nuage de points du modèle physique en eau, nous nous appuyons sur les écarts retrouvés au niveau des points servant au calage du nuage. Comme décrit précédemment, ces derniers sont matérialisés par des cibles codées en 12 bits par le logiciel PhotoScan. Le modèle a été géoréférencé sur un ensemble d'une quarantaine de cibles situées sur les berges en béton du modèle non recouvertes d'eau. Les points de vérification sont, quant à eux, situés dans les zones immergées, afin de voir l'influence de la réfraction dans la détection des points homologues et la mise en corrélation de ces derniers.

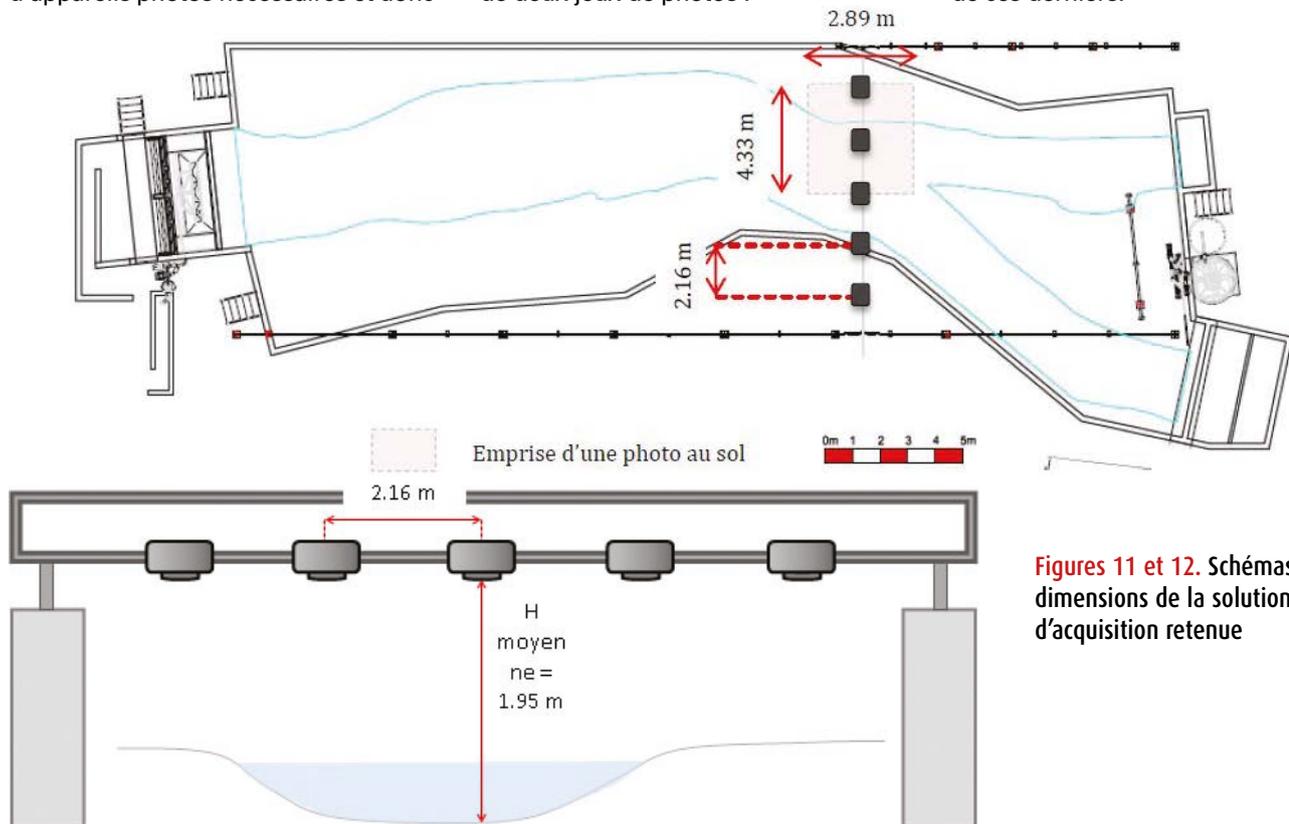
Un schéma de l'installation alors envisagée est illustrée ci-dessus en figure 10.

La liste du matériel établie, l'étape suivante a été de calculer le plan de vol de l'acquisition pour la suite des essais.

Plan de vol

Le même plan de vol a été utilisé pour l'ensemble des acquisitions de photogrammétrie. Celui-ci a notamment servi pour connaître le nombre d'appareils photos nécessaires et donc

leur configuration d'installation et l'ensemble du matériel inhérent. Les appareils ont été fixés à la perpendiculaire du sol à une hauteur moyenne de 1.95 mètre de manière à minimiser l'angle d'intersection des rayons au niveau de l'interface air eau. Les effets de la réfraction sont alors minimisés au maximum. Les figures ci-dessous permettent de visualiser la solution une fois installée ainsi que la configuration de plan de vol adoptée. Une fois la solution et le montage validés, nous avons procédé à l'acquisition de deux jeux de photos :



Figures 11 et 12. Schémas et dimensions de la solution d'acquisition retenue

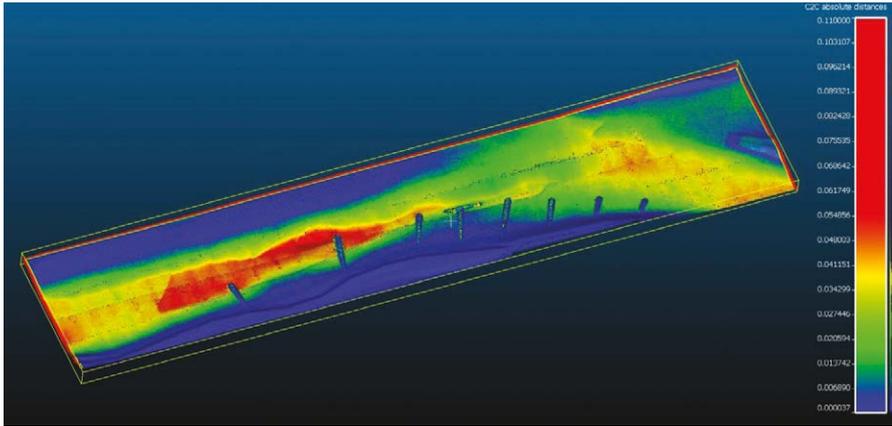


Figure 13. Comparaison sous CloudCompare des nuages avant correction

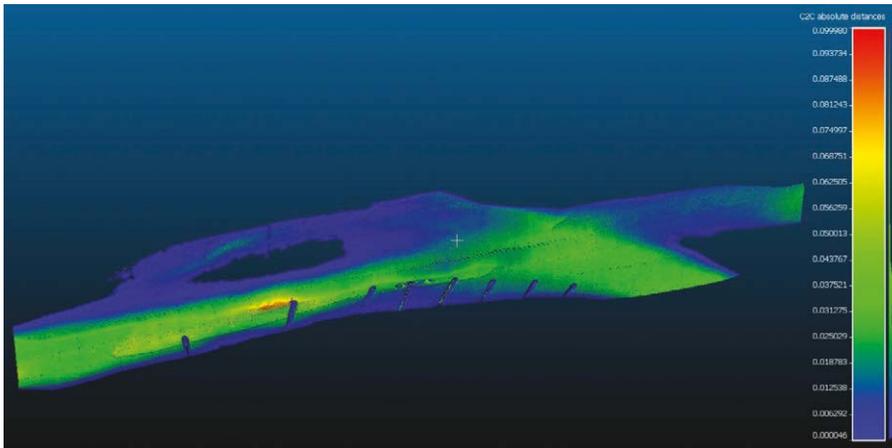


Figure 14. Comparaison sous CloudCompare des écarts du nuage des points immergés

En se basant sur les écarts des points de calage, nous obtenons ainsi une précision moyenne d'orientation externe de 0.2 cm. La précision sur les points de contrôle se dégrade pour sa part considérablement pour atteindre 0.7 cm. Il faut souligner que la valeur des écarts sur les points reste ainsi une moyenne discrète et n'est pas tout à fait représentative de la réalité. Il faut rappeler que les cibles en eau ont été placées de manière à ne pas perturber l'écoulement et ne pas être recouvertes de sédiments par la suite.

On les retrouve ainsi dans les zones avec de faibles hauteurs d'eau et donc où le phénomène de réfraction est le moins présent. Certaines zones du modèle présentent des fosses avec des hauteurs d'eau de plus de 35 cm. L'influence de la réfraction dans ces zones est alors observable de manière plus globale dans une comparaison du nuage affecté de la réfraction par rapport au nuage de référence supposé exact.

Les écarts s'articulent de manière progressive des bords affleurant

de l'eau jusqu'aux zones les plus profondes du modèle où la réfraction est plus importante et où ces derniers atteignent jusqu'à 10 centimètres. L'analyse des écarts se concentre ici sur les points immergés pour lesquels le phénomène de réfraction interagit.

La figure 14 permet ainsi une analyse visuelle des écarts, lesquels s'organisent de manière logique suivant la profondeur en eau du modèle.

L'histogramme des écarts nous permet

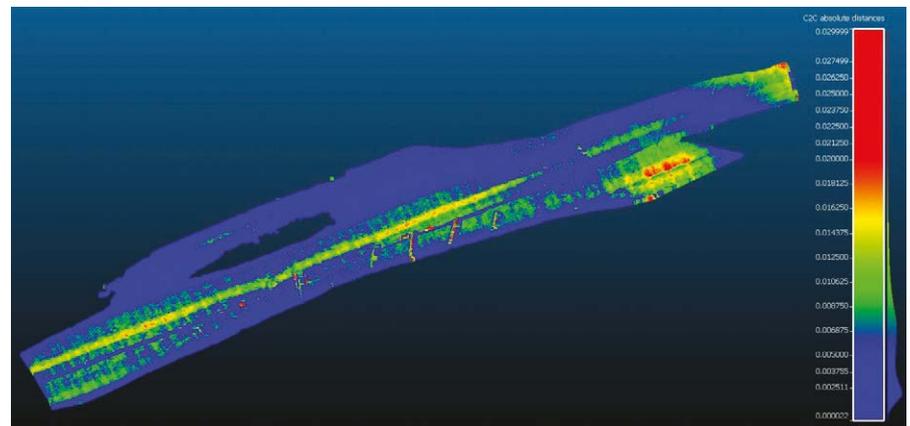


Figure 16. Comparaison sous CloudCompare des écarts du nuage des points immergés corrigés

Gauss: mean = 0.020436 / std.dev. = 0.015125 [2650 classes]

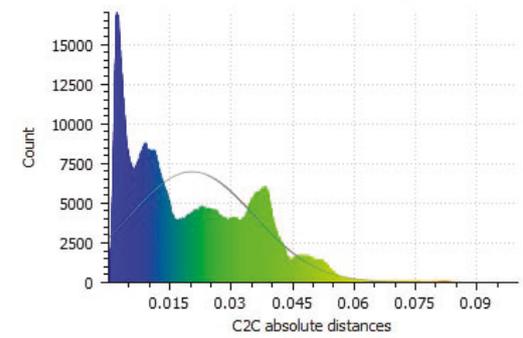


Figure 15. Histogramme des écarts du nuage des points immergés

cette fois-ci de nous faire une idée des erreurs qu'entraîne la réfraction dans la reconstitution de l'altitude des fonds sous une certaine hauteur d'eau. Il est à noter que l'ensemble des écarts relevés sur les points immergés et émergés sont des écarts positifs, traduisant donc que le nuage reconstruit présente des altitudes qui sont plus élevées que celles du modèle de référence.

Cette observation respecte bien les notions physiques de la réfraction selon lesquelles un point en eau est aperçu à une profondeur moindre qu'elle ne l'est réellement.

L'histogramme des écarts de la figure 15 fournit la moyenne et l'écart-type des écarts. Avec pour valeurs 2 cm et 1,5 cm, nous retrouvons bien la hausse attendue avec ainsi très peu d'écarts dans les extrêmes de l'histogramme, soit au maximum 10 cm dans la "fosse" du modèle.

Les effets de la réfraction ont donc clairement été quantifiés dans le cas de notre modèle et nous allons les corriger à l'aide de l'algorithme de J. T. Dietrich exposé plus tôt.



▶ Résultats après correction

Comme vu dans la partie précédente, le phénomène de réfraction entraîne de grandes erreurs lors de la génération d'un modèle en eau, notamment sur la position altimétrique des points. L'algorithme Python de l'article de J.T. Dietrich (2016), dont le principe de correction a été expliqué plus tôt, propose justement de corriger les altitudes des points en eau du nuage dense généré. Déjà testé lors de mon projet de recherche technologique, il a de nouveau été mis en application lors de ce projet afin de vérifier son efficacité et statuer sur sa future utilisation ou non pour la suite du projet à la CNR.

Dans le paragraphe précédent, il était conclu que le nuage en eau généré présentait une erreur moyenne de 2 cm pour les zones immergées. Ces écarts restent trop importants pour les études que veut réaliser la CNR, c'est pourquoi cet algorithme de correction représente un réel atout dans cette étude.

Une fois le nuage de points traité suivant les exigences du protocole et l'algorithme appliqué à ce dernier, nous pouvons effectuer une comparaison avant et après correction par rapport au nuage de référence. Tout d'abord, l'analyse visuelle de la *figure 16* traduit une nette amélioration. En effet, pour une saturation à 2 cm, nous ne retrouvons pratiquement plus de tels écarts.

Si l'on analyse l'histogramme de la *figure 17* ci-dessous, on obtient ainsi un écart moyen inférieur à 0.6 cm sur l'ensemble des points immergés contre 2 cm avant correction.

Cela représente donc une diminution des écarts de plus de 70 %. De même, l'écart-type passe de 1,5 cm avant correction à moins de 0.4 cm une fois cette dernière appliquée. Cela signifie

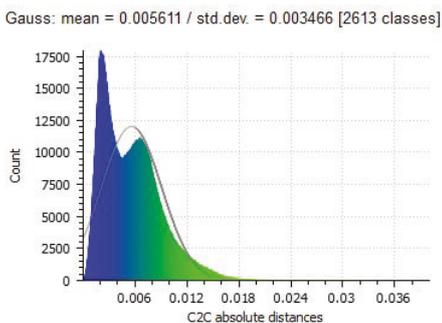


Figure 17. Histogramme des écarts du nuage des points immergés corrigés

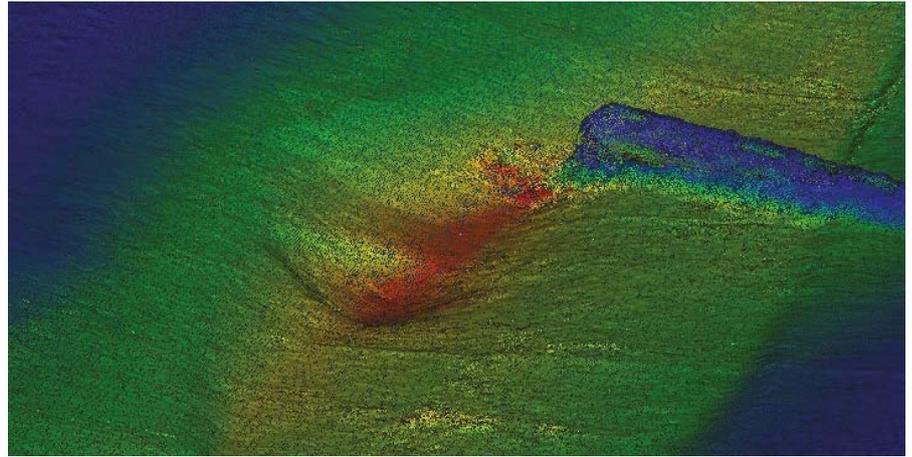


Figure 18. Une "fosse" du modèle physique, zone de forte profondeur sujette aux plus grands écarts

que l'ensemble des points immergés a bien subi cette correction et sont dans l'ensemble peu écartés de la précision moyenne. Enfin, si l'on analyse bien la comparaison nuage à nuage réalisée, on peut s'apercevoir que les plus forts écarts se retrouvent le long d'une ligne au centre du modèle.

Cette concentration des écarts s'explique par une zone où la profondeur du modèle est bien plus élevée et où l'algorithme semble avoir eu plus de mal à corriger le phénomène. La vue capturée *figure 18* illustre la "fosse", zone de profondeur extrême du modèle physique. De plus, il semblerait que cette zone se trouve dans une zone de recouvrement latérale en bord de photo et donc à la configuration pour laquelle les angles d'intersection des rayons avec l'interface sont les plus élevés. L'addition de ces deux conditions explique donc la difficulté de correction dans cette zone mais également un bruit observable qui est plus important.

Conclusion

L'utilisation de la photogrammétrie en bathymétrie reste à ce jour méconnue et très limitée. Cette étude nous a permis à travers la réalisation d'un montage et d'une chaîne de traitement de montrer l'efficacité de cette dernière. Il a été abordé ici une approche de correction de la réfraction en post-traitement mais si l'on se réfère à la littérature scientifique, d'autres solutions seraient possibles comme un traitement lors du calcul des nuages. La solution mise en œuvre sur ce modèle est désormais opérationnelle

et permet à l'équipe projet d'améliorer considérablement sa connaissance du fonctionnement hydraulique. La génération d'une orthophoto permet d'avoir une vision qualitative des mouvements et celle des modèles numériques une évolution quantitative entre deux acquisitions. La CNR a travaillé depuis à l'amélioration du système (flashes, automatisation, etc.). ●

L'auteur tient à remercier Paul-Henri FAURE et Damien ALLIAU pour la proposition et l'encadrement de ce projet de fin d'études à la CNR CACOH.

Contact

Maxime CARTIER XATARD
max.cartier13@gmail.com

ABSTRACT

Photogrammetry is a growing field. The arrival of the drones on the market has allowed a great leap forward in the progress of acquisition techniques and also to diversify the traditional use reserved for it until now. The question arises today as to its use in bathymetry. This master thesis in collaboration with CNR is based on two axes: acquisition and processing of data. A photogrammetric acquisition solution through water and adapted to the scale of a physical model is first developed. In a second step, a photo processing chain and a refraction's correction algorithm on the data are combined to obtain results that can be used for sediment studies. Protocols for each stage are then drafted for future studies.

Arpent : un prototype de haute exactitude pour les mesures de grande distance

■ MAYLIS TEYSSENDIER DE LA SERVE - JEAN-PIERRE WALLERAND - JOFFRAY GUILLORY - DANIEL TRUONG - CHRISTOPHE ALEXANDRE
 JOSÉ CALI - STÉPHANE DURAND

L'équipe de métrologie dimensionnelle du Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam (LCM) travaille sur le développement de distance-mètres absolus, basés sur la mesure du déphasage accumulé par une onde radiofréquence durant sa propagation dans l'air à l'aide d'une porteuse optique. Cet article présente un télémètre à 1550 nm développé au LCM et détaille sa caractérisation au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) et à l'École supérieure des géomètres et topographes (ESGT).

MOTS-CLÉS

Distance-mètre absolu, télémétrie, longue distance, modulation Radiofréquence.

Introduction

Les télémètres mesurant de grandes distances absolues sont intéressants pour les travaux topographiques à grande échelle (construction de tunnels, surveillance de failles géologiques, de digues ou de barrages...). Actuellement, pour ces applications extérieures, les meilleurs instruments commerciaux ont une exactitude de 1,6 mm à 1 km [Leica Geosystems (2013)]. Dans le passé, le Mekometer ME5000, de l'ancienne entreprise Kern, offrait, quant à lui, une exactitude de 0,2 mm + 0,2 ppm (partie par million) [Rüeger (1996)]. Même s'il n'est plus commercialisé depuis les années 90, cet instrument est toujours utilisé par plusieurs instituts géodésiques car ses performances restent encore inégalées. Cependant ces exactitudes ne prennent pas en compte les paramètres atmosphériques. L'opérateur doit donc estimer l'indice de réfraction de l'air, typiquement en utilisant les formules d'Edlén [Edlén (1996)], pour corriger les mesures de distance. Or, une erreur de 0,1°C sur la température induit une erreur de 100 µm sur la mesure d'une distance de 1 km. Pour atteindre cette incertitude relative de 10⁻⁷, une approche à deux longueurs d'onde, comme déjà expérimentée dans les années 70, peut

être la solution. Par exemple, lors de la construction du grand collisionneur de hadrons (LHC) de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), un distance-mètre absolu à deux longueurs d'onde, le Terrameter [Earnshaw (1972) ; Gervaise (1983) ; Beutler (1985)], a été utilisé. De même, un distance-mètre électronique à deux longueurs d'onde a été utilisé jusqu'en 2005 par l'organisation de surveillance géologique des États-Unis (USGS) pour étudier des déformations comme celles de la faille de San Andreas [USGS]. Ces instruments étaient capables de compenser en partie les fluctuations de l'indice de réfraction de l'air sans mesure de la température et de la pression atmosphérique, grâce à la connaissance de la dépendance de la dispersion de l'indice de l'air avec les paramètres atmosphériques [Earnshaw (1972) ; Meiners-Hagen (2008)]. Aujourd'hui, ils ne sont plus utilisés en raison d'un maniement difficile et d'une maintenance complexe. Cependant, la recherche en géodésie comme les travaux topométriques classiques pourraient tirer avantage de ce genre d'instruments optoélectroniques. Un tel système aurait donc un grand intérêt à être de nouveau développé sur la base de technologies nouvelles. Par exemple en utilisant des composants à



Figure 1. Le télémètre prototype Arpent

fibres optiques pour obtenir un système compact et robuste qui ne nécessiterait pas d'alignement optique, de l'électronique numérique pour un traitement du signal rapide et une interface facile d'utilisation.

En pratique, dans un système à deux longueurs d'ondes, la distance est mesurée par chacune des porteuses optiques : on appelle L_1 et L_2 ces deux distances obtenues, pour lesquelles on fixe l'indice de l'air à 1. On montre aisément que la distance corrigée s'écrit $L = L_1 - A \times (L_2 - L_1)$,

$$\text{avec } A = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1},$$

n_1 et n_2 étant les indices de réfraction de l'air respectivement aux deux longueurs d'onde. En écrivant n_1 et n_2 sous une forme factorisée [Bönsch (1998)], on montre que A est indépendant de la



température et de la pression atmosphérique. La distance corrigée peut donc se déduire des valeurs de L_1 et L_2 sans connaissance de la température et de la pression.

Le prix à payer est la multiplication par le facteur A de l'incertitude sur la mesure de la différence des distances. Ce facteur A vaut 21 pour le couple de longueur d'onde 532 nm/1064 nm, c'est-à-dire que pour obtenir une incertitude submillimétrique sur la valeur de la distance corrigée, l'incertitude-type sur chacune des distances devra être meilleure que 50 μm . La première étape vers la réalisation d'un système à compensation d'indice est donc la mise au point d'un prototype de télémètre à une longueur d'onde, compact et simple d'utilisation, afin d'atteindre l'incertitude la plus faible possible, meilleure que 50 μm . L'objet de l'article est de présenter le principe de fonctionnement de ce télémètre baptisé Arpent ainsi que ses principales caractéristiques.

Présentation du télémètre Arpent

La distance mesurée par Arpent est déterminée à partir du déphasage accumulé par une onde sinusoïdale radiofréquence (RF) se propageant le long du trajet au moyen d'une porteuse optique. Comme décrit sur la figure 2, un synthétiseur de fréquence génère un signal RF afin de moduler l'inten-

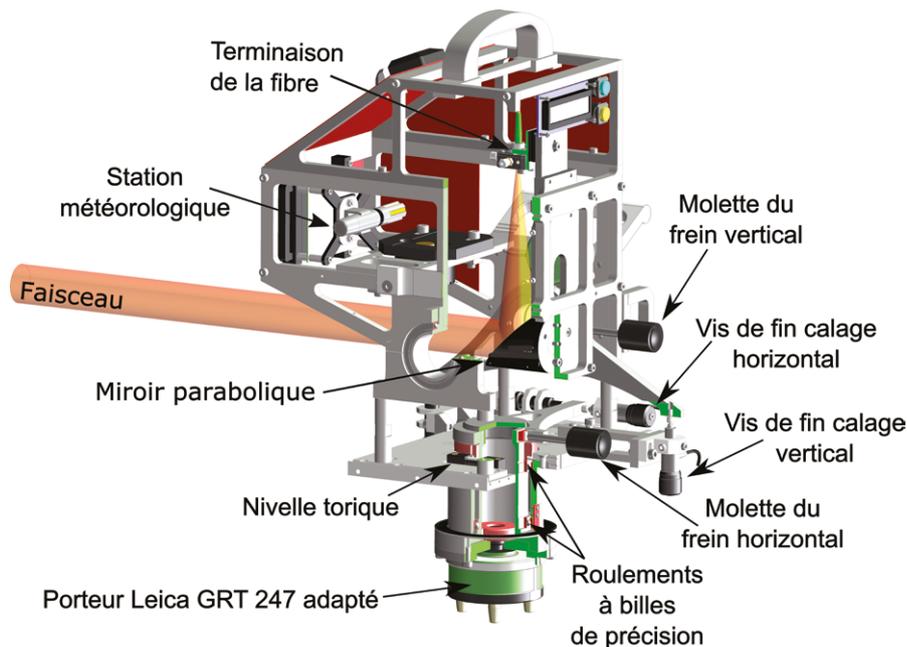


Figure 3. Coupe du montage mécanique du télémètre

sité d'une diode laser. Cette porteuse optique se propage alors jusqu'à un coin de cube où elle se réfléchit, puis elle revient vers le télémètre où elle est détectée par une photodiode (PD).

Le déphasage $\Delta\Phi$ de la modulation est défini comme la différence entre la phase de l'onde sinusoïdale photo détectée (Φ_{opt}) et celle d'une onde sinusoïdale de référence provenant directement du synthétiseur de fréquence (Φ_{ref} électrique). La distance mesurée est alors égale à :

$$2 \times L(n) = \left(\frac{\Delta\Phi}{2\pi} + k \right) \times \frac{c}{n \times f_{RF}}$$

où $L(n)$ est la distance entre le télémètre

et le coin de cube, le facteur 2 venant du fait que le télémètre mesure un aller-retour, c est la vitesse de la lumière dans le vide, n l'indice de réfraction de groupe de l'air, f_{RF} la fréquence de modulation et k un nombre entier correspondant au nombre de longueurs d'onde synthétiques contenues dans la distance à mesurer. Nous appellerons par la suite cet entier, l'ordre de la distance.

Dans le détail, une diode laser à rétroaction répartie (DFB), contrôlée en température par un élément Peltier, émet à une longueur d'onde de 1550 nm. Ce faisceau laser est alors modulé en intensité à 4895 MHz à l'aide d'un modulateur électro-absorbant (EAM). Après être passé par un coupleur optique 2x2 qui joue le rôle de circulateur, il est émis à l'air libre. Un miroir parabolique hors d'axe d'angle 90° permet de collimater le faisceau sur une longue distance, voir figure 3. Ce miroir, de 51 mm de diamètre, est placé à 152,4 mm de la sortie de la fibre (correspondant à la distance focale équivalente du miroir), ce qui permet d'obtenir une taille de spot de 28,6 mm de diamètre en sortie du miroir due à l'ouverture numérique de la fibre de 0,094 (valeur expérimentale à $1/e^2$ du niveau de puissance).

Le miroir est achromatique et peut être utilisé aussi bien avec la longueur

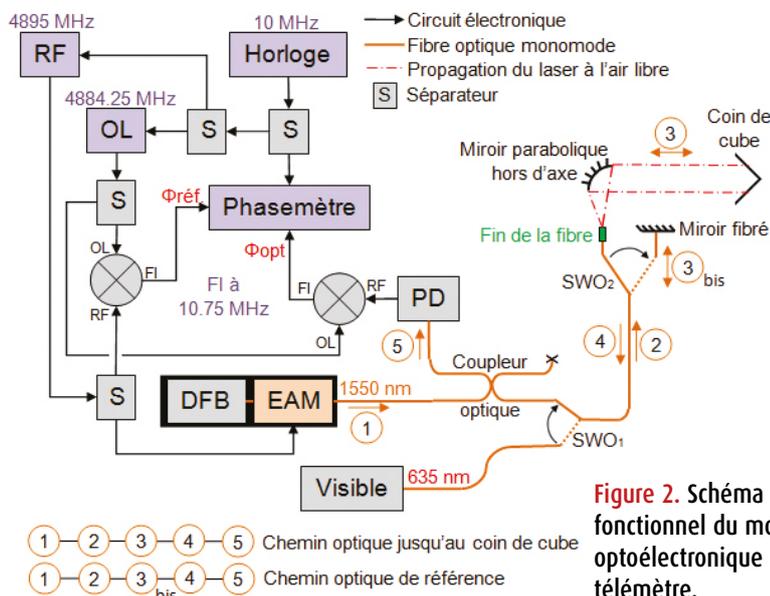


Figure 2. Schéma fonctionnel du montage optoélectronique du télémètre.



d'onde 1550 nm qu'avec une longueur d'onde à 635 nm, une longueur d'onde visible. Ainsi, un commutateur (SWO₁) placé entre le coupleur et la sortie permet de basculer du faisceau infrarouge, permettant la mesure, au faisceau visible, permettant l'alignement. Après s'être réfléchi sur le coin de cube, le faisceau revient vers le télémètre pour se réinjecter dans la fibre optique dont il est issu. Il repasse alors par le coupleur 2x2 et arrive sur une photodiode PIN InGaAs (PD), pour être converti en photocourant. La phase de ce signal électrique doit être comparée à celle du signal issu du synthétiseur de fréquence.

Ce déphasage est mesuré par un phase-mètre conçu au laboratoire, basé sur un circuit FPGA (*Field-Programmable Gate Array*). Cependant, celui-ci ne fonctionne bien qu'avec des fréquences comprises entre 10 et 20 MHz, or celle de l'onde RF est de 4895 MHz. Pour y remédier, une descente en fréquence est effectuée au moyen d'un oscillateur local (OL) dont la fréquence est séparée de l'onde principale de 10,75 MHz. L'exactitude de cette fréquence est assurée par une horloge atomique au rubidium miniature, à 10 MHz, qui synchronise également la fréquence RF. La descente en fréquence s'effectue simplement par un mélangeur de fréquences qui effectue le produit des deux ondes : la fréquence intermédiaire (FI) ainsi produite, à 10,75 MHz, peut enfin être traitée par le phasemètre.

L'évolution de la température dans l'optoélectronique et les composants micro-ondes, ainsi que les tensions mécaniques exercées sur la fibre optique, induisent des dérives importantes sur la phase mesurée, et donc sur la distance. Pour compenser ces variations, nous effectuons régulièrement la mesure d'un chemin optique de référence, dont la longueur est supposée fixe. Ainsi, toutes les variations observées sur ce chemin seront interprétées comme des dérives du système et soustraites à la distance mesurée. Un second commutateur (SWO₂) a donc été placé le plus proche possible de la sortie de la fibre, afin de pouvoir basculer entre la distance au coin de cube et la distance à un miroir interne fibré. Pour optimiser ce chemin de référence,

nous avons fait en sorte que la sortie de la fibre, dans la branche 3 en *figure 2*, et le miroir fibré, dans la branche 3bis en *figure 2*, se trouvent à la même distance du commutateur et soient dans des conditions environnementales les plus proches possibles. La distance finale est donc la différence entre la distance mesurée jusqu'au coin de cube et la longueur du chemin optique de référence :

$$L = L_{c.c.} - L_{ch. opt. ref.}$$

Principe de la mesure

En pratique, la mesure s'effectue en trois étapes. Dans un premier temps, l'ordre est déterminé. Pour cela, cinq fréquences de modulation différentes sont utilisées : 4778 MHz, 4778,01 MHz, 4778,5 MHz, 4839 MHz et 4978 MHz. Ainsi cinq mesures de distance sont effectuées séquentiellement. Pour chacune d'entre elles, la mesure de déphasage correspond à une infinité de distances selon la valeur de l'ordre k :

$$\forall i \in [1:5], \forall k \in \mathbb{N}_+$$

$$L_i(k) = \left(\frac{\Delta\Phi_i}{2\pi} + k \right) \times \frac{c}{2 \times f_i}$$

Afin de limiter cette infinité de solutions nous déclarons que la distance doit être inférieure à 8 km, valeur arbitraire qui peut évoluer par la suite. À chaque distance possible L_i , de l'équation ci-dessus, est associée une valeur d'incertitude σ_i . Ce qui donne au final, pour une fréquence donnée, un ensemble de segments de distances possibles. Leur longueur est de $2\sigma_i$ et ils sont espacés entre eux par la demi-longueur d'onde synthétique $c/2f_i$. L'étude des distances possibles pour deux fréquences f_1 et f_2 , avec $f_2 > f_1$, amène à la conclusion que les zones où se recoupent les segments de la fréquence f_1 et de la fréquence f_2 correspondent aux segments d'une mesure effectuée à la fréquence $(f_2 - f_1)$. Les cinq fréquences de modulation sont donc couplées, afin d'obtenir de faibles fréquences résultantes qui permettent une estimation grossière de la distance que l'on affine progressivement, jusqu'à obtenir une seule valeur d'ordre possible. Cette valeur sera celle pour laquelle une solution existe pour chacun des couples de fréquences.

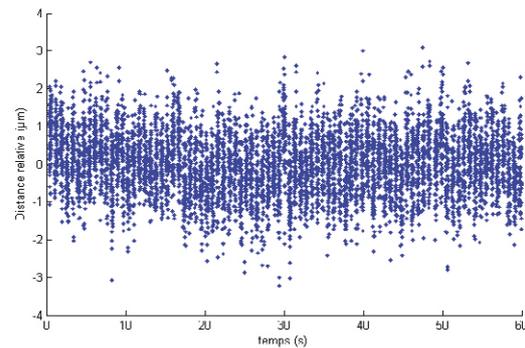


Figure 4. Distance observée par le télémètre en fonction du temps. Observation typique du télémètre qui permet de déterminer sa résolution. L'écart-type des mesures d'une distance courte, sur 1 min, est de 800 nm.

Dans un deuxième temps, une mesure fine de la distance est effectuée. Elle est obtenue en moyennant la mesure du déphasage sur un grand nombre d'observations.

La *figure 4* présente la courbe de la distance fine obtenue lors de la mesure répétée en laboratoire d'une distance de 24,4 cm pendant une minute. Chaque point représente la distance correspondant à l'intégration du déphasage pendant 10 ms. La distance est très faible et l'atmosphère très stable, les conditions sont idéales, ce qui explique que l'écart-type sur la minute soit de seulement 0,8 μm . Sur des distances de quelques mètres en atmosphère stable, l'écart-type peut monter jusqu'à 3 μm . En pratique, lors de la mesure d'une telle distance, le télémètre effectue une centaine d'observations qu'il moyenne pour obtenir sur la mesure de distance finale une résolution inférieure à 3 μm .

Une fois l'ordre et la distance fine obtenus, la distance absolue est corrigée de l'indice de réfraction de l'air en utilisant les formules de Bönsch et Potulski [Bönsch (1998)].

Comparaison avec des interféromètres

Afin de nous assurer de l'exactitude de l'instrument développé, nous comparons des valeurs de déplacements mesurées par le télémètre Arpent à celles données par un interféromètre. Pour de courts déplacements, nous





serons limités par le phénomène de diaphonie qui engendre une erreur périodique en fonction de la distance. Celui-ci correspond à la superposition d'un signal parasite sur le signal utile que l'on veut étudier, ce signal parasite ayant la même fréquence RF que le signal utile. Il peut venir de réflexions optiques, par exemple au niveau de la terminaison de la fibre, d'une mauvaise isolation d'un circuit optique ou RF, ou bien encore d'un rayonnement direct du synthétiseur de fréquence sur l'étage de réception électronique. En masquant le faisceau du télémètre, nous observons une diaphonie de -70 dBm et donc un rapport signal à diaphonie d'environ -75 dB qui implique, d'après des simulations conduites sous Matlab®, une erreur périodique d'amplitude crête à crête de 3,1 μm . Afin de vérifier si l'on observe ces variations sur la mesure de distance, un protocole a été mis au point à l'aide d'un interféromètre de 3 m, au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) de Paris. La demi-longueur d'onde synthétique de l'onde RF est de 30,62 mm. S'il y a effectivement une erreur périodique, elle aura cette période. Des mesures sur 6 cm ont donc été effectuées : la *figure 5* représente la différence entre les distances mesurées par l'interféromètre et celles mesurées par le télémètre Arpent. Cette comparaison permet de conclure que l'erreur périodique est négligeable, car inférieure à 3 μm , comme le prévoyaient nos simulations.

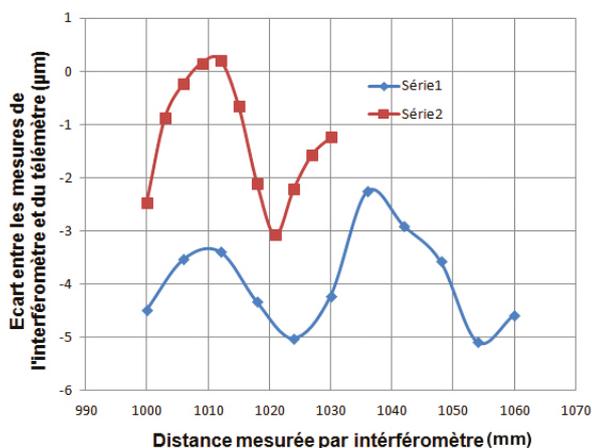


Figure 5. Comparaison avec le banc interférométrique de 3 m : écart entre les mesures effectuées par le télémètre et par l'interféromètre en fonction de la distance.

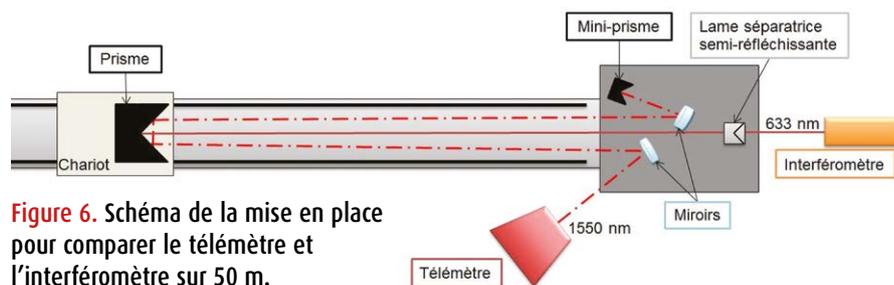


Figure 6. Schéma de la mise en place pour comparer le télémètre et l'interféromètre sur 50 m.

Pour de plus longs déplacements, la comparaison avec un interféromètre permet de vérifier l'erreur linéaire (proportionnelle à la distance mesurée). Celle-ci pourrait être causée soit par l'utilisation d'une fréquence RF légèrement décalée par rapport à la valeur attendue de 4 895 MHz, soit par un problème dans la correction de l'indice de réfraction de l'air. L'amplitude des erreurs observées sur 3 m durant la comparaison ne dépasse pas 6 μm crête à crête et aucun facteur d'échelle n'apparaît.

Afin de mieux caractériser l'incertitude du télémètre, nous avons alors utilisé un interféromètre de 50 m, à l'École supérieure des géomètres et topographes (ESGT) au Mans. La *figure 6* décrit la procédure utilisée pour que les deux appareils mesurent le déplacement du même coin de cube, en parcourant un chemin quasi similaire et en observant la même atmosphère. Dans cette configuration, le télémètre mesure deux fois le déplacement observé par l'interféromètre. Pour permettre la comparaison, les distances mesurées par le télémètre sont divisées par deux. Le banc de 50 m permet donc de connaître l'incertitude-type du télémètre sur 100 m et

cette dernière sera le double de l'incertitude-type obtenue par comparaison sur 50 m. Enfin, pour corriger l'erreur sur la mesure d'indice, les différents paramètres météorologiques ont été relevés régulièrement grâce à huit capteurs de température, un capteur de pression et un capteur d'humidité. Cependant, les capteurs de température sont situés au niveau du banc, à une quinzaine de centimètres du prisme. Il existe certainement une différence entre les températures mesurées et la température de l'air traversé par les faisceaux, mais cette erreur peut être négligée. En effet, lorsque les deux faisceaux parcourent un même chemin, une erreur de 1°C sur la température entraîne sur la différence des distances du télémètre et de l'interféromètre un écart de seulement 0,3 μm .

Deux séries d'observations ont été effectuées sur deux jours consécutifs. Le premier jour, grâce à un meilleur alignement optique, les variations du signal RF reçu par Arpent était de seulement 2 dB sur 100 m contre 10 dB le deuxième jour. Sur la *figure 7*, l'erreur correspond à la différence entre les mesures du télémètre et de l'interféromètre après

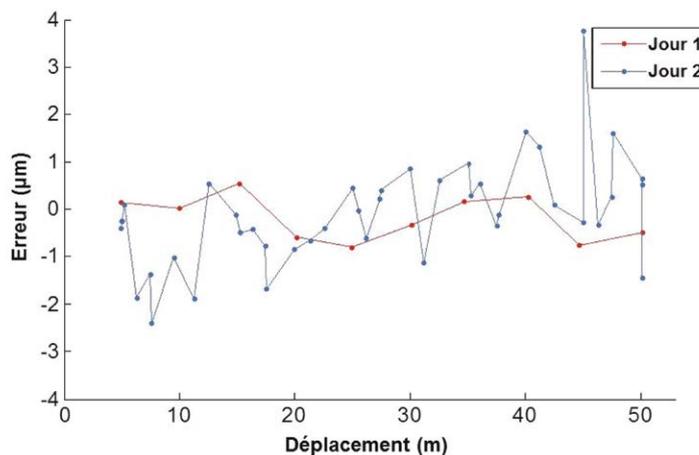


Figure 7. Courbes de comparaison avec le banc interférométrique de 50 m : écart entre les mesures effectuées par le télémètre et par l'interféromètre en fonction de la distance.

correction de l'indice de l'air. Elle est inférieure à 1 μm le premier jour avec un écart-type de seulement 0,5 μm et inférieure à 4 μm le deuxième jour avec un écart-type de 1,1 μm . La comparaison avec l'interféromètre de 50 m permet donc de conclure que le télémètre a une incertitude-type de 2,2 μm sur 100 m.

Résolution sur 5 km

Le télémètre a ensuite été testé sur une distance de 5,4 km entre le bâtiment du LNE Paris et l'observatoire de Meudon. Une station météorologique a été placée à chaque extrémité de cette ligne de base. La température était de 8,2 °C et 10 °C ; la pression de 1003,6 hPa et 992,9 hPa et l'humidité relative de 57 % et 68 %, respectivement, à Paris et Meudon. Le ciel était couvert avec un vent d'environ 14 km/h. La propagation au-dessus de l'environnement urbain, induisait de fortes perturbations atmosphériques. Néanmoins, l'écart-type observé sur 15 s variait entre 10 μm et 40 μm pour un temps d'intégration de 10 ms.

Le coin de cube situé à 5,4 km a été déplacé par pas de 100 μm à l'aide d'une platine de déplacement à vis micrométrique, de 0 à -1 mm puis de -1 à 0 mm. Entre chaque pas, le coin de cube était replacé à sa position initiale afin d'estimer et de corriger la dérive de la distance sur les dix minutes de mesures. La *figure 8* démontre les performances du télémètre. Finalement, il a la résolution suffisante, malgré les perturbations atmosphériques, pour discerner clairement des variations de distances de 100 μm .

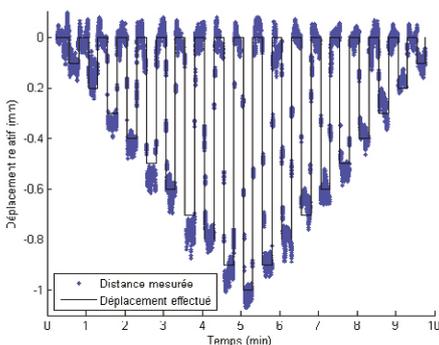


Figure 8. Mesure des pas de 100 μm du coin de cube situé à 5,4 km : observation par le télémètre des déplacements d'un coin de cube en fonction du temps.

Comparaison avec des appareils commerciaux

Enfin, une campagne de mesures a été menée à l'ESGT au Mans afin de comparer sur environ 4 km les mesures faites par trois appareils différents : Arpent, un tachéomètre Leica TM30 [Leica Geosystems (2013)] et un tachéomètre Trimble TS8 [Trimble (2015)]. Deux récepteurs GPS (*Global Positioning System*) Leica SR520 ont également été utilisés pour comparer la distance GPS à nos mesures. Les instruments ont été posés sur des piliers géodésiques qui assurent leur stabilité, tandis que le coin de cube a été placé sur un trépied, dans un champ, à 4 km. Le tachéomètre TS8 a été utilisé en mode automatique et en mode suivi (*Tracking*) pour effectuer des mesures régulières. Le TM30 n'a malheureusement pas réussi à effectuer des mesures en mode automatique, certainement à cause de conditions météorologiques difficiles (fort flamboiement), seules deux observations ont été enregistrées en mode standard. Arpent a, quant à lui, effectué six mesures en continu sur 11 min. Dans ces conditions, leur incertitude-type théorique est de 5 mm + 2 ppm pour le TS8, 1 mm + 1 ppm pour le TM30, et 3 μm pour Arpent. L'erreur d'échelle de Arpent est inférieure à 3 μm sur 100 m (*figure 7*), soit inférieure à 30 ppb (partie par milliard). Enfin, les mesures ont été corrigées de l'indice de réfraction de l'air.

Les résultats, présentés *figure 9*, peuvent être découpés en plusieurs étapes. De 13 h 30 à 15 h 00, le coin de cube était positionné à 4 km et a été visé avec le télémètre et les deux tachéomètres. À 15 h 00, une platine de déplacement a

été utilisée pour éloigner ou rapprocher le coin de cube par pas de l'ordre du dixième de millimètre. À 15 h 30, un coin de cube plus petit, de diamètre 63 mm, a pris la place du coin de cube de diamètre 127 mm, toujours à 4 km, afin de savoir si le télémètre Arpent permettait l'utilisation de coins de cube plus petits. De 16 h 00 à 17 h 30, deux antenne GPS Leica ont été simultanément positionnées, l'une à l'emplacement du coin de cube et l'autre sur le pilier où était Arpent. Afin d'obtenir la résolution souhaitée, les antennes ont été laissées en place pendant plus d'une heure. Enfin, de 17 h 30 à 18 h, un levé topométrique du chantier a été effectué afin de pouvoir propager les coordonnées obtenues par GPS. Nous pouvons observer, sur la *figure 9*, que l'écart-type annoncé par Trimble pour les mesures du TS8, de 5 mm, est respecté. Pour une meilleure visualisation, une moyenne mobile (sur une minute) a été tracée. Il y a peu de données lors du passage au petit coin de cube, l'alignement était plus difficile et le signal reçu était beaucoup plus faible, ce qui confirme notre choix de travailler avec des coins de cube de diamètre 127 mm. Nous pouvons également observer que les mesures sont toutes cohérentes entre elles et que le TS8 observe le décalage de la platine de déplacement mais n'a pas la résolution suffisante pour le quantifier. Les conditions atmosphériques de ce chantier étaient extrêmement perturbées. Il y avait un flamboiement important à cause de températures avoisinant les 35 °C. De plus, la station météorologique qui devait observer les paramètres au niveau du coin de cube n'a pas fonctionné. L'indice de l'air

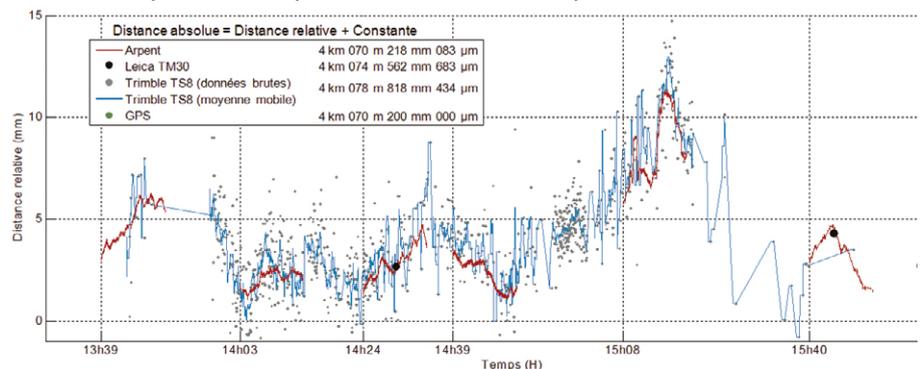


Figure 9. Comparaison avec des appareils commerciaux, pour une meilleure visualisation, les courbes ont été superposées : écart par rapport à une distance fixe (écrite dans l'encadré) en fonction du temps.

► n'était donc connu qu'au niveau de la tête du télémètre, ce qui peut impliquer une erreur importante (de l'ordre de 4 mm/°C). Malgré tout, le télémètre a été capable d'effectuer une mesure de distance en continu (sans suivi comme les autres tachéomètres). Le nombre de points obtenus en 2 h est bien plus important qu'avec les autres instruments. En effet, Arpent a effectué environ 9 000 mesures à chaque observation de 11 min tandis que le TS8 n'en a effectuées que 834 sur 1 h 40 au lieu des 6 000 prévues (une par seconde). Les distances du chantier ont également été calculées grâce aux coordonnées obtenues par GPS, propagées par topométrie. Le tableau, *figure 10*, répertorie pour chaque instrument la différence entre la mesure observée sur le terrain à 14 h 30 et celle calculée grâce aux coordonnées décrites ci-dessus.

	Télémètre	TS8	TM30
Observation (m)	4070,2207	4078,8210	4074,5652
Calcul (m)	4070,2027	4078,7383	4074,5462
Différence (mm)	18,0	82,8	19,0

Figure 10. Comparaison avec le GPS

Les écarts centimétriques obtenus s'expliquent principalement par l'erreur due à la température (environ 12 mm en considérant une variation de 3 °C le long du trajet du faisceau). Un tel écart rappelle l'intérêt de développer un appareil s'affranchissant des fluctuations de l'indice de l'air. Seul le TS8 a un écart plus important que nous pouvons expliquer uniquement par les conditions difficiles de ce chantier.

Conclusion

L'utilisation de composants optoélectroniques et d'optique fibrée, venant de l'industrie des télécommunications, nous a permis de réaliser un prototype de télémètre compact, de portée multi-kilométriques, avec des performances supérieures aux modèles commerciaux existants, en terme d'exactitude et de nombre de données d'observation par unité de temps.

D'après la comparaison à l'interféromètre de 3 m du LNE, l'erreur due au phénomène de diaphonie s'avère négligeable et l'incertitude-type sur 3 m du télémètre est de 3 µm. La comparaison avec l'interféromètre de 50 m de

l'ESGT permet de conclure qu'Arpent a une incertitude-type de 2 µm sur 100 m. Les expériences en extérieur, avec deux tachéomètres commerciaux et des récepteurs GPS, ont permis de conclure que les appareils sont cohérents entre eux et que le télémètre Arpent a une résolution de l'ordre de 200 µm sur 4 km dans des conditions atmosphériques très perturbées. Par temps couvert, la résolution d'Arpent a été mesurée à 40 µm (valeur maximale observée) sur 5,4 km. Enfin, l'écart obtenu, de 18 mm, entre la mesure faite par GPS et celle du télémètre, est inférieur à la demi-longueur d'onde du télémètre, confirmant ainsi la méthode de détermination de la valeur de l'ordre. Ces résultats sont la première étape vers la réalisation d'un système à deux longueurs d'onde qui devrait permettre la compensation de l'indice de l'air, et ainsi la mesure de distances absolues avec une incertitude millimétrique sur 5 km. Un montage est en cours de réalisation avec les deux longueurs d'onde de 1 064 et 532 nm. ●

Remerciements

Le premier design du FPGA constituant le phasemètre de l'instrument a été réalisé dans le cadre du projet 07-BLAN-0309-01 de l'Agence nationale de la recherche (ANR). L'auteur remercie très chaleureusement Michel Lintz du laboratoire ARTEMIS de l'Observatoire de la Côte d'Azur pour ses précieux conseils en tout début de projet.

Contacts

Maylis TEYSSENIER DE LA SERVE¹⁻²
maylis.tdls@gmail.com

Jean-Pierre WALLERAND¹
Joffray GUILLORY¹ - Daniel TRUONG¹
Christophe ALEXANDRE³ - José CALI⁴
Stéphane DURAND⁴

1 Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam,

2 Institut national de l'information géographique et forestière,

3 Centre d'études et de recherche en informatique et communications, Cnam,

4 Laboratoire géomatique et foncier, Cnam

Bibliographie

G. Bönsch and E. Potulski. *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae*. *IOP Metrologia*, Vol. 35, No. 2, pp. 33-139, 1998.

K. B. Earnshaw and E.N. Hernandez. *Two-Laser Optical Distance-Measuring Instrument that Corrects for the Atmospheric Index of Refraction*. *OSA Applied Optics*, Vol. 11, No. 4, pp. 749-754, 1972.

G. Beutler, J. Gervaise, W. Gurtner, M. Mayoud. *Test of global positioning system (NAVSTAR satellites) on the CERN-LEP control network*, pp. 7-9, 1985.

B. Edlén. *The Refractive Index of Air*. *IOP Metrologia*, Vol. 2, No. 2, pp. 71-80, 1996.

J. Gervaise. *First results of the geodetic measurements carried out with the Terrameter, two-wavelength electronic distance measurement instrument*. *Proc. Of Geodätischen Seminar über Electrooptics*, 1983.

J. Guillory, R. Šmid, J. García-Márquez, D. Truong, C. Alexandre, J-P. Wallerand. *High resolution kilometer range optical telemetry in air by Radio Frequency phase measurement*. *AIP Review of Scientific Instruments*, Vol. 87, 075105, 2016.

J. Guillory, J-P. Wallerand, D. Truong, R. Šmid, C. Alexandre. *Towards Kilometer Distance Measurements with Air Refractive Index Compensation*. *JISDM*, Vienne, 2016.

Leica Geosystems. *Leica TS330/TM30 User Manual*, 2013. <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/220/>.

K. Meiners-Hagen and A. Aboud-Zeid. *Refractive index determination in length measurement by two-color interferometry*. *IOP Measurement Science and Technology*, Vol. 19, No. 8, 084004, 2008.

J. M. Rüeger. *Electronic Distance Measurement: An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.

Trimble. *TRIMBLE S8 TOTAL STATION datasheet*, 2015. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document:390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf.

J. Stone, S. D. Phillips and G. A. Mandolfo. *Corrections for Wavelength Variations in Precision Interferometric Displacement Measurements*. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 101, No. 5, pp. 671-674, 1996.

USGS Earthquake Hazards Program. *Two-Color Electronic Distance Meter (EDM)*, <https://earthquake.usgs.gov/monitoring/deformation/edm/>.

ABSTRACT

Keywords: Absolute distance meter, telemetry, kilometer distance, Radio Frequency modulation.

The dimensional metrology team of the "Laboratoire Commun de Métrologie" (LCM) is developing optical absolute distance meters based on the measurement of the phase accumulated by a Radio Frequency wave carried by a laser beam during its propagation in the air. This article introduces a 1550 nm telemeter developed at LCM and describes its characterization at the "Laboratoire National de métrologie et d'Essais" (LNE) and at the "École Supérieure des Géomètres et Topographes" (ESGT).

Le réseau et les services Orphéon intègrent Galileo et BeiDou : quels sont les avantages pour le NRTK de haute précision ?

■ Xiaoguang LUO - Jun CHEN - Bernhard RICHTER - version française de François FUND

Depuis le 7 septembre 2017, la totalité des stations de référence, l'infrastructure et les logiciels de calcul de corrections Orphéon opérés par Geodata Diffusion permettent de délivrer des produits "Full GNSS" (GPS + GLONASS + Galileo + BeiDou).

Pour tirer profit de la modernisation du réseau Orphéon, il est important de comprendre les avantages qu'offrent les signaux Galileo et BeiDou pour le positionnement NRTK (Near Real Time Kinematic). Au travers d'études de cas intégrant la longueur de la ligne de base, les multitrajets et les canopées, les résultats confirment que la constellation Galileo actuelle est utilisable à des fins de positionnement NRTK de haute précision et montrent une disponibilité, une précision, une fiabilité et un temps de fixation améliorés dans des environnements d'observation difficiles. Durant le déploiement du système Galileo, encore plus d'avantages sont à prévoir dans un futur proche.

Article paru dans la revue GPS World d'août 2017 sous le titre "How Galileo benefits high-precision RTK", version française avec l'accord des auteurs, l'introduction pour XYZ est de François FUND.

Introduction

Depuis le 7 septembre 2017, la totalité des stations de référence, l'infrastructure et les logiciels de calcul de corrections Orphéon opérés par Geodata Diffusion permettent de délivrer des produits "Full GNSS" (GPS + GLONASS + Galileo + BeiDou).

Après un mois de tests, Geodata Diffusion étoffe donc son offre de service en proposant aux utilisateurs du réseau Orphéon des corrections temps réel GNSS compatibles avec GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou. Orphéon devient ainsi le 1^{er} réseau de France 100 % Full GNSS sur tout le territoire national et pour l'ensemble de ses services.

Pour tirer profit de la modernisation du réseau Orphéon, il est important de

MOTS-CLÉS

Full GNSS, NRTK
benefits, signal
Galileo et BeiDou,
réseau Orphéon

Kinematic). Les résultats de ces études, focalisées sur Galileo, ont été publiés dans la revue GPS World le 9 août 2017. Avec l'accord des auteurs, cet article est republié ici en français.

Qu'attendre de la constellation actuelle ?

Cet article démontre les avantages qu'apporte l'utilisation de Galileo sur le NRTK de haute précision au travers d'études de cas intégrant la longueur de la ligne de base, les multitrajets et les canopées.

Les résultats confirment que la constellation Galileo actuelle est utilisable à des fins de positionnement NRTK de haute précision et montrent une disponibilité, une précision, une fiabilité et un temps de fixation améliorés dans des environnements d'observation difficiles.

Enfin, le positionnement RTK utilisant uniquement Galileo est comparé aux

comprendre les avantages qu'offrent les signaux Galileo et BeiDou pour le positionnement NRTK (Near Real Time

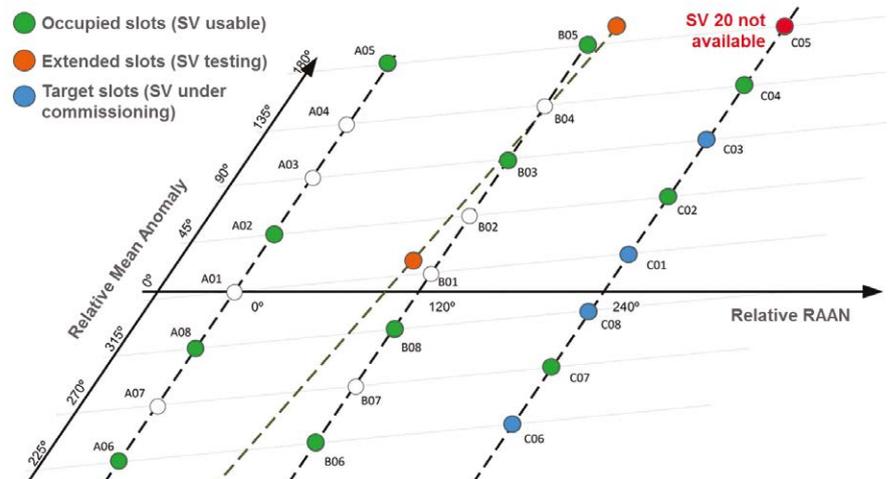


Figure 1. État de l'occupation des slots des orbites Galileo (RAAN : ascension droite des nœuds ascendants, 9 mai 2017). (Source : ESA)



positionnements utilisant uniquement GPS ou GLONASS.

Jusqu'à maintenant, et à partir de mesures simulées et observées, les avantages de Galileo (*figure 1*) pour le RTK de haute précision ont été évalués en mode RTK et NRTK. En nous basant sur des résultats de précédentes études utilisant généralement des analyses théoriques et des simulations, nous présentons les avantages d'ajouter Galileo pour le NRTK de haute précision à partir d'observations faites sur la constellation déployée dans sa phase IOC (*Initial Operational Capability*). En utilisant les corrections temps réel incluant Galileo, nous analysons les performances du NRTK en termes de disponibilité, de précision, de fiabilité et de temps de fixation dans différentes conditions de mesure.

Pour atteindre une interopérabilité maximale avec les autres constellations GNSS, tous les signaux Galileo dans les bandes E1 et E5, c'est-à-dire E1, E5a, E5b et AltBOC (*Alternative Binary Offset Carrier*), sont utilisés pour le positionnement via les derniers *firmware* et modèles de récepteurs propriétaires (voir le chapitre "Equipements utilisés"). Le signal Galileo E1 est superposé au signal GPS L1 à une fréquence centrale de 1575.42 MHz, tandis que le signal Galileo E5a est superposé au signal GPS L5 à la fréquence 1176.45 MHz. Concernant BeiDou, la fréquence Galileo E5b correspond à sa fréquence B2 de 1207.14 MHz.

Le signal AltBOC est utilisé pour bénéficier de sa capacité à éliminer les multitrajets. La disponibilité de plus de deux fréquences est aussi bénéfique pour la modélisation des effets ionosphériques qui jouent un rôle important dans la résolution des ambiguïtés en temps réel.

De plus, le RTK multifréquence apporte plus de résistance aux interruptions de signal GNSS causées par des interférences ou aux multitrajets. Lors de la formation de combinaisons linéaires, l'utilisation de signaux multifréquences accroît la flexibilité et la robustesse. Les algorithmes RTK doivent prendre en compte les corrélations induites par l'utilisation d'un même signal dans différentes combinaisons.

En sélectionnant le tracking des satellites Galileo des récepteurs, les signaux Galileo seront utilisés par défaut pour différents modes de positionnement RTK comme le positionnement navigué, le DGPS, le RTK étendu xRTK et le RTK fixe. En comparaison du RTK fixe, le xRTK fixe est d'une précision légèrement moindre mais fournit une meilleure disponibilité dans des environnements difficiles comme les canyons urbains et les canopées denses.

En termes de formats de correction RTK, Galileo est inclus dans les messages RTCM v3 MSM et dans le format propriétaire Leica 4G. Pour utiliser Galileo avec les réseaux RTK, les produits temps réel opérés par les services de corrections doivent l'inclure. Dans les dernières versions des logiciels propriétaires des réseaux GNSS, Galileo est utilisé pour produire des corrections RTK de type iMAX (*Master Auxiliary*) et VRS (*Virtual Reference Station*) dans les formats RTCM 3.2 MSM.

Critères de performances RTK

Le RTK multiconstellation et multifréquence GNSS est un procédé temps réel complexe, cherchant à fournir un positionnement d'une précision centimétrique au bout de quelques "époques", en mode cinématique et ce même dans des environnements difficiles. En conséquence, les critères de performance RTK doivent être soigneusement sélectionnés pour évaluer le système complet et satisfaire les besoins des applications des utilisateurs.

Les paramètres suivants sont utilisés dans cet article pour évaluer les avantages de Galileo pour le RTK de haute précision.

- **Utilisation satellite** : nombre de satellites utilisés dans la solution RTK fixe avec un angle de coupure de 10°.
- **Disponibilité** : pourcentage de position RTK fixe relativement au nombre de positions obtenues dans une période donnée.
- **Précision** : écarts des positions RTK fixes par rapport à une référence de très forte précision, pouvant être déterminée par une station totale ou un post-traitement GNSS sur une longue période.

- **Fiabilité** : pourcentage d'erreurs de positionnement (par rapport à la référence) inférieures à trois fois l'indicateur qualité QC (*Quality Check*).

- **Temps de fixation (TTF ; Time To Fix)** : durée nécessaire à l'obtention d'une position RTK fixe après perte des ambiguïtés entières et sans interruption de signal GNSS.

Observations "open-sky"

Cette étude a été effectuée sur un banc de test à Heerbrugg. Deux récepteurs ont été connectés à une même antenne à l'aide d'un *splitter* quatre ports. Un récepteur recevait quatre types de corrections iMAX dans le format RTCM v3 MSM pour une ligne de base de 2 km, tandis que le deuxième récepteur recevait les mêmes corrections mais pour une ligne de base de 116 km. Considérant les différentes longueurs de ligne de base, l'expérience s'est concentrée sur l'utilisation possible de la constellation Galileo actuelle dans des conditions normales d'utilisation. Deux jours de données GNSS cadencées à 1Hz ont été analysées en termes d'utilisation satellite et de précision.

Suivant les combinaisons GNSS de la ligne de base courte, GPS+GLO (GG), GPS+GLO+BDS (GGB) et GPS+GLO+GAL+BDS (GGGB), le nombre moyen de satellites utilisés étaient respectivement de 15, 17 et 20 et avec un angle de coupure de 10°. En moyenne, trois satellites Galileo ont contribué aux solutions NRTK fixe.

Pour la combinaison quadri-constellations GGGB, la *figure 2* montre l'utilisation satellite de chaque constellation au cours des deux jours. On peut voir que pour une ligne de base de 2 km, un nombre maximum de quatre satellites Galileo peut être utilisé pour le positionnement. En fait, durant 80.3 % du temps, le nombre de satellites Galileo utilisés dans les solutions NRTK fixe était égal ou supérieur au nombre de satellites BeiDou utilisés.

Le *tableau 1* fournit les statistiques de l'utilisation satellite de Galileo dans le cas GGGB et pour deux lignes de base. Comme prévu, le nombre de satellites Galileo utilisés diminue avec l'augmen-

Tableau 1. Probabilité (%) que n satellites Galileo soient utilisés pour le positionnement NRTK fixe GGGB durant les deux jours de l'étude open-sky (iMAX, RTCM v3 MSM, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS).

Nombre de satellites Galileo utilisés n	Courte ligne de base (2 km)	Longue ligne de base (116 km)
n = 0	1.9	15.0
n = 1	0.4	0.6
n = 2	28.8	41.0
n = 3	40.7	30.4
n = 4	28.2	13.0
n ≥ 2	97.7	84.4
n ≥ 3	68.9	43.4

tation de la longueur de la ligne de base. Dans approximativement 41 % des cas, trois satellites Galileo sont utilisés dans le cas de la longue ligne de base.

De plus, la probabilité qu'aucun satellite Galileo ne soit utilisé dans la combinaison quadri-constellation GGGB passe de 1.9 % à 15 % avec l'augmentation de la longueur de la ligne de base de 2 km à 116 km. La probabilité qu'un seul satellite Galileo soit utilisé en *open sky* est relativement faible, autour de 0.5 %. Ce résultat est satisfaisant puisqu'aucun avantage pour le NRTK de haute précision n'est attendu dans cette situation particulière. Dans le cas de la ligne de base courte, il y a une probabilité de 97.7 % qu'au moins deux satellites Galileo soient utilisés pour le positionnement, alors que cette probabilité diminue à 84.4 % dans le cas de la longue ligne de base.

En termes de précision, la *figure 3* compare l'erreur 3D sur la longue ligne

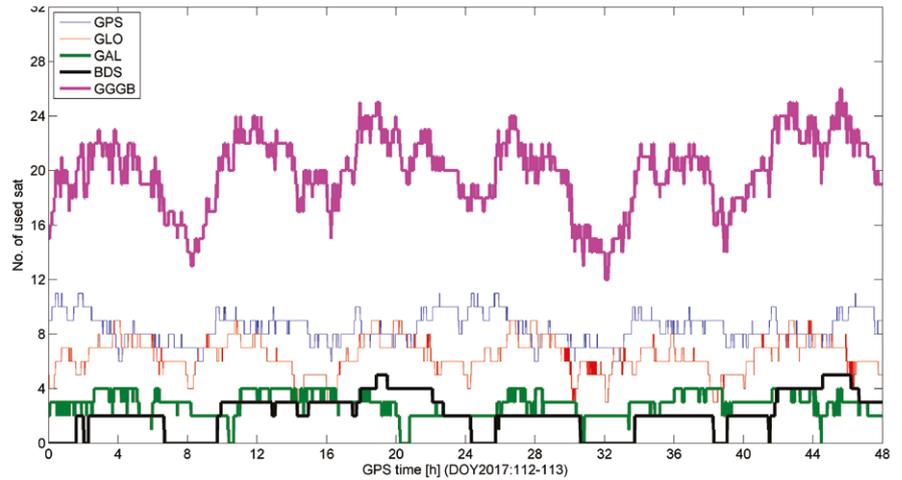


Figure 2. Nombre de satellites utilisés pour le positionnement NRTK fixe GGGB en open-sky (iMAX, RTCM v3 MSM, longueur de la ligne de base : 2 km, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS, DOY : jour de l'année).

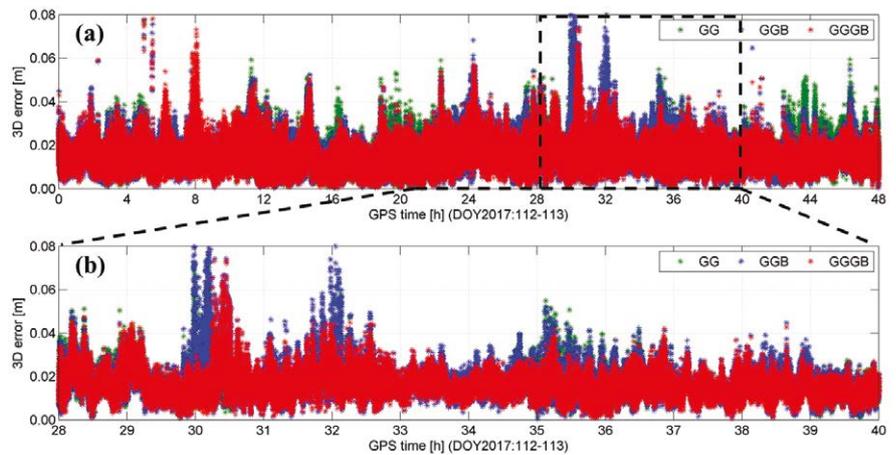


Figure 3. Erreurs 3D des positions NRTK fixe en open-sky (iMAX, RTCM v3 MSM, longueur de la ligne de base : 116 km, GG : GPS+GLO en vert, GGB : GPS+GLO+BDS en bleu, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS en rouge, DOY : jour de l'année) (a) période de deux jours entiers, (b) sélection d'une période de 12 h (28-40 h).

de base avec différentes constellations GNSS. Sur l'ensemble de la période illustrée sur la *figure 3a*, l'intégration de BeiDou (GG vs GGB) et de Galileo (GGB vs GGGB) fournit une répétabilité de positionnement plus forte. Sur

une période de douze heures, la *figure 3b* met en avant les avantages de Galileo qui réduit l'erreur 3D de 6-8 cm à 3-4 cm, au moment où deux ou trois satellites Galileo sont utilisés dans la solution GGGB.



Figure 4. Installation test dans un environnement avec d'importants multitrajets à Heerbrugg (mobile : GS16, hauteur d'antenne : 1.8 m) (a) vue depuis le Sud, (b) vue depuis le Nord.

Tableau 2. RMS (m) des positions NRTK fixe avec d'importants multitrajets (VRS, RTCM v3 MSM, GGB : GPS+GLO+BDS, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS).

	Total (3D)	Horizontal (2D)	Hauteur (1D)
GGB	0.080	0.028	0.075
GGGB	0.035	0.016	0.031
Amélioration	56.3%	42.9%	58.7%

Observations avec multitrajets

Pour cette étude, une antenne GNSS a été installée dans un environnement propice à d'importants multitrajets et où les signaux GNSS sont obstrués et réfléchis par les bâtiments environnants (figure 4). Cette installation simule le cas d'un utilisateur mesurant un point à proximité d'un bâtiment avec une qualité de réception des signaux GNSS dégradée, même à des angles d'élévation élevés.

Un angle de coupure de 10° a été appliqué. Le récepteur recevait quatre types de corrections VRS au format RTCM v3 MSM, et pour lesquelles la station de référence était à environ 200 m. Trois heures de données GNSS cadencées à 1 Hz ont été analysées en termes de précision, disponibilité et temps de fixation.

La figure 5 montre les erreurs 3D du NRTK multiconstellation avec et sans Galileo (GGGB vs GGB) ainsi que le nombre de satellites utilisés. Pour les périodes encadrées par les pointillés, l'introduction de deux ou trois satellites Galileo (figure 5b) améliore significativement le positionnement dont la précision passe du décimètre au centimètre (figure 5a). En comparant les fonctions de distribution cumulatives (CDF : *Cumulative Distribution Function*) et empiriques de l'erreur 3D, la probabilité que l'erreur 3D soit inférieure à 5 cm passe de 70 % à 85 % si Galileo est utilisé, et ce même avec un nombre maximum de trois satellites.

Les tableaux 2 et 3 fournissent respectivement les écarts quadratiques (RMS : *Root Mean Square*) des erreurs de positionnement NRTK fixe et la fiabilité des positions. En utilisant Galileo pour le NRTK haute-précision, l'erreur RMS 3D

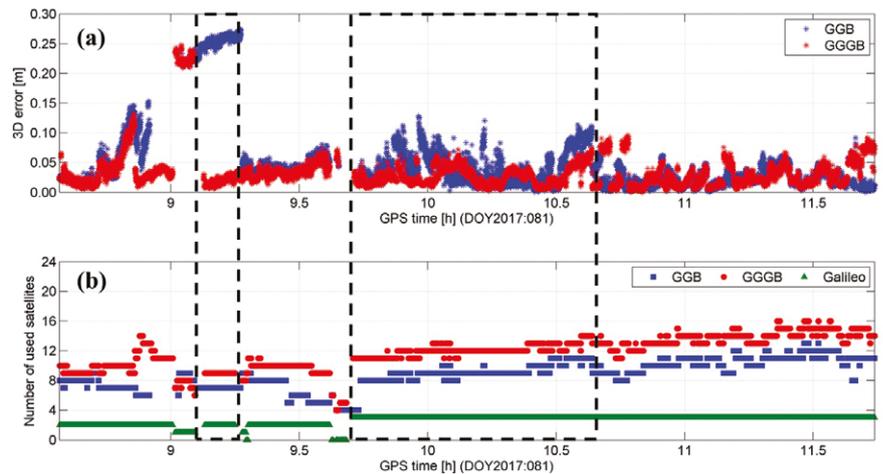


Figure 5. Impact de l'intégration de Galileo sur la précision du positionnement NRTK avec d'importants multitrajets (VRS, RTCM v3 MSM, GGB : GPS+GLO+BDS en bleu, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS en rouge, DOY : jour de l'année) (a) erreurs 3D des positions NRTK fixe, (b) nombre de satellites utilisés (Galileo en vert).

Tableau 3. Fiabilité (%) des positions NRTK fixe avec d'importants multitrajets (VRS, RTCM v3 MSM, GGB : GPS+GLO+BDS, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS).

	Total (3D)	Horizontal (2D)	Hauteur (1D)
GGB	88.2	87.9	88.3
GGGB	95.5	95.6	95.5
Amélioration	7.3	7.7	7.2

est significativement réduite de 56.3 %, passant de 0.080 m (GGB) à 0.035 m (GGGB). Par rapport aux composantes horizontales, le RMS des erreurs sur la hauteur présente une nette amélioration de 58.7 % due à l'intégration de Galileo. La fiabilité reflète la cohérence

entre l'erreur de positionnement et l'indicateur qualité CQ estimé à partir de modèles mathématiques intégrés dans les algorithmes NRTK. Comme l'indique le tableau 3, la fiabilité 3D s'améliore de 7.3 %, passant de 88.2 % (GGB) à 95.5 % (GGGB), et cette amélioration est comparable à celles des composantes horizontales et de hauteur.

Le TTF (*Time To Fix*) a été déterminé en réinitialisant constamment le NRTK une fois les ambiguïtés résolues. Durant toute la période dédiée aux réinitialisations, les signaux GNSS ont été suivis sans interruption. Un total de 775 TTF a été obtenu en mode GGB et 1128 TTF en mode GGGB. Le nombre nettement plus grand de TTF obtenu en mode GGGB indique une plus grande dispo-

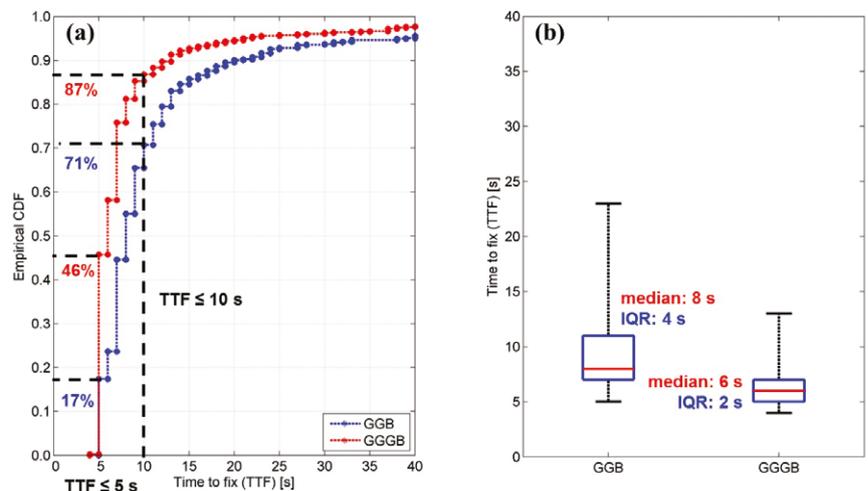


Figure 6. Statistiques de l'impact de l'intégration de Galileo sur le Time to Fix (TTF) avec d'importants multitrajets (VRS, RTCM v3 MSM) (a) fonction de distribution cumulée (CDF) du TTF, (b) médianes et écarts interquartiles du TTF (IQR).



Figure 7. Installation test sous canopée à Heerbrugg (mobile : GS10, antenne : AS10).

nibilité du NRTK fixe quand Galileo est utilisé.

La *figure 6* présente la distribution statistique du TTF suivant l'introduction ou non de Galileo. La CDF empirique sur la *figure 6a* indique un temps de résolution des ambiguïtés plus court avec la combinaison GGGB. En effet, elle permet de résoudre les ambiguïtés en moins de 5s (10s) avec 46 % (87 %) de probabilité, ce qui est 29 % (16 %) plus élevé que pour la combinaison GGB. Sur la *figure 6b*, la combinaison GGGB présente une médiane moins élevée (de l'ordre de 25 %, de 8s à 6s) et un écart interquartile réduit (IQR : *Inter-Quartile Range*, de l'ordre de 50 %, de 4s à 2s) par rapport à la combinaison GGB. Cela indique que l'utilisation de Galileo permet une réso-

lution des ambiguïtés plus rapide et avec des performances de fixation plus cohérentes.

Observations sous canopée

Pour cette étude, un récepteur a été connecté à une antenne sous trois canopées (*figure 7*) et où les signaux GNSS sont bloqués, atténués et réfléchis, conduisant à un nombre d'observations réduit, des données d'une qualité médiocre et des performances NRTK dégradées.

Dans ces circonstances, l'utilisation des satellites Galileo transmettant des signaux multifréquences peut être particulièrement avantageuse pour le NRTK de haute précision. En utilisant un angle de coupure de 10°, le récepteur recevait

quatre types de corrections iMAX au format RTCM v3 MSM pour une ligne de base de 116 km. Une longue ligne de base a été intentionnellement sélectionnée pour augmenter la difficulté. Environ sept heures de données GNSS cadencées à 1 Hz ont été analysées en termes de disponibilité, précision et fiabilité.

La *figure 8* illustre l'impact de l'utilisation de Galileo sur la disponibilité et la précision du positionnement NRTK sous canopée, ainsi que le nombre de satellites utilisés. Comme le montre la *figure 8a*, l'utilisation de Galileo

Tableau 4. RMS (m) des positions NRTK fixe sous canopée (iMAX, RTCM v3 MSM, longueur de la ligne de base : 116 km, GGB : GPS+GLO+BDS, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS).

	Total (3D)	Horizontal (2D)	Hauteur (1D)
GGB	0.114	0.065	0.102
GGGB	0.087	0.062	0.075
Amélioration	23.7%	4.6%	26.5%

Tableau 5. Fiabilité (%) des positions NRTK fixe sous canopée (iMAX, RTCM v3 MSM, longueur de la ligne de base : 116 km, GGB : GPS+GLO+BDS, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS).

Total	Total (3D)	Horizontal (2D)	Hauteur (1D)
GGB	92.6	99.2	94.6
GGGB	94.5	99.5	96.0
Amélioration	1.9	0.3	1.4

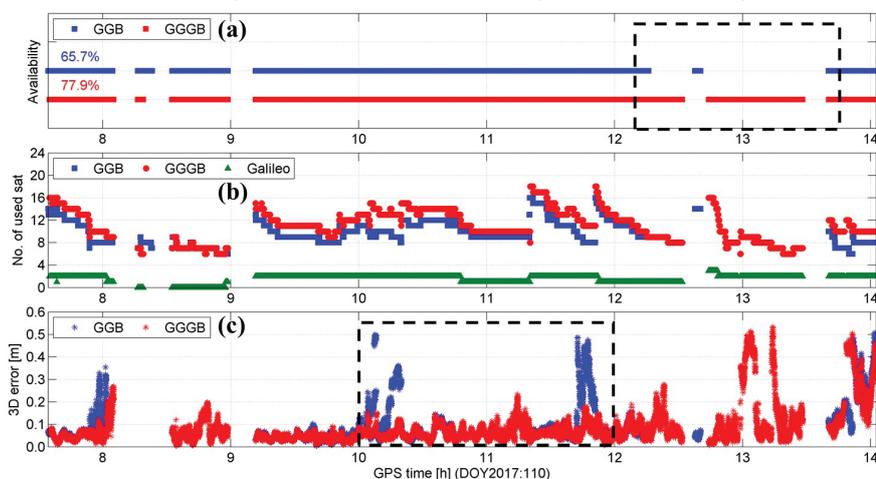


Figure 8. Impact de l'intégration de Galileo sur la disponibilité et la précision du positionnement NRTK sous canopée (iMAX, RTCM v3 MSM, longueur de la ligne de base : 116 km, GGB : GPS+GLO+BDS en bleu, GGGB : GPS+GLO+GAL+BDS en rouge, DOY : jour de l'année) (a) disponibilité des positions NRTK fixe au cours du temps, (b) nombre de satellites utilisés (Galileo en vert), (c) erreurs 3D des positions NRTK fixe.

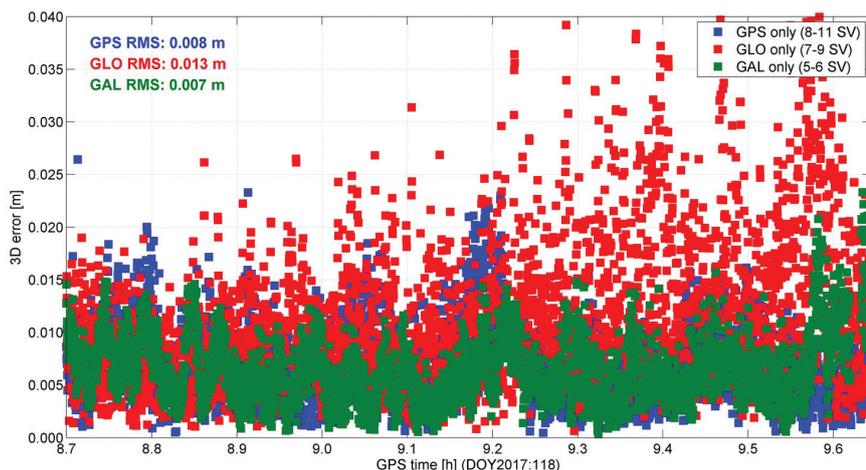


Figure 9. Erreurs 3D des positions RTK fixe GPS seul, GLONASS seul et Galileo seul en open-sky (longueur de la ligne de base : 1 m, RTCM v3 MSM, DOY : jour de l'année, RMS : Root Mean Square).

augmente la disponibilité des positions NRTK fixe de 12.2 %, passant de 65.7 % (GGB) à 77.9 % (GGGB). De plus, le nombre d'erreurs de positionnement décimétriques est largement réduit comme le montre la *figure 8c*. Les améliorations en termes de disponibilité et de précision sont atteintes en utilisant jusqu'à trois satellites Galileo (*figure 8b*). Cela démontre que la constellation Galileo actuelle, dans sa phase IOV, apporte des avantages considérables au NRTK de haute précision sous canopée.

Les *tableaux 4 et 5* fournissent respectivement les RMS des erreurs de positionnement et la fiabilité des positions. Les principaux facteurs de dégradation de la précision NRTK dans cette étude sont non seulement les canopées mais aussi la longueur de la ligne de base de 116 km. Le *tableau 4* montre que l'utilisation de Galileo réduit l'erreur RMS 3D de 23.7 %, passant de 0.114 m (GGB) à 0.087 m (GGGB).

En comparant les erreurs RMS 2D et 1D, les avantages de Galileo pour la composante de hauteur sont plus importants que pour les composantes horizontales, ce qui a également été observé dans un environnement avec multitrajets (*tableau 2*). En termes de fiabilité, une légère (moins de 2 %) amélioration est visible dans le *tableau 5*. Une ligne de base de 116 km et une canopée importante sont considérées comme une situation extrême et au-delà des spécifications d'une utilisation standard. En

considérant la fiabilité et la disponibilité (*figure 8a*), il est très encourageant de constater que ces deux critères de performance NRTK sont améliorés dans cette étude de cas.

RTK en mode Galileo seul

Pour optimiser les performances du positionnement RTK multi-GNSS, les GNSS individuels doivent être pleinement compris et maîtrisés. Depuis le précédent *firmware* d'août 2014, les équipements destinés aux marchés de masse sont en capacité d'effectuer du RTK haute précision en mode GLONASS seul et BeiDou seul. En 2014, nous avons comparé les performances du RTK en modes GPS seul, GLONASS seul et BeiDou seul et ce à différents niveaux de précision. Considérant que Galileo a atteint sa phase IOC, il est désormais possible d'évaluer le RTK en mode Galileo seul via le dernier *firmware*.

En raison du nombre limité de satellites Galileo utilisables, le positionnement RTK Galileo seul a été mené avec un banc de test *open-sky* et une ligne de base très courte (1 m). En plus, l'angle de coupure a été abaissé à 0° pour suivre simultanément le plus de satellites Galileo possible. Deux récepteurs ont été connectés à deux antennes *choke-ring* ayant une forte capacité de *tracking* à faible élévation. Le positionnement RTK a été effectué avec quatre types de corrections au format RTCM

v3 MSM. Environ 1 h de données GNSS cadencées à 1Hz ont été analysées, particulièrement en termes de précision du positionnement.

La *figure 9* montre l'erreur 3D des positionnements RTK GPS seul, GLONASS seul et Galileo seul où le nombre de satellites utilisés était respectivement de 8-11, 7-9 et 5-6. Durant la période de test, seulement trois ou quatre satellites BeiDou étaient suivis et avec une géométrie médiocre, rendant impossible le positionnement RTK BeiDou seul. Comme le montre la figure les erreurs 3D du RTK GPS seul et Galileo seul sont à des niveaux comparables avec des RMS similaires, alors que l'erreur RMS 3D du RTK GLONASS seul est presque deux fois plus importante que celle du RTK GPS/Galileo seul. À noter qu'en comparaison du RTK GPS seul, presque moitié moins de satellites sont utilisés dans le cas du RTK Galileo seul.

La *figure 10* présente la distribution statistique de l'erreur 3D des positionnements RTK GPS seul, GLONASS seul et Galileo seul. Les CDF empiriques sur la *figure 10a* indiquent que le RTK GPS/Galileo seul a une distribution de l'erreur plus favorable que le GLONASS seul. En utilisant seulement GPS ou Galileo, la probabilité que l'erreur 3D soit inférieure à 1 cm est supérieure à 80 %, ce qui est approximativement 30 % de plus qu'en GLONASS seul. Pour les erreurs 3D comprises entre 5 mm et 1.7 cm, le RTK Galileo seul présente même une probabilité légèrement meilleure que le GPS seul. Les erreurs 3D présentées sur la *figure 10b* illustrent un comportement similaire entre les RTK GPS seul et Galileo seul, et supérieur au RTK GLONASS seul en raison de plus faibles médianes et d'IQR.

Conclusions

Depuis l'annonce des premiers services opérationnels Galileo en décembre 2016, pour la première fois tous les utilisateurs GNSS du monde entier sont en capacité d'utiliser les informations de positionnement, de navigation et de datation fournies par la constellation globale des satellites Galileo. Avec un système complet en 2020, Galileo jouera un rôle important dans les applications GNSS de

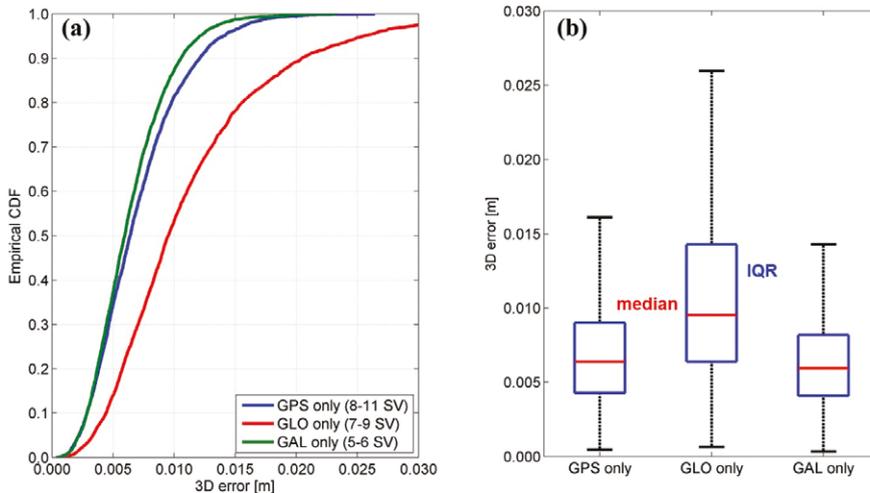


Figure 10. Statistiques des erreurs 3D du RTK GPS seul, GLONASS seul et Galileo seul en open-sky (longueur de la ligne de base : 1 m, RTCM v3 MSM (a) fonction de distribution cumulée (CDF) des erreurs 3D, (b) médianes et écarts interquartiles des erreurs 3D (IQR).

haute précision et ce pour tous les utilisateurs. Cet article présente des études de cas représentatives pour comprendre les avantages de la constellation actuelle pour le NRTK de haute précision.

En plus des solutions multi-GNSS, les performances du RTK ont été présentées en mode Galileo seul. Les principaux résultats issus de ces études de cas peuvent être résumés ainsi :

- Dans le cas d'observations *open-sky* et avec un angle de coupure de 10°, une moyenne de trois satellites Galileo peut être utilisée pour le NRTK multi-GNSS de haute précision. Cela conduit à des améliorations centimétriques de la répétabilité de la position et avec une longue ligne de base de 116 km.
- Dans le cas d'observations avec multitrajets, l'ajout de deux ou trois satellites Galileo permet une amélioration significative de la précision du positionnement passant du décimètre à quelques centimètres, et avec une amélioration plus significative de la composante de hauteur. De plus, l'utilisation de Galileo augmente la fiabilité 3D des positions NRTK fixe de 7.3 % et réduit le temps médian de fixation de 2s (25 %).
- Dans le cas d'observations sous canopée, l'introduction de Galileo améliore la disponibilité du NRTK fixe de 12.2 %. De plus, le nombre d'erreurs de positionnement d'ordre décimétrique est nettement plus faible.
- En comparaison du RTK GPS seul, le RTK Galileo seul fournit une précision

de positionnement similaire avec une ligne de base de 1 m, des observations open-sky et en utilisant presque moitié moins de satellites. L'erreur RMS 3D du RTK GLONASS seul est approximativement deux fois plus importante que celle du RTK GPS/Galileo seul.

Ces résultats prometteurs obtenus avec l'introduction de Galileo indiquent déjà le rôle important du GNSS européen pour le positionnement NRTK multiconstellation et multifréquence de haute précision. Durant le déploiement du système Galileo, encore plus d'avantages sont à prévoir dans un futur proche. ●

Remerciements

Nous remercions chaleureusement les équipes de Leica Geosystems AG (Heerbrugg/Suisse), Christian Waese et Youssef Tawk pour leur contribution à fournir les différents flux de données RTK.

Equipements utilisés

SmartWorx 6.16 de Leica Viva GNSS est le dernier firmware cité et utilisé dans les tests RTK de haute précision. Leica Spider 7.0.0 a fourni les corrections GNSS temps réel. Les observations *open-sky* ont utilisé deux unités Leica Viva GS10 connectées à une antenne Leica Viva AS10 via un splitter quatre ports. Les observations avec multitra-

jets ont utilisé une antenne GNSS Leica Viva GS16. Les observations sous canopée ont utilisé un récepteur Leica Viva GS10 et une antenne Leica Viva AS10. Le test RTK Galileo seul a utilisé deux récepteurs Leica Viva GS10 et deux antennes *choke-ring* AR25.

Contacts

Xiaoguang LUO - Ingénieur produits GNSS au sein du groupe GNSS Product Management à Leica Geosystems. Il a obtenu sa thèse en géodésie et géoinformatique à l'institut de technologie de Karlsruhe.

Jue CHEN - Ingénieur algorithmes GNSS du groupe GNSS Research and Development à Leica Geosystems. Elle a obtenu son Master en géomatique à l'université de Stuttgart.

Bernhard RICHTER - Directeur Business GNSS à Leica Geosystems. Il a obtenu son Master en géodésie à l'université technique de Vienne et son MBA à l'université de Gloucestershire.

François FUND - Responsable infrastructure et support technique du réseau et des services Orphéon à Geodata Diffusion. Il a obtenu sa thèse en géodésie à l'université de Nantes.

contact@geodata-diffusion.fr

ABSTRACT

Since last September 7th 2017, all reference stations, infrastructure and software that process Orpheon corrections operated by Geodata Diffusion provide "Full GNSS" products (GPS + GLONASS + Galileo + BeiDou).

To benefit of Orpheon network modernization, it is important to understand advantages of Galileo and BeiDou signals for NRTK (Near Real Time Kinematic) positioning. Through representative case studies, considering baseline length, multipath impact and tree canopy, the results confirm usability of the current Galileo constellation in high-precision NRTK applications and show improved availability, accuracy, reliability and time-to-fix in difficult measuring environments. During the deployment of the Galileo system, more benefits can be expected in the near future.

Le CNIG et les références géodésiques

■ Françoise DUQUENNE

Après la phase de rédaction d'un rapport sur la révision du décret n°2006-272 du 3 mars 2006, un groupe de travail¹ est constitué au sein de la commission GEOPOS du CNIG pour accompagner la mise en œuvre des nouveaux textes de loi qui en seront issus. Ce groupe de travail est présidé par Ludovic André (Métropole Nice Côte d'Azur / AITF). Son objectif est d'accompagner techniquement les juristes et les utilisateurs pour son application.

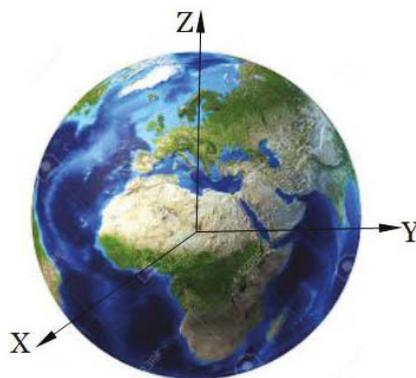
On rappelle ici que la révision du décret 2006 était devenue indispensable, d'une part pour légaliser les références géodésiques aux Antilles, qui attendent depuis 2009, et d'autre part pour rendre les textes de loi français compatibles avec la directive européenne "INSPIRE". À l'occasion le périmètre d'application du décret a été revu. Le décret est actuellement en court d'écriture et devrait paraître avant la fin 2018 ; en attendant l'utilisateur pourra consulter le rapport avec les propositions du CNIG sur le site web (<http://cnig.gouv.fr/>).

Parmi les mesures d'accompagnement, il a été décidé de rédiger des documents pédagogiques sur les références géodésiques, et l'Association française de topographie, qui participe à ce groupe de travail, a décidé de publier ces textes dans les colonnes de sa revue XYZ.

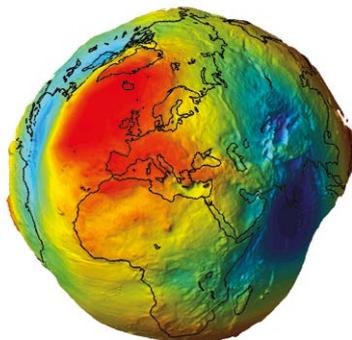
Pour introduire les différents articles rappelons ici ce qu'on appelle références géodésiques. On parle plus couramment de géo-référencement ou de géo-localisation, et cela signifie que l'on positionne un objet, une personne, un mobile par rapport à la Terre.

¹ GT MOD : Groupe de travail pour la mise en œuvre du décret

Il s'agit essentiellement d'attribuer des coordonnées, et avant toute chose il faut définir les référentiels dans lesquels on exprime les coordonnées, afin de pouvoir mélanger des données venant de différentes sources avec des précisions de positionnement diverses.



Pour commencer il faut définir un repère cartésien tridimensionnel, c'est ce qu'on appelle un système de référence terrestre (ou système géodésique). Les coordonnées associées sont les coordonnées cartésiennes géocentriques (XYZ) qui sont exprimées en mètres.



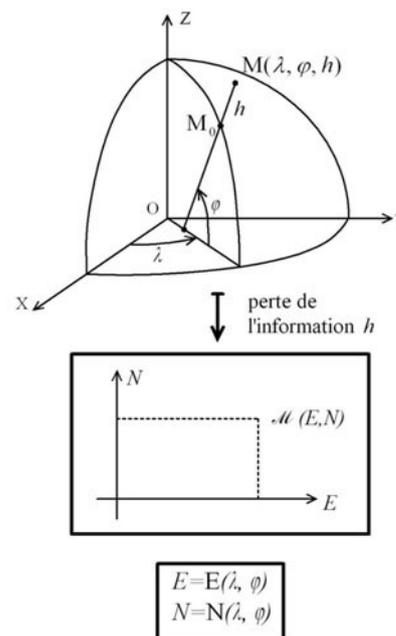
Le relief de la Terre est très variable, plus de 8 000 mètres dans l'Himalaya, et -12 000 mètres dans la fosse des Mariannes. Si on débarrasse la Terre de ses reliefs on obtient le géoïde qui est une surface irrégulière moins variable (± 100 m), aplatie aux pôles.

En première approche, le géoïde (et donc la Terre simplifiée) est modélisé

mathématiquement par un ellipsoïde de révolution. Les coordonnées géographiques (longitude, latitude) localisent un point sur l'ellipsoïde.

Ensuite, que ce soit sur une carte ou sur l'écran de l'ordinateur, on représente l'ellipsoïde sur un plan et on utilise des coordonnées planes ou cartésiennes bidimensionnelles (E,N).

Ces représentations planes (ou projections) ont un type et des paramètres spécifiques selon le lieu d'application.



Enfin, à ces coordonnées que l'on peut qualifier de géométriques, on doit rajouter une coordonnée unidimensionnelle plutôt physique qui est l'altitude. L'altitude (H) est la hauteur au-dessus du géoïde et est donnée dans un système de référence verticale (SRV) qui est en général régional.

Pour plusieurs raisons, historiques, techniques ou autres, qui seront explicitées dans les articles qui suivront, il y a plusieurs systèmes, ellipsoïdes, projections, modèles de géoïdes.

Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations

Cas des territoires français

■ Française DUQUENNE

La Terre est un objet en mouvement dans l'espace, dont la forme est complexe et la surface mobile. L'objectif des géodésiens a été de tout temps de définir des "systèmes de référence" permettant d'exprimer des coordonnées. D'abord dans l'antiquité avec Eratosthène et son image de Terre sphérique, sur laquelle on se positionne par astronomie, puis par Picard, Bouguer, Clairault, Newton, Delambre, Méchain, Cassini qui représentent la Terre par un ellipsoïde et ajoutent à l'astronomie la triangulation (mesures d'angles et distances entre points sur Terre) pour déterminer des positions sur Terre. Enfin la géodésie spatiale permet depuis les années 70 de déterminer des coordonnées dans un repère cartésien à trois dimensions.

■ MOTS-CLÉS

Système de référence terrestre, réalisation, ITRS, ETRS89, RGF93, RGF93, RGP, EPN, IGS, GNSS, coordonnées

- des mouvements périodiques comme les marées terrestres (<30 cm), les surcharges océaniques (<10 cm), atmosphériques, etc.

Certains de ces mouvements peuvent être modélisés et les mesures géodésiques jouent un rôle important dans ces modélisations.

La réalisation d'un tel système n'est pas unique et dépend de la façon de définir son origine, son orientation et son échelle.

Qu'est-ce qu'un Système de référence terrestre (SRT) ?

C'est un repère affine euclidien tridimensionnel OXYZ défini par :

- O est proche du centre des masses de la Terre
- OZ est proche de l'axe de rotation de la Terre
- le plan XOY, perpendiculaire à OZ est le plan de l'équateur
- le plan XOZ est le plan méridien origine

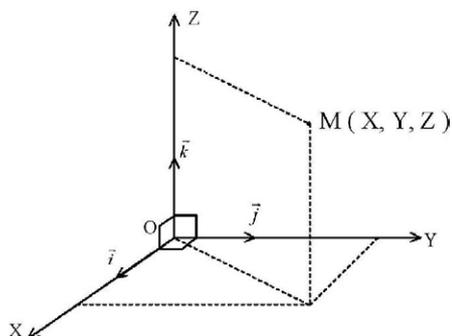


Figure 1. Système de référence terrestre

Cette définition est plus compliquée qu'il n'y paraît pour les raisons suivantes :

- L'axe instantané de rotation de la Terre n'est pas fixe par rapport à la Terre, les pôles se déplacent de plusieurs

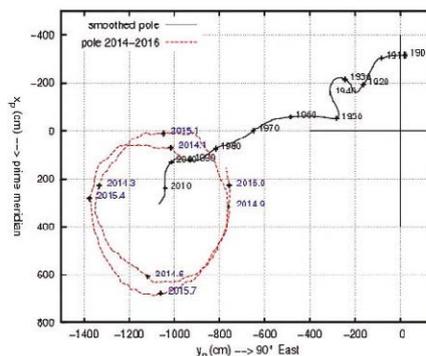


Figure 2. La polhodie (Observatoire de Paris)

mètres par an ; on doit donc choisir un axe des pôles conventionnel.

- Le centre des masses se déplace aussi, du fait en particulier des variations de masses dans l'atmosphère et les océans (phénomène de la mousson, phénomène El Niño, etc.)
- Ce sont des mesures faites sur l'écorce terrestre qui vont permettre de positionner ce repère par rapport à la Terre, or l'écorce terrestre subit divers mouvements :

- des mouvements globaux comme la tectonique des plaques (<10 cm/an) ou le rebond post-glaciaire (qq mm/an),
- des mouvements locaux comme les séismes, glissements de terrains, pompages de nappes phréatiques ou hydrocarbures,

Les coordonnées cartésiennes tridimensionnelles géocentriques

Une position dans un tel repère est donnée par un triplet de coordonnées cartésiennes tridimensionnelles géocentriques XYZ à un instant donné complété éventuellement par un modèle de déplacement. L'unité des coordonnées XYZ est une unité linéaire, généralement le mètre.

Ce type de coordonnées est principalement utilisé pour les calculs en géodésie spatiale et particulièrement pour le positionnement GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU...)

Les coordonnées géographiques géodésiques

En général, on associe à un SRT un ellipsoïde de révolution et des coordonnées géographiques géodésiques de telle sorte que :

L'ellipsoïde est centré sur l'origine du SRT, son demi-grand axe (a) est dans le plan de l'équateur, son demi-petit axe (b) selon l'axe OZ.



L'ellipsoïde de révolution est entièrement défini par deux paramètres (a, b), (a, f), (a, e), etc. avec :

$$\text{l'aplatissement : } f = \frac{a-b}{a}$$

$$\text{l'excentricité : } e = \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Le méridien du point M est le plan qui contient l'axe OZ et la normale à l'ellipsoïde contenant M.

Il existe de nombreux ellipsoïdes dont les dimensions peuvent diverger de plusieurs centaines de mètres, mais les plus répandus actuellement sont le GRS80 et le WGS 84 dont les dimensions sont identiques à mieux que le millimètre.

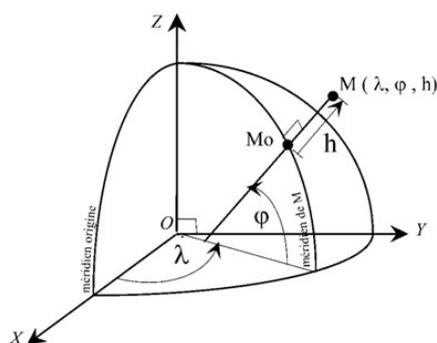


Figure 3. Les coordonnées géographiques géodésiques

Les coordonnées géographiques géodésiques :

λ : la longitude est l'angle entre le plan méridien origine (XOZ) et le plan méridien du point.

φ : la latitude est l'angle entre la normale à l'ellipsoïde et le plan de l'équateur (XOY).

h : la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde est la distance entre M et l'ellipsoïde comptée sur la normale.

La longitude et la latitude sont des angles et diverses unités angulaires sont utilisées (radians, degrés décimaux, degrés sexagésimaux, heures, grades, etc.). L'unité pour h est une unité linéaire en général le mètre.

La relation entre les coordonnées cartésiennes et les coordonnées géographiques est :

$$X = (v + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$Y = (v + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$Z = (v(1 - e^2) + h) \sin \varphi$$

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

Ces coordonnées sont couramment utilisées pour le positionnement, mais aussi pour la cartographie où elles sont transformées en coordonnées planes par une représentation plane de l'ellipsoïde.

Réalisation d'un SRT ou repère de référence terrestre (RRT)

Un SRT est défini par un ensemble d'informations (hypothèses, modèles, constantes, algorithmes) qui permettent de faire une réalisation numérique à partir de mesures.

La réalisation d'un SRT s'opère par des mesures à la surface de la terre, des traitements qui permettront d'attribuer des coordonnées à des points géodésiques matérialisés au sol, ou à un point particulier d'instrument pour des stations permanentes (ex. : ARP : *Antenna Reference Point*).

Selon les méthodes d'observations employées, leurs précisions, la répartition des points et les modèles physiques introduits dans les traitements on obtiendra des coordonnées différentes, donc des réalisations différentes et par conséquent une position différente du repère cartésien par rapport à la Terre.

Avant l'ère spatiale les techniques utilisées étaient l'astronomie de position qui seule permettait une position absolue sur Terre et des mesures d'angles et de distances entre des points proches à la surface de la Terre (triangulation, polygonation, cheminements, etc.). Ces techniques ont permis de placer le centre du repère à des distances de plusieurs centaines de mètres du centre des masses et ils sont dits quasi-géocentriques. Les systèmes de références étaient définis au niveau d'un pays ou d'un continent car les mesures ne permettaient pas de traverser les océans. Les coordonnées obtenues sont bidimensionnelles en général longitude, latitude, et les ellipsoïdes utilisés sont nombreux, de dimensions qui diffèrent de la centaine de mètres, définis pour s'adapter au mieux à la zone terrestre d'application.

Les mesures de géodésie spatiale se font entre des points à la surface de la Terre et un objet dans l'espace (satellites, lune, quasar...). Ce sont des

mesures sur des ondes électromagnétiques, mesure de temps, de délai, de phase, de Doppler, etc.

Les traitements permettent d'attribuer des coordonnées tridimensionnelles XYZ et l'origine du repère est très proche du centre des masses de la terre (de quelques cm à quelques mm).

Le RRT peut s'appliquer à la Terre entière et l'ellipsoïde est global.

C'est en utilisant les coordonnées de ces points géodésiques dans le RRT que l'utilisateur peut lui-même se positionner, soit en allant stationner ces points, soit en utilisant des stations GNSS permanentes. En se positionnant par GNSS, il peut aussi se positionner via les éphémérides des satellites GNSS dans le RRT dans lequel sont exprimées ces éphémérides.

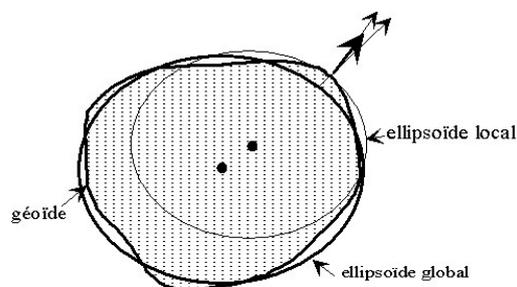


Figure 4. Placement de l'ellipsoïde dans les réalisations pre- et post-géodésie spatiale [9]

Remarque : les appellations "Système géodésique" ou "Datum" sont fréquemment utilisées sans différencier le SRT du RRT.

■ Changement de RRT

Pour amener le repère RRT1 en coïncidence avec le repère RRT2 il faut effectuer une similitude dans l'espace, c'est-à-dire :

- une translation de l'origine
- une homothétie K car l'échelle du SRT dépend de la reproduction du mètre par les techniques de mesures

$$K = \frac{\|\vec{r}_2\|}{\|\vec{r}_1\|} = 1 + D \text{ avec } |D| \cong 10^{-6}$$

- une rotation dans l'espace composée de trois rotations autour des axes $\mathcal{E}_X, \mathcal{E}_Y, \mathcal{E}_Z$ petits angles de rotation ($< 10^{-5}$ radians).

On calcule les coordonnées d'un point dans le RRT_2 à partir de ses coordonnées dans RRT_1 par (1)



$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR2} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + KR_{XYZ} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} \quad (1)$$

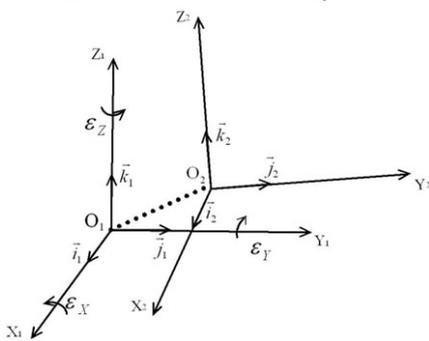


Figure 5. Changement de RRT

R_{XYZ} : matrice de rotation dans l'espace, produit de trois rotations autour des axes OX , OY , OZ

$$R_{XYZ} = R_{OZ} \times R_{OY} \times R_{OX}$$

$$R_{OZ} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_Z & 0 \\ -\sin \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{OY} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_Y & 0 & -\sin \varepsilon_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon_Y & 0 & \cos \varepsilon_Y \end{pmatrix}$$

$$R_{OX} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_X & \sin \varepsilon_X \\ 0 & -\sin \varepsilon_X & \cos \varepsilon_X \end{pmatrix}$$

Les angles ε sont petits et en développant au premier ordre

$$\cos \varepsilon = 1 + o^2$$

$$\sin \varepsilon = \varepsilon + o^3$$

En négligeant les termes du second ordre la matrice R_{XYZ} devient alors :

$$R_{XYZ} = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_Z & 0 \\ -\varepsilon_Z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\varepsilon_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \varepsilon_Y & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \varepsilon_X \\ 0 & \varepsilon_X & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1 \end{pmatrix} + o^2$$

En reportant dans (1) et développant au premier ordre en négligeant les termes $\varepsilon_i D$ (de l'ordre de 10^{-11}) on obtient :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR2} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} \\ + \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1} + o^2 \quad (2)$$

Remarque : il arrive que dans le cas de traitement de systèmes de référence anciens, les paramètres de rotation et d'échelle étant importants, cette relation ne soit suffisante et qu'un développement à l'ordre supérieur soit nécessaire (cas pour l'île de la Réunion).

En géodésie on a plutôt l'habitude d'utiliser les rotations dans l'autre sens $R_i = -\varepsilon_i$, il faut toujours vérifier dans les logiciels quelle convention de signe est utilisée. Dans la suite on utilisera les notations suivantes :

$$X_{RR1} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{RR1}$$

$$T = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix}$$

$$R = R_{XYZ} - I \\ = \begin{pmatrix} 0 & -R_Z & R_Y \\ R_Z & 0 & -R_X \\ -R_Y & R_X & 0 \end{pmatrix}$$

L'équation de changement de coordonnées s'écrit alors :

$$X_{RR2} = X_{RR1} + T + DX_{RR1} + RX_{RR1} \quad (3)$$

L'ITRS (International Terrestrial Reference System)

L'ITRS est système de référence international de référence terrestre recommandé par l'IERS (*International Earth Rotation Service*).

Il est défini comme suit :

- son origine est le centre des masses de la Terre incluant atmosphère et océans,
- son orientation conventionnelle est celle définie par celle du repère du Bureau international de l'heure (BTS84) et une évolution temporelle guidée par une condition de non-rotation de la croûte terrestre,
- son échelle est définie par le mètre SI.

Il existe plusieurs réalisations de l'ITRS et nous évoquerons dans la suite surtout celles de l'IERS, recommandées par l'UGGI (Union géodésique et géophysique Internationale) et l'ONU (GGIM).

ITRF (International Terrestrial Reference Frame)

Les ITRF sont les réalisations de l'ITRS. Les différentes réalisations ITRF sont basées sur un réseau de stations d'observations de différentes techniques spatiales de géodésie.

Les différentes techniques spatiales permettent de générer des jeux de coordonnées dans des systèmes terrestres proches et on réalise le système de référence terrestre en combinant ces jeux de coordonnées.

Les techniques spatiales qui sont utilisées pour ces réalisations sont :

La VLBI : Very Long Base Interferometry

Le principe de mesure est la détermination de la différence des temps d'arrivée à deux radiotélescopes éloignés du front d'onde d'un signal aléatoire provenant d'une même source extragalactique (quasar).

$$B \cdot S = C \tau$$

$$B = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}$$

S : vecteur coordonnées du quasar, exprimé dans le système terrestre

C : vitesse de la lumière

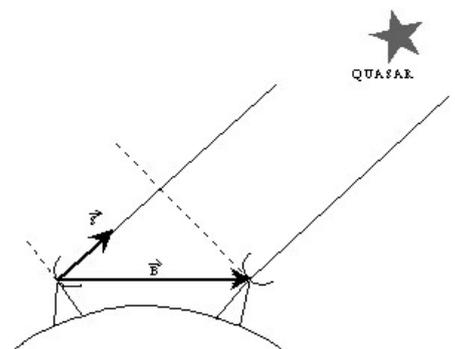
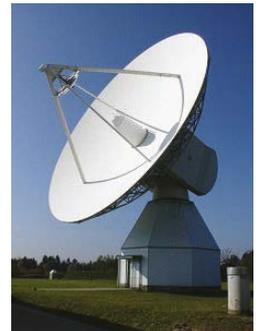


Figure 6. Principe du VLBI et Antenne de WETZELL

La télémétrie laser sur satellites ou sur la Lune

Mesure de distance par tir laser sur la Lune ou sur satellite en mesurant le temps aller et retour.

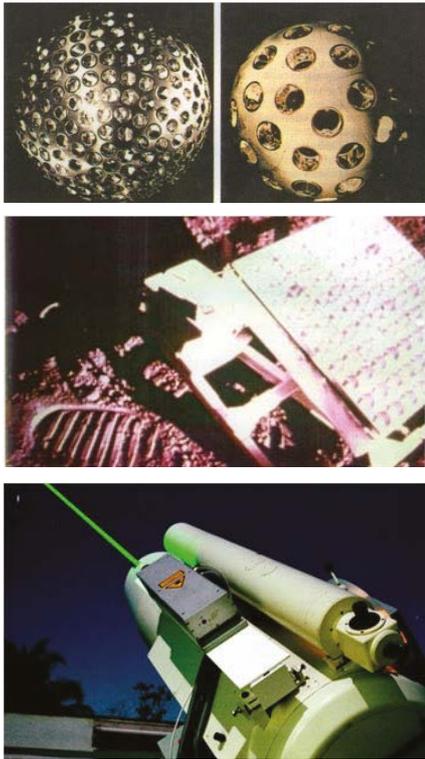


Figure 7. Satellites Lageos et Stella, réflecteur sur la lune, tir au Laser

■ Les GNSS (Global Navigation Satellite System)

Mesure de distance entre un récepteur au sol et un émetteur dans le satellite par différence de phase entre l'émission et la réception du signal.

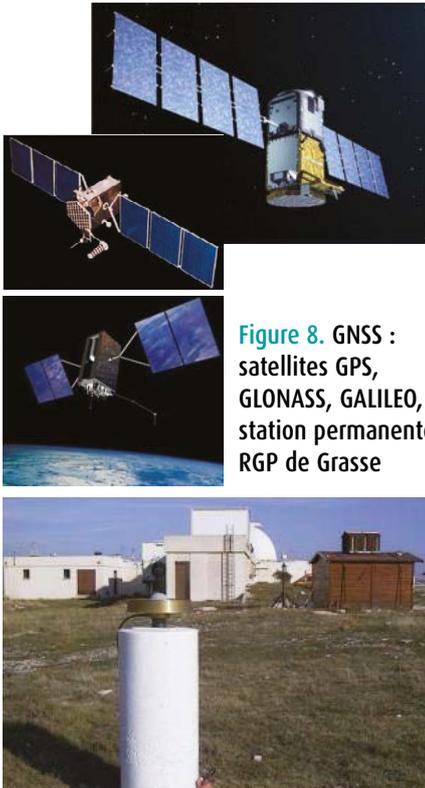


Figure 8. GNSS : satellites GPS, GLONASS, GALILEO, station permanente RGP de Grasse

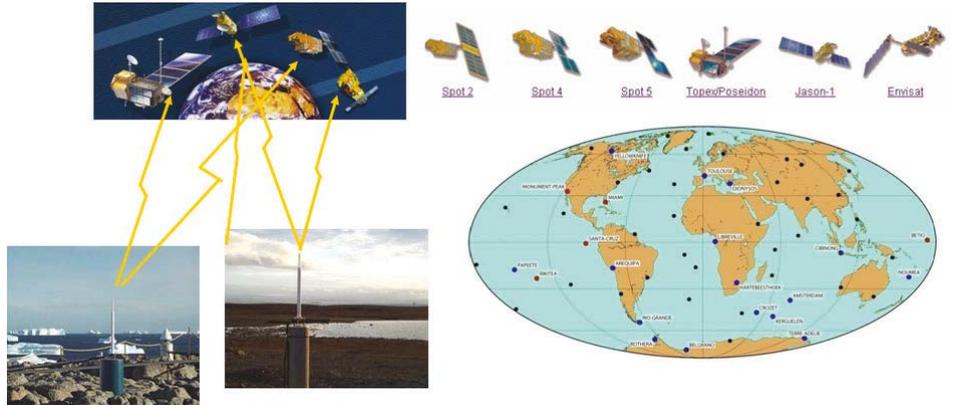


Figure 9. Balises, réseau DORIS

■ DORIS : Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés sur Satellite)

Des balises au sol émettent des signaux, des mesures Doppler sont faites par des récepteurs embarqués dans différents satellites.

Les réalisations ITRF du système terrestre ITRS sont basées sur un réseau de stations, pour lesquelles on dispose de jeux de coordonnées issues de traitements d'observations sur plusieurs années avec les techniques vues précédemment. Sur certains sites plusieurs techniques sont utilisées, on dit qu'il y a colocalisation, et les différents instruments de mesures sont rattachés les uns aux autres par métrologie. La combinaison de ces jeux de coordonnées permet d'obtenir un jeu de coordonnées qui constitue la réalisation.

La combinaison tient compte du fait que les différentes techniques sont plus ou moins efficaces pour déterminer les paramètres, par exemple le SLR est

plus efficace pour déterminer le centre des masses, le VLBI pour l'échelle. Les stratégies choisies pour chaque réalisation sont précisées sur http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/.

En 2017, 13 réalisations sont déjà publiées : ITRF88, ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014. L'année qui figure dans le nom de la réalisation signifie que toutes les observations jusqu'à l'année précisée ont été prises en compte dans les calculs. Les réalisations sont de plus en plus précises, car elles intègrent de plus en plus de stations, le nombre d'observations augmente et les traitements sont de plus en plus performants. Elles ne diffèrent entre elles que de quelques centimètres et les plus récentes que de quelques millimètres.

Du fait la tectonique des plaques, tout point de l'écorce terrestre et donc les points du réseau sont en mouvement

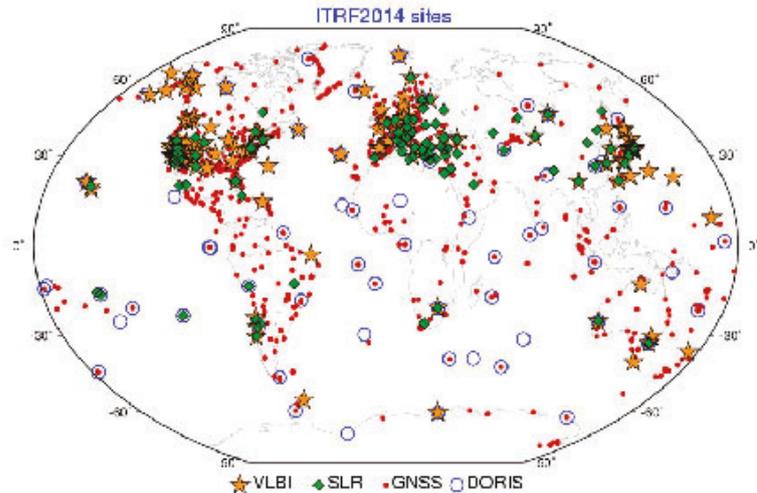


Figure 10. Réseau de l'ITRF2014 ([1]Z.Altamimi)

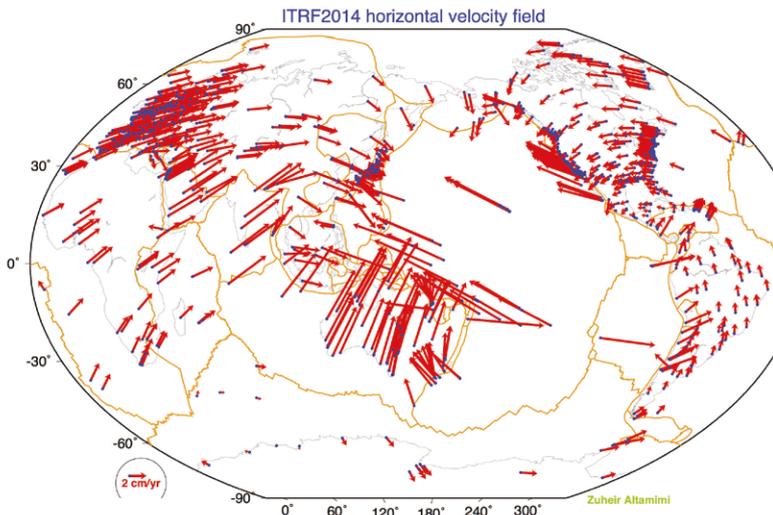


Figure 11. Les vitesses des stations dans l'ITRF2014 ([1] ALTAMIMI Z.)

dans l'ITRF. Quand on donne les coordonnées d'un point dans un ITRF il faut donc toujours préciser la date, c'est ce qu'on appelle l'époque, qui s'exprime par l'année et le jour comme la partie décimale de l'année : 2017.06 pour le 20 janvier 2017. On dira par exemple qu'un jeu de coordonnées est exprimé dans l'ITRF2014, époque 2017.06.

Pour chaque réalisation, les coordonnées et les vitesses des sites sont publiées dans un format texte (SSC) et pour une exploitation scientifique.

On peut ainsi calculer les coordonnées d'un site ITRF à n'importe quelle époque. On remarque dans le *tableau 1* que la variation des coordonnées est de quelques centimètres par an.

Dans le *tableau 1* les vitesses des stations sont constantes, mais à partir de ITRF2014 pour les stations de référence ayant des discontinuités de position liées à des tremblements de terre le déplacement linéaire est complété par des corrections de "post seismic deformation" qui sont fournis

ITRF2014 station positions AT EPOCH 2010.0 and velocities GNSS stations					
DOMES NB.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz
-----m/m/y-----					
10001S006	Paris	GNSS OPMT	4202777.3053	171368.0862	4778660.2517
10001S006			-.01305	0.01758	0.01031
10002M006	Grasse (OCA)	GNSS GRAS	4581690.8306	556114.9301	4389360.8511
10002M006			-.01377	0.01887	0.01142

Tableau 1. Extrait de http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014_GNSS.SSC.txt

Transformation parameters from ITRF2014 to past ITRFs.								
SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS---->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2008	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.6	1.0	-2.3	0.92	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.3	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	0.7	1.2	-26.1	2.12	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.1	0.1	-1.9	0.11	0.00	0.00	0.00	

Tableau 2. Extrait de http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt

sur : http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014-soln-gnss.snx .

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t_0) + \dot{\mathbf{X}}(t - t_0) + \mathbf{X}_{PSD}(t)$$

On voit dans le *tableau 2* que les paramètres de transformation d'un ITRF vers tous les autres sont fournis à une époque donnée ainsi que leurs variations dans le temps.

Pour changer de réalisation il faut tenir compte de la dépendance au temps des paramètres de transformations et écrire la différentielle de l'équation (3) par rapport au temps.

$$\dot{\mathbf{X}}_{RRT_2} = \dot{\mathbf{X}}_{RRT_1} + \dot{\mathbf{T}} + \dot{D}\mathbf{X}_{RRT_1} + D\dot{\mathbf{X}}_{RRT_1} + \dot{R}\mathbf{X}_{RRT_1} + R\dot{\mathbf{X}}_{RRT_1}$$

$\dot{\mathbf{T}}, \dot{D}, \dot{R}$ variations dans le temps des paramètres \mathbf{T}, D, R

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{pmatrix}$$

$$\|\dot{\mathbf{X}}\| < 10 \text{ cm/an}$$

Donc les termes $D\dot{\mathbf{X}}$ et $R\dot{\mathbf{X}}$ sont négligeables

L'équation se réduit alors à :

$$\dot{\mathbf{X}}_{RRT_2} = \dot{\mathbf{X}}_{RRT_1} + \dot{\mathbf{T}} + \dot{D}\mathbf{X}_{RRT_1} + \dot{R}\mathbf{X}_{RRT_1} \quad (4)$$

Dans les *tableaux 1 et 2* les coordonnées des stations et les paramètres de transformation dans l'ITRF2014 sont données à l'époque t_0 . On calcule donc leurs valeurs à l'instant t par :

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t_0) + \dot{\mathbf{X}}(t - t_0)$$

et pour chaque paramètre P de la transformation

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t_0) + \dot{\mathbf{P}}(t - t_0)$$

À chaque réalisation ITRF correspond un modèle de déplacements horizontaux des plaques tectoniques et on peut calculer la vitesse d'un point sur une plaque :

$$\dot{\mathbf{X}} = \boldsymbol{\Omega}_p \wedge \mathbf{X} + \dot{\mathbf{T}}$$

$$\boldsymbol{\Omega}_p = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

$\boldsymbol{\Omega}_p$: vecteur vitesse de rotation de la plaque, dont la direction est l'axe des pôles de rotation de la plaque, passant par le centre de la Terre et le module la vitesse angulaire.

$\dot{\mathbf{T}}$: biais d'origine (ORB)

Pour la réalisation 2014 le modèle est publié dans [2] (<https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>).

Évidemment ce modèle ne tient pas compte de la vitesse du point sur la plaque. Il n'y a pas de modèle de déplacements verticaux.

Comment obtenir des coordonnées dans ITRF par les techniques GNSS

■ Positionnement absolu en temps réel

Ce positionnement est le mode naturel du système GPS utilisé pour la navigation. Le repère dans lequel le point est positionné est le WGS84, dont les éphémérides sont radiodiffusées en temps réel par les signaux des satellites GPS. Il existe plusieurs réalisations du WGS84 (G730, G873, G1150...) et les plus récentes sont à quelques centimètres de l'ITRF. Il n'existe pas de transformation entre les WGS84 et les ITRF.

Ce type de positionnement étant peu précis ($\sigma > 1$ mètre) on peut considérer que le point est positionné dans n'importe quel ITRF à l'époque des observations.

En outre on peut remarquer que lorsqu'une position est donnée en WGS84 on précise rarement la réalisation et l'époque.

■ Positionnement ponctuel précis (PPP)

Ce positionnement précis est basé sur les mesures de codes et de phases. En post-traitement les éphémérides utilisées et corrections d'horloge sont précises comme par exemple celles de l'*International GNSS Service* (IGS) (éphémérides ultra-rapides, rapides ou finales qui sont les plus précises). Les éphémérides précises sont exprimées dans la réalisation ITRF la plus récente. La position obtenue est de précision centimétrique et est exprimée alors dans cette réalisation à l'époque des observations. Certains logiciels de calculs en PPP, qu'ils soient ou pas en ligne, intègrent un module de calcul qui permet de changer de réalisation ITRF et d'époque.

Le PPP temps réel, utilise des corrections d'horloges et d'orbites diffusées en temps réel par différents services (IGS, EPN, STARFIX, PPP-WIZARD...). Ces corrections sont prédites donc moins précises, et données dans un système de référence terrestre qui n'est pas toujours clairement précisé, cependant en général il s'agit de la réalisation ITRF la plus récente. (voir BOSSER P.[5])



Figure 12. Réseau de l'IGS

■ Positionnement différentiel à l'aide des stations permanentes GNSS de l'IGS

Il s'agit d'enregistrer des observations précises par mesures de phases dont la durée dépend de la distance aux stations IGS (International GNSS service) les plus proches. Les coordonnées de ces stations sont données dans les fichiers SINEX, sous la forme coordonnées et vitesses à l'époque t_0 .

Le réseau IGS comprend plus de stations que celles retenues pour l'ITRF et les coordonnées et vitesses de ces stations GNSS sont calculées et publiées en continu sur le site de l'IGS, ce sont les solutions cumulées de l'IGS alignées sur l'IGS14. L'IGS14 est extrait de l'ITRF2014 restreint aux stations GNSS et corrigé des centres de phase.

Pour un calcul précis les coordonnées des stations IGS sont calculées à l'instant des observations et les éphémérides précises de l'IGS sont utilisées.

La position obtenue peut être millimétrique selon les modes d'observations et de calculs (cf [4]) et est exprimée dans le même ITRF que les coordonnées des stations permanentes à l'époque des observations. Certains logiciels de calculs proposent de ramener dans l'ITRF et à l'époque souhaitée car ils utilisent le modèle de mouvement des plaques, compatible avec l'ITRF.

Les réalisations régionales

Ces réalisations régionales sont basées sur l'ITRF, mais définies de

telle sorte que l'on obtienne des coordonnées qui ne varient quasiment pas dans le temps. Elles suivent la plaque tectonique dans son mouvement.

L'ETRS89

Ce système de référence terrestre européen a été défini par le groupe EUREF (*European Reference frame*) de l'*International Association of Geodesy*. Par définition l'ETRS89 coïncide avec l'ITRS à l'époque 1989,0 et il suit la plaque tectonique Eurasie dans son mouvement.

Le réseau GNSS permanent EPN est une densification du réseau IGS sur l'Europe.

Il existe plusieurs réalisations ETRF, correspondant aux différentes réalisations de l'ITRF. L'ETRF2000 est actuellement la plus utilisée.



Figure 13. Réseau GNSS permanent EPN (Euref Permanent Network)

CLASS_A EPN STATION POSITIONS AND VELOCITIES
 REFERENCE FRAME: ETRF2000 AT EPOCH OF 2010.0
 CUMULATIVE SOLUTION OF GPSWEEKS [0834 - 1950]
 RELEASE NAME: EPN_A_ETRF2000_C1950
 RELEASED ON 19/12/2017 BY EPN REFERENCE FRAME COORDINATOR
 (Juliette LEGRAND, ROB, BELGIUM)

DOMES NB.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz.
CLASS		-----m/m/Y--			
10002M006	GRAS	GPS GRAS	4581691.159	556114.578	4389360.563
10002M006		-.0005	-.0002	-.0005	

Tableau 3. Coordonnées et vitesses de stations du réseau permanent EPN (Euref Permanent Network) dans la réalisation ETRF2000 de l'ETRS89 ftp://epncb.oma.be/epncb/station/coord/EPN/EPN_A_ETRF2000.SSC (extrait) http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php



Dans le *tableau 3* on voit que les vitesses des stations dans ETRF2000 sont inférieures à 1 mm/an et que les coordonnées ETRF2000(R14) diffèrent à l'époque 2010 de celles de l'ITRF2014 à la même époque de plusieurs dizaines de centimètres.

Un outil en ligne de transformation entre ITRF et ETRF est disponible sur le site WEB de l'EPN: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/. En limite de la plaque Eurasie, dans des zones actives géophysiquement, ou dans le nord de l'Europe avec le rebond post-glaciaire, les vitesses de points ne sont plus négligeables.

Le RGF93

Le RGF93 est la réalisation de l'ETRS89 sur la France continentale et la Corse. La première réalisation du RGF93 a été faite par campagne d'observations GPS sur plus de mille points géodésiques matérialisés (RBF : réseau de base français). Les 23 points du RRF (réseau de référence français) ont servi à la réalisation de l'ETRS89.

En 1998 les premières stations du réseau permanent RGP ont commencé à être installées. Elles ont alors été rattachées aux points du RBF pour leur attribuer des coordonnées RGF93 nouvelles. En 2009, un recalcul de toutes les observations du RGP a été mené, dans le cadre du recalcul de l'ETRF. Les coordonnées ETRF2000, époque 2009,0, ont été attribuées aux stations RGP et les coordonnées du RBF ont été recalculées dans le RGF93

([12]Harmel.A.(2010)). Les points du RBF ont été réobservés plusieurs fois depuis. La vitesse des points dans le RGF93 est nulle.

Il y a plusieurs possibilités pour l'utilisateur d'accéder au RGF93 :

– en utilisant le réseau GNSS permanent :

le réseau RGP contient actuellement plus de 400 stations permanentes. Les coordonnées des stations en RGF93 figurent dans les fichiers d'observation RINEX, ce qui permet d'avoir directement dans le calcul de lignes de bases les coordonnées RGF93 du point.

Ce rattachement à la référence nationale peut être millimétrique, à condition que les méthodes d'observations et de calculs GNSS soient appropriées (voir [4]).

- En utilisant certains réseaux GNSS permanents temps réel comme par exemple le réseau TERIA, l'utilisateur obtient des coordonnées directement dans le RGF93 avec une précision centimétrique.
- En stationnant les points du RBF, l'utilisateur peut accéder au RGF93 avec une précision centimétrique.
- Par positionnement PPP en temps réel ou différé avec une précision qui dépend de la précision du calcul PPP mais aussi de la transformation utilisée entre l'ITRF et le RGF93.

Les réalisations outremer

Des réalisations équivalentes au RGF ont été faites par campagnes de mesures GNSS sur un réseau de points géodésiques matérialisés et rattachés aux stations de l'IGS les plus proches. Chacune de ces réalisations a été fixée à une réalisation ITRF à une époque donnée proche des observations. Il n'y a pas actuellement de réalisations par observations de réseau permanent car les stations permanentes sur ces territoires ne sont pas encore assez

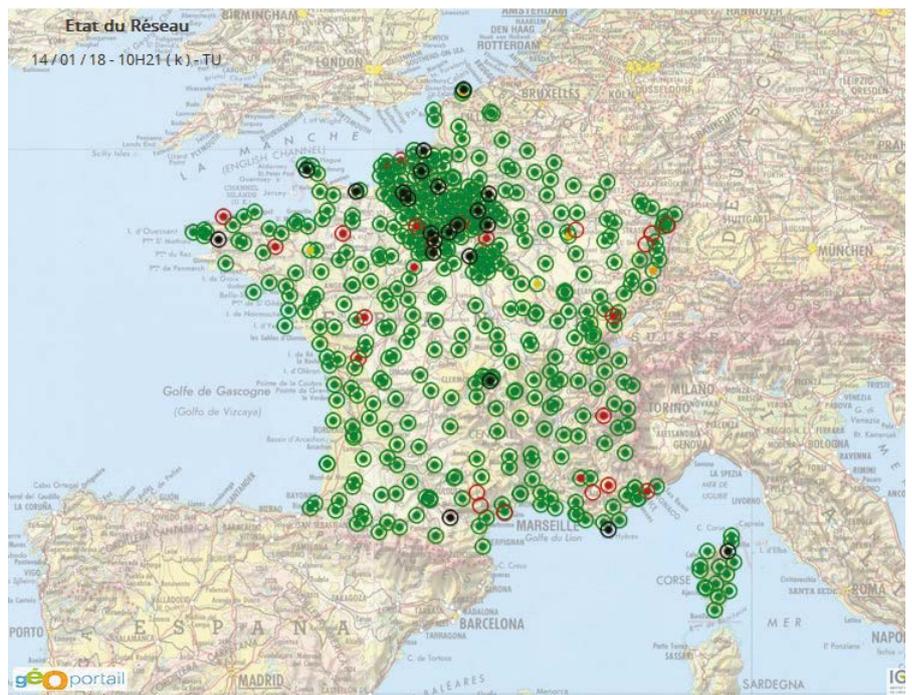


Figure 14. Réseau GNSS permanent RGP (<http://rgp.ign.fr/>)



nombreuses. On peut le regretter car contrairement à la France Métropolitaine, ces territoires ont une tectonique régionale souvent mal connue.

Exemple : pour les Antilles la réalisation RGAF09 est issue d'une campagne d'observation GPS sur un réseau de points géodésiques matérialisés, rattachés à l'IGS avec des stations proches. Les coordonnées ont été fixées à celles de l'IGS05 (l'ITRF2005), époque 2009,0. Le détail de chaque réalisation en outremer est disponible sur <http://geodesie.ign.fr/index.php?p=61&page=documentation>

Ces réalisations sont accessibles grâce à quelques stations permanentes et aussi par les réseaux de points géodésiques matérialisés.

Un calcul GNSS en ligne sur le site de l'IGN (http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul_online.php) permet de faire les calculs précis dans tous ces territoires [15].

Pour une détermination PPP, comme les coordonnées obtenues sont en ITRF à l'époque des observations pour obtenir des coordonnées dans le système national légal il faut pratiquer un changement de TRF en tenant compte du mouvement de la plaque tectonique.

Une version en ligne du logiciel CIRCE V5 de l'IGN permettra bientôt de faire des changements de réalisations et d'époques pour obtenir des coordonnées dans les références nationales Françaises (voir [13]).

Dans l'optique de déterminations très précises (PPP statique), si le point stationné a un mouvement connu sur la plaque il faut prendre en compte sa vitesse.

Quelques exemples numériques

Pour illustrer ce qui vient d'être exposé on s'intéresse à la station GNSS de Grasse (GRAS) qui appartient aux réseaux RGP, EPN, IGS et ITRF.

Le but du *tableau 4* est d'illustrer les changements de réalisations avec ou sans changement d'époque.

La vitesse de la station de GRAS dans l'ITRF et dans l'ETRF est connue, car il s'agit d'une station permanente, pour un point nouveau ces vitesses sont

n°	SRT	Epoque	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	ITRF2014	2010.0	4581690,831	556114,930	4389360,851
2	ETRF2014	2010.0	4581691,115	556114,608	4389360,563
3	ETRF2000	2010.0	4581691,159	556114,578	4389360,562
4	ETRF2000	2009.0	4581691,159	556114,578	4389360,563
5	ETRF2000	2009.0	4581691,159	556114,578	4389360,563
6	RGF93		4581691,159	556114,576	4389360,566

Le jeu n°1 est celui de la réalisation ITRF2014 donné dans *tableau 1*

Le jeu n°2 est obtenu par transformation du jeu n°1 avec coord_trans l'outil de transformation de coordonnées de l'EPN (http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/).

Le jeu n°3 est obtenu par transformation (coord_trans) du jeu n°1

Le jeu n°4 est obtenu par transformation du jeu n°3 et la vitesse du point donné dans le *tableau 3* (coord_trans)

Le jeu n°5 est obtenu par transformation du jeu n°1 et la vitesse du point donné dans le *tableau 1* (ccord_trans)

Le jeu n°6 est le jeu de coordonnées de la réalisation officielle du RGF93

L'écart entre les jeux n°1 et n°2 est de 54 cm, et correspond au mouvement de la plaque tectonique Eurasie entre 1989,0 et 2010,0. L'écart entre les jeux n°3 et n°4 est de 1 mm et correspond au mouvement du point dans l'ETRF.

Les jeux n°4 et n°5 bien que calculés différemment sont identiques.

L'écart entre les jeux n°4 et n°6 est de 3,6 mm et correspond à la différence entre la réalisation ETRF2014 et la réalisation RGF93

Tableau 4. Coordonnées d'un point dans plusieurs réalisations et diverses époques

n°	SRT	Epoque	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	ITRF2014	2018.02	4581690,713	556115,087	4389360,964
2	ETRF2000	2009.0	4581691,154	556114,583	4389360,589
3	ETRF2000	2009.0	4581691,149	556114,583	4389360,583

Le jeu n°1 est obtenu par un calcul PPP des observations sur un jour de la station Grasse avec le calcul en ligne CSRS_PPP de NRCAN (<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp>). La précision donnée par le calcul est à 95 % : nord : 0,003 m, est : 0,006 m, hauteur : 0,013 m)

Le jeu n°2 est obtenu par transformation de ITRF2014 époque 2018,02 et ETRF2000 époque 2009,0 avec coord_trans. La vitesse utilisée est celle de *tableau 1*. On constate un écart de 2,5 cm avec les coordonnées RGF93 officielles.

Le jeu n°3 est obtenu par calcul avec le modèle de plaque tectoniques ITRF2014 (A.Harmel ahgeodev.fr). L'écart avec les coordonnées RGF93 officielles est 2,1 cm.

Tableau 5. Exemple avec une détermination PPP(NRCAN)

n°	SRT	Epoque	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	IGS08 (ITRF2008)	2018.02	4581690,719	556115,086	4389360,962
2	ITRF2014	2018.02	4581690,716	556115,084	4389360,959
3	ETRF2000	2009.0	4581691,158	556114,583	4389360,582
4	RGF93		4581691,149	556114,581	4389360,577
5	ETRS89	2018.02	458 1691,151	556114,578	4389360,574

Le jeu n°1 est obtenu par un calcul ligne de base des observations sur un jour de la station Grasse avec le calcul en ligne de l'IGN (http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul_online.php). La précision donnée par le calcul est à 95 % : nord : 0,008 m, est : 0,009 m, hauteur : 0,016 m).

Le jeu n°2 est obtenu à partir du jeu n°1 et changement de réalisation avec coord-trans

Le jeu n°3 est obtenue par transformations de ITRF2014 époque 2018,02 et ETRF2000 époque 2009,0 avec coord_trans. La vitesse utilisée est celle de *tableau 1*. On constate un écart de 1,7 cm avec les coordonnées RGF93 officielles.

Le jeu n°4 : coordonnées RGF93 en sortie du calcul en ligne IGN. L'écart avec les coordonnées RGF93 officielles est 1,6 cm.

Le jeu n°5 : coordonnées ETRS89 (sans précision de la réalisation ETRF) donnée par le calcul en ligne IGN et à l'époque des observations. L'écart entre les jeux n°4 et 5 est 4 mm. Si on compare le jeu n°1 du *tableau 5* et n°2 du *tableau n°6*, on voit que les deux calculs du même jeu de donnée d'observations par les deux méthodes différentes sont compatibles à 6 mm près.

Tableau 6. Calcul GNSS ligne de base (IGN)



inconnues. Dans le *tableau 4* on est parti des coordonnées publiées dans la réalisation de l'ITRF2014. Dans les *tableaux 5 et 6* les coordonnées de GRAS sont considérées inconnues et on utilise 24 heures observations du 09/01/2018 pour les déterminer soit en PPP (*tableau 5*) soit par calcul lignes de base (différentiel) (*tableau 6*).

Conclusion

Les techniques de positionnement GNSS sont de plus en plus précises et il devient incontournable pour l'utilisateur de comprendre, dans quel système de référence terrestre on obtient les coordonnées après traitement.

Les concepts de système de référence terrestre et leurs réalisations sont difficiles à comprendre, mais il faut rassurer ici les utilisateurs qui manipulent des données dont le géoréférencement a une précision moindre que le mètre, ils ne sont pas concernés et pour eux WG84, ITRF, ETRF, RGF93, n'importe quelle réalisation ou époque c'est du pareil au même. Le conseil à leur donner cependant, c'est de fournir comme métadonnées à leur produit, les références légales, ainsi que la classe de précision pour faciliter la fusion avec des données localisées plus précises.

On a vu dans les exemples précédents que l'utilisateur averti pouvait accéder au niveau centimétrique aux différentes réalisations et époques. Cependant c'est l'utilisation des réseaux permanents qui lui facilite la mise en référence nationale et cela est même devenu transparent avec l'utilisation des réseaux GNSS temps réel.

De plus en plus d'applications utilisent le PPP dont les performances rejoignent maintenant en précision le positionnement par réseau permanent, mais la position obtenue est exprimée dans une des réalisations ITRF généralement à l'époque des observations qu'il est nécessaire de bien identifier, pour ensuite faire les bonnes transformations. L'utilisateur peut utiliser des outils mis à sa disposition et s'il veut développer ses propres outils, outre qu'il est nécessaire qu'il maîtrise tous les concepts, il est prudent de les

comparer à des outils de référence. Actuellement la précision de ces changements de coordonnées est proche du centimètre.

Quand les médias annoncent que maintenant on va pouvoir positionner une voiture au centimètre, on a envie de leur demander quel est le détail de la voiture qui est positionnée aussi précisément et surtout dans quel système de référence est cette position. Mais ceci est une autre histoire ! ●

Contact

Françoise DUQUENNE
Présidente de l'AFT
contact.fduquenne@gmail.com

Références

- [1] ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., METIVIER L., COLLILIEUX X. (2016) "ITRF2014 : a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non linear station motions" Journal of geophysical Research: Solid Earth, volume 121, issue 8, p 6109-6131
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JB013098/full>
- [2] ALTAMIMI Z., METIVIER L., REBISCHUNG P., ROUBY H., COLLILIEUX X. "ITRF2014 plate motion model" Geophysical Journal International, volume 209, Issue 3, 1^{er} juin 2017, pages 1906-1912.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>
- [3] ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., METIVIER L., COLLILIEUX X. "L'ITRF2014 et la modélisation des mouvements non linéaires des stations" Revue XYZ n°153 page 55-57, Décembre 2017.
<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>
- [4] BIROT F., DURAND S., FUND F., LEGROS R., MOREL L., VIGUIER F. "Méthodes GNSS pour la Topographie" numéro spécial XYZ n°138b, p 42, mars 2014
<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>
- [5] BOSSER P. "Evaluation d'une solution de positionnement ponctuel précis temps réel" Revue XYZ n°148, p 33, septembre 2016.
<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>
- [6] BOUCHER C. and al (2017) "Les références de temps et d'espace" BOUCHER C. ed HERMANN
<http://www.aftopo.org/FR/ouvrages-34.html>
- [7] COLLILIEUX X. (2017) "Introduction aux Systèmes de Référence Terrestres" Cours au master Positionnement et mesures de déformation (PPMD), février 2017
- [8] COLLILIEUX X. "Systèmes et repères

de référence terrestre régionaux" cours ingénieur ENSG, décembre 2016.

[9] DUQUENNE F., BOTTON S., PEYRET F., BBETAÏLE D., WILLIS P. "GPS : localisation et navigation par satellites" Hermes-Lavoisier 2005.

[10] DUQUENNE F. et H. "cours de géodésie" CNAM/ESGT(2003) <http://www.aftopo.org/FR/ouvrages-34.html>

[11] FIG commission 5 "Reference frames in practice Manual" FIG publication n°64, mai 2014, téléchargeable sur www.FIG.net

[12] HARMEL A. (2010) "Rénovation du RGF93" revue XYZ n°124, pages 36 à 40, <http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>

[13] HARMEL A "Transformations entre ITRF-application aux références nationales" IGN/SGN, NT/G 162, 9 décembre 2013.

[14] LUZET C. "Evolution du canevas géodésique national" revue XYZ n°69, page 55, décembre 1996

<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>

[15] MATHIS E.R. "Introduction aux calculs en ligne GNSS" revue XYZ n°152, p 22 à 24, septembre 2017

<http://www.aftopo.org/FR/xyz-4.html>

ABSTRACT

What are Terrestrial Reference System and Frame? How were they built yesterday and mostly today? How to convert from one to another? That is the purpose of this paper. International, European and French TRF definitions are explained. Numerical examples give us some ideas of accuracy in conversions. While GNSS positioning is more and more precise, users must know all these concepts to reach a full accuracy.

ERRATUM

Dans le XYZ153 de décembre 2017, le lecteur a pu se familiariser avec "L'ITRF2014 et la modélisation des mouvements non linéaires des stations".

Cependant la première colonne de la page 57 comporte l'équation (1) :

$$X_{PSD}(t) = X(t_0) + \dot{X} \cdot (t - t_0) + X_{PSD}(t) \quad (1)$$

qu'il convient de remplacer par :

$$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + X_{PSD}(t)$$

Ça descend ou ça monte ?

La presse annonce le 14 septembre 2017 : *C'est la nouvelle mesure officielle du Mont-Blanc. Elle a été dévoilée ce jeudi 14 septembre 2017 par un collectif de géomètres-experts. Le toit de l'Europe culmine désormais à 4808,72 mètres. C'est 1 cm de moins que lors de la dernière mesure en 2015.*

Ces phrases nous offrent trois récréations, une typographique, une autre géographique et une suivante statistique. Une dernière question subsidiaire a trait à l'équipement utilisé, voir le visuel. Nous attendons les réponses des lecteurs à info@aftopo.org avec l'objet "Récréation topographique". Correction et annonce des vainqueurs dans le XYZ 134 de mars 2018.

1. Trouver l'erreur typographique qui entache le sommet en question.
2. Trouver l'erreur géographique qui déshonore ce même sommet.
3. Quelle est la probabilité pour que le sommet soit monté (et non descendu de 1 cm) sachant que les précisions optimistes des mesures altimétriques sont estimées chacune à +/- 1 cm à 1 σ (68 % de probabilité) sans erreur systématique ? La même question est posée avec des précisions plus réalistes de +/- 2 cm à 1 σ . Donner les probabilités au % entier.
4. Question subsidiaire : pourquoi la canne porte-antenne n'est-elle pas verticale ?

SOLUTION

1.- Le Mont-Blanc est le massif où se trouve le sommet du mont Blanc. On mesure donc le mont Blanc et non le Mont-Blanc.

2.- Le point culminant de l'Europe est le mont Elbrouz dans le nord du Caucase en Russie, donné pour 5642 m. Le mont Blanc est seulement le toit de l'Europe occidentale.

3.- Il y a une chance sur 3 ou 4 que le mont Blanc soit monté au lieu d'être descendu en un an, suivant la précision des mesures et surtout la définition du sommet. Et voici pourquoi : le mouvement du sommet du mont Blanc est calculé par $d=b-a$ avec a l'altitude de 2015 et b l'altitude de 2017. Si d est positif le sommet est monté, si d est négatif le sommet est descendu. Ici $d=4808.72 - 4808.73 = -0.01$ m, donc le mont Blanc a perdu 1 cm.

3.1.- Précision optimiste des altitudes de +/- 1 cm à 1 σ

L'écart-type de d est $\sigma_d^2 = \sigma_b^2 + \sigma_a^2$

Avec $\sigma_b^2 = \sigma_a^2 = 1^2$.

Soit $\sigma_d^2 = 2$ puis $\sigma_d = 1.414$ cm.

La loi normale de distribution de d est donc centrée sur $\mu = -1$ cm avec un $\sigma = 1.414$ cm

La loi normale réduite (divisée par 1.414) nous donne $\mu = -0.707$ avec un $\sigma = 1$

La probabilité que le sommet monte est donc de 24 % (voir la table de probabilités associées à la loi normale réduite)¹. Dans le cas de précisions optimistes, il y a donc 1 chance sur 4 pour que le mont Blanc soit monté au lieu d'être descendu !

3.2.- Précision réaliste des altitudes de +/- 2 cm à 1 σ

L'écart-type de d est $\sigma_d^2 = \sigma_b^2 + \sigma_a^2$

Avec $\sigma_b^2 = \sigma_a^2 = 2^2$.

Soit $\sigma_d^2 = 8$ puis $\sigma_d = 2.828$ cm.

La loi normale réduite (divisée par 2.828) nous donne $\mu = -0.354$ avec un $\sigma = 1$

La probabilité que le sommet monte est donc de 36 %.

Dans le cas de précisions réalistes, il y a donc 1 chance sur 3 pour que le mont Blanc soit monté au lieu d'être descendu !

4.- La canne peut être tenue oblique car Leica Geosystems a développé une antenne GNSS équipée d'un capteur

inertiel (*Inertial Measurement Unit* ou IMU), conçu spécifiquement pour les applications topographiques. Grâce à des accéléromètres et des gyroscopes intégrés, l'orientation et les mouvements de l'antenne sont connus. La position GNSS du capteur est utilisée pour fournir la référence de position correcte aux informations de mouvements de l'IMU et aussi pour estimer continuellement les erreurs systématiques des mesures de l'IMU. Les mesures des positions IMU et GNSS sont fusionnées et traitées en utilisant un algorithme qui calcule finalement l'inclinaison et la direction d'inclinaison pour obtenir le pied de l'antenne à partir de la position du centre de la phase GNSS et de la hauteur de l'antenne.

5.- Ayant répondu à toutes les questions et malgré un léger dérapage sur la fin de la démonstration statistique le vainqueur est notre adhérent belge Joël Van Cranenbroeck que nous remercions pour sa participation enthousiaste. ●

**Bernard Flacelière
et merci à Manu Clédât
pour les illustrations**

¹ Un exemple de table de probabilité loi normale réduite : <http://www.agro-montpellier.fr/cnam-lr/statnet/tables.htm>

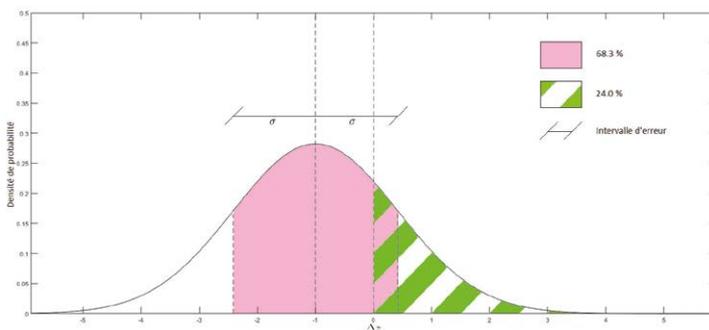


Figure 1. Précision des altitudes de +/- 1 cm à 1 σ

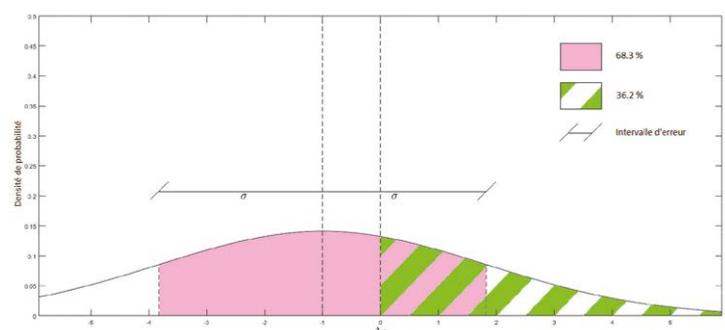


Figure 2. Précision des altitudes de +/- 2 cm à 1 σ

Cartographier le relief sous les forêts, et le substrat sous les déserts de sable : les attentes de la mission radar Biomass

■ Laurent POLIDORI - Thierry KOLECK - Ludovic VILLARD - Mhamad EL HAGE - Philippe PAILLOU - Thuy LE TOAN

La mission spatiale Biomass sera lancée par l'Agence spatiale européenne en 2021 avec un radar à synthèse d'ouverture en bande P dans le but de cartographier la biomasse forestière à l'échelle planétaire, ainsi que la hauteur et les dégradations du couvert forestier.

Plusieurs produits secondaires sont aussi envisagés, notamment la cartographie 3D du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable, qui devraient bénéficier du pouvoir de pénétration des ondes radar en bande P et de l'aptitude de la tomographie à séparer les contributions des différentes couches dans un profil vertical de rétrodiffusion. Ces possibilités ayant été démontrées lors de campagnes aéroportées, la qualité des modèles 3D attendus de la mission Biomass reste à évaluer.

Le relief terrestre est connu avec une précision très hétérogène et parfois très insuffisante pour de nombreuses applications, tant opérationnelles (gestion des territoires) que scientifiques. Dans les années 2000, des missions spatiales d'observation de la terre ont été proposées avec des configurations stéréoscopiques ou interférométriques propices à la production de modèles numériques de terrain sur de grandes étendues. Des bases de données altimétriques quasi planétaires sont ainsi apparues, notamment ASTER-GDEM issue de la restitution photogrammétrique de couples d'images optiques et SRTM issue du traitement interférométrique des données d'un radar à deux antennes. Avec une maille de 30 m pour ASTER-GDEM et de 30 m dégradée à 90 m pour SRTM et des précisions altimétriques de l'ordre du décimètre, ces produits ont connu un large succès pour des applications qui ne nécessitaient pas une précision extrême. Toutefois, en raison même du comportement physique des capteurs

utilisés (imagerie optique et imagerie radar à courte longueur d'onde qui ne voient pas à travers les feuillages), ces produits ne sont pas à proprement parler des MNT (modèles numériques de terrain) mais des MNE (modèles numériques d'élévation contenant notamment les arbres et les bâtiments), ce qui affecte la géomorphométrie et par suite les produits extraits de ce que l'on croit être un MNT, comme le réseau hydrographique. Or, de nombreuses applications ont besoin de l'altitude du sol, comme la modélisation hydrologique des bassins versants de grands fleuves tropicaux, où la forêt engendre une erreur qui peut être comparable ou supérieure aux amplitudes du relief. Dans ces circonstances, le lidar aéroporté est généralement considéré comme la technique la plus efficace pour cartographier le relief à travers la forêt, technique cependant peu adaptée à de très grandes étendues. L'aptitude du radar en bande P (longueur d'onde proche du mètre) à atteindre le sol grâce à la pénétration des ondes à travers le couvert forestier, en font

MOTS-CLÉS

Biomass, produits secondaires, MNT, forêt, désert

également un instrument prometteur pour la cartographie du relief dans les zones densément boisées. Ainsi, le gouvernement brésilien a entrepris une couverture de l'Amazonie grâce à des acquisitions radar aéroportées en bandes X (pour la canopée) et P (pour le relief) (Correia, 2011).

Un autre atout des imageurs radar à grande longueur d'onde est leur sensibilité, dans des conditions favorables, au substrat rocheux lorsqu'il est recouvert de sable ou de glace (McCauley et al., 1982, Elachi et al., 1984).

Jusqu'à maintenant limitée à des acquisitions aéroportées pour des raisons d'allocation de fréquences accordées aux applications civiles, l'imagerie radar en bande P devrait prochainement et pour la première fois voir le jour en orbite dans le cadre de la mission Biomass de l'Agence spatiale européenne, dont le lancement est prévu en 2021. Proposée et conçue dans le but d'estimer la biomasse forestière et notamment celle des forêts denses (impénétrables aux fréquences plus élevées) la mission Biomass devrait également fournir des produits dits secondaires comme la cartographie du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable.

La mission Biomass

Dans le cadre de son programme *Earth Explorer*, l'Agence spatiale européenne (ESA) a retenu en 2009 le choix de la mission spatiale Biomass, destinée à évaluer et cartographier la biomasse forestière au moyen d'un radar à basse fréquence (bande P, fréquence centrale

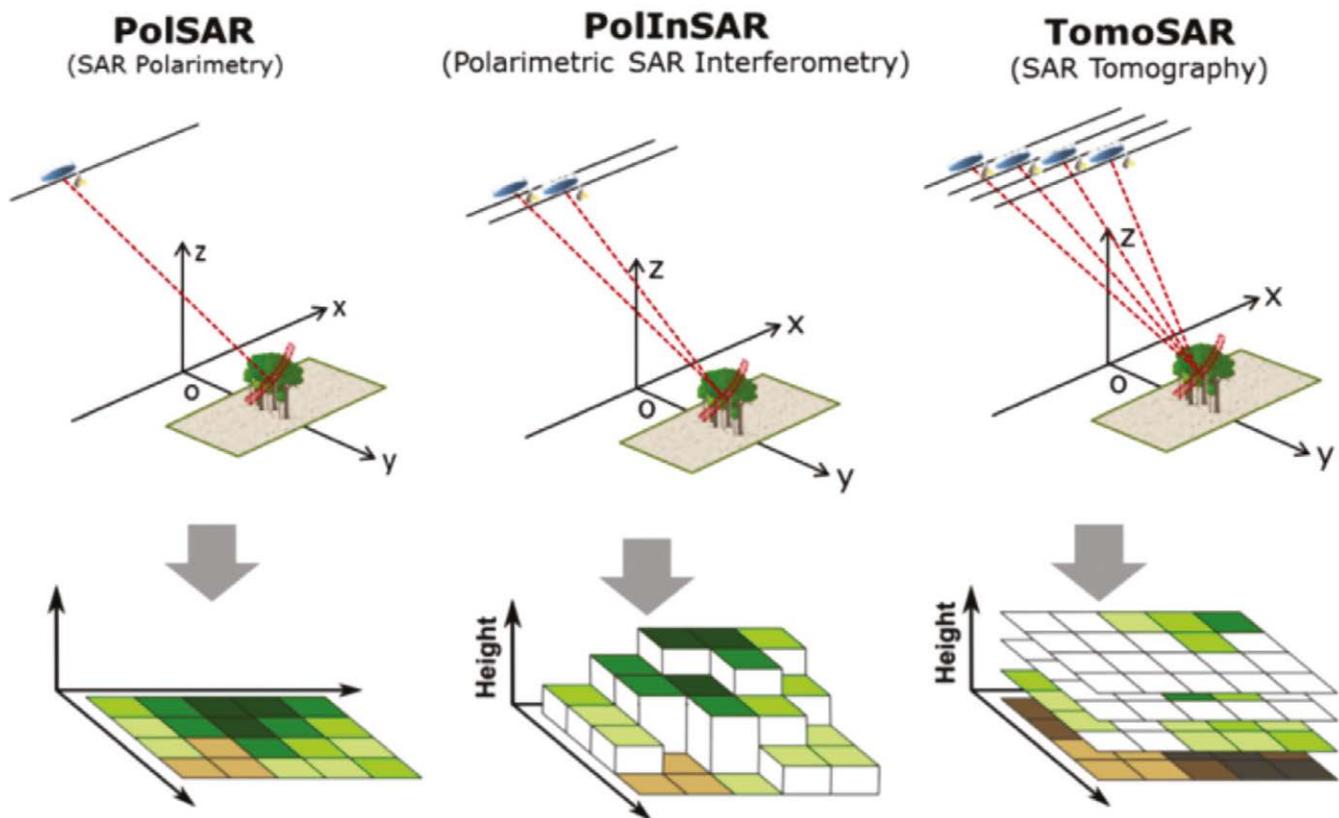


Figure 1. Les trois types d'acquisition SAR de Biomass, avec les techniques PolSAR et PolInSAR prévues pour la phase nominale et la technique TomoSAR pour la phase initiale tomographique (ESA, 2012)

de 435 MHz soit une longueur d'onde de 69 cm). Grâce à un capteur dont la mesure est sensible à la biomasse forestière, cette mission est conçue pour améliorer la connaissance du bilan du carbone terrestre, par une meilleure quantification des puits et sources de carbone des écosystèmes forestiers, afin de mieux comprendre leur rôle dans le changement climatique (Le Toan et al., 2011). L'intérêt du radar à basse fréquence (inférieure à 1 GHz) réside principalement dans la sensibilité du signal rétrodiffusé à la biomasse totale des couverts végétaux, y compris pour les forêts tropicales denses, sensibilité liée aux capacités de pénétration de l'onde radar qui permettent également d'accéder jusqu'à la contribution du sol (Villard et al., 2016).

Rappelons que les capteurs radar utilisés pour l'observation de la Terre émettent dans une direction latérale des impulsions de micro-ondes, dont les échos après réflexion sur la surface terrestre font l'objet d'un traitement appelé synthèse d'ouverture (ou traitement SAR de synthetic aperture radar)

pour produire des images. Chaque pixel contient une mesure de la puissance du signal rétrodiffusé, qui est pratiquement insensible aux conditions météorologiques mais potentiellement très sensible aux caractéristiques de la surface ou du volume observés (eau, sol, végétation...). Cette sensibilité est représentée par des modèles, dont l'inversion peut conduire dans des cas favorables à l'estimation de caractéristiques bio-géophysiques, telles que la rugosité des surfaces, l'humidité des sols ou encore la biomasse de la végétation. De plus, avec les techniques avancées que sont l'interférométrie et la tomographie, l'exploitation des mesures acquises sous des angles de visée légèrement différents permet d'extraire les informations 3D du volume de forêt et de la surface sous-jacente.

La mission Biomass comprend un satellite opérant sur une orbite quasi-polaire, héliosynchrone, à une altitude de 637 à 666 km. L'orbite est définie pour permettre les acquisitions multi-passe pour l'interférométrie et pour minimiser l'impact des perturbations

ionosphériques. Les acquisitions se feront donc à 6 h 00 et 18 h 00, heure locale. La configuration du satellite est contrainte par l'installation dans le lanceur d'une antenne réflecteur de grande dimension, de l'ordre de 12 m de diamètre. Le SAR bande P de Biomass a des capacités polarimétriques et peut fonctionner en interférométrie multi-passe. La largeur de bande n'est que de 6 MHz, une limitation due à l'allocation de fréquence pour la télédétection. Le satellite a une masse d'environ 1 200 kg, et une puissance d'environ 1,5 kW en fin de vie. Le taux de transmission des données est de 110-120 Mbit/s. La mission durera 5 ans et comprend une phase tomographique (de 15 mois), suivie de la phase nominale interférométrique constituée de triplets tous les 219 jours (environ 7 mois) construits à partir d'acquisitions séparées de 3 jours.

Les caractéristiques techniques de Biomass permettent d'envisager trois types d'acquisitions SAR pendant ces différentes phases : le Pol-SAR permettant d'utiliser les intensités polarimétriques (polarisations HH,



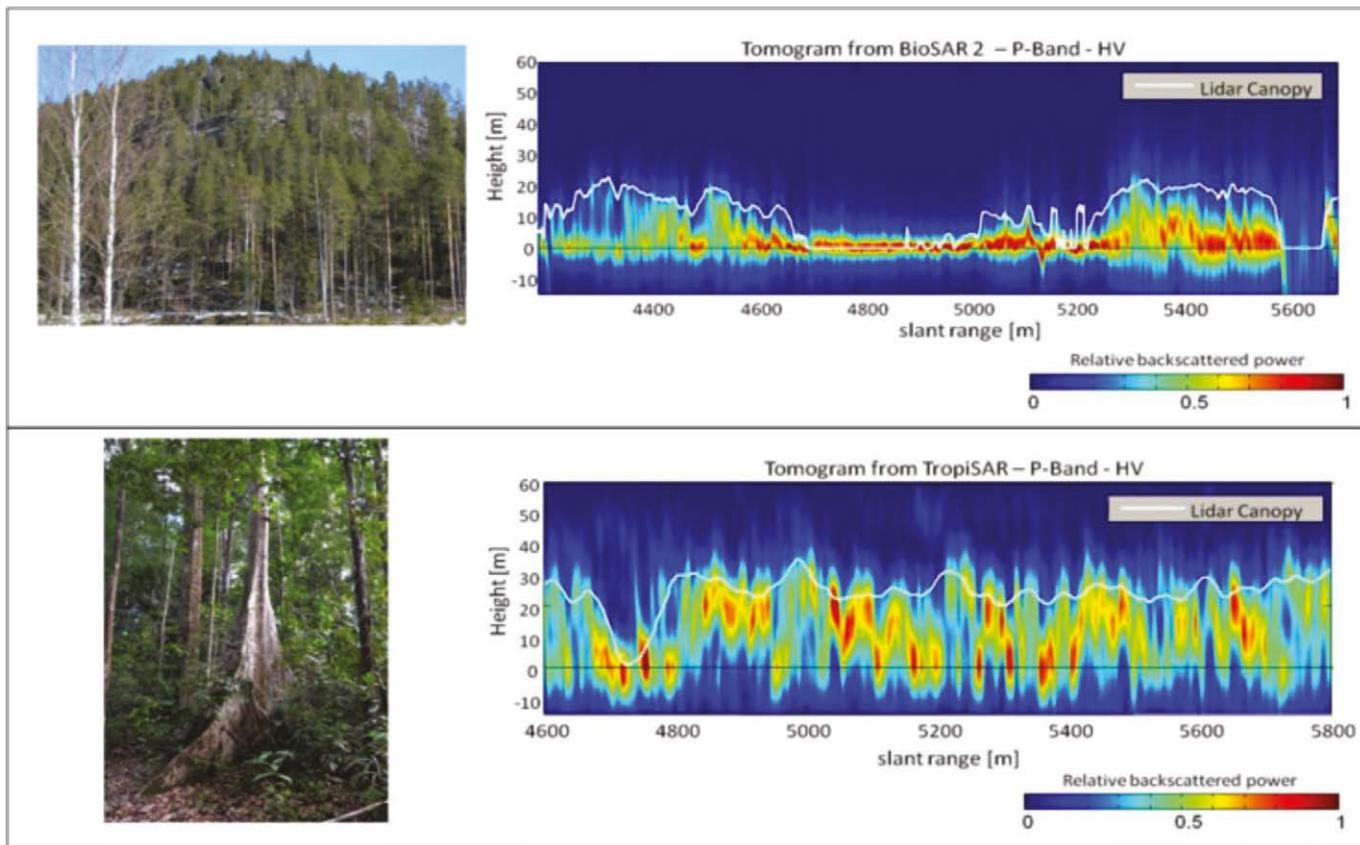


Figure 2. Tomogrammes obtenus en polarisation HV sur deux types de forêts : forêt boréale en Suède (en haut), forêt tropicale en Guyane (en bas). L'intensité dans chaque cas est normalisée de 0 (bleu foncé) à 1 (rouge). Les profils blancs représentent les hauteurs obtenues par un lidar aéroporté (ESA, 2012).



HV, VV) pour estimer la biomasse en chaque pixel, le Pol-InSAR permettant de réaliser de l'interférométrie SAR polarimétrique à partir d'au minimum deux passages sur une même scène pour obtenir également la hauteur des arbres, et la tomographie SAR (TomoSAR) permettant une imagerie verticale du volume de la forêt à partir de plusieurs passages (typiquement 7 pour Biomass). La figure 1 schématise ces trois types d'acquisition.

De nombreuses campagnes aéroportées ont été à l'origine de la conception de la mission, notamment pour démontrer le potentiel du SAR en bande P pour la fourniture des trois produits primaires que sont la biomasse des forêts, la hauteur des arbres et la détection des surfaces déboisées à l'échelle globale. Les campagnes récentes mettant en œuvre les 3 techniques de Biomass illustrées sur la figure 1 sont les campagnes BioSAR en Suède sur la forêt boréale, les campagnes TropiSAR en Guyane et AfriSAR sur le Gabon sur plusieurs sites de forêt tropicale.

Les produits secondaires

Au-delà des trois produits primaires qui visent à quantifier le stock et le flux de carbone liés aux couverts forestiers, la mission Biomass ouvre de nombreuses autres perspectives et permet d'espérer la génération de produits géophysiques inédits : le substrat rocheux à travers le sable ou la glace, le relief et la teneur en eau des sols sous la forêt, ou encore le déplacement des glaciers. On s'intéresse ici à la cartographie du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable.

■ Cartographie du relief sous la forêt

Comme nous l'avons rappelé, l'interférométrie SAR qui exploite la phase de deux échos radar est utilisée depuis plusieurs années pour produire des MNT, par exemple avec SRTM (Farr & Kobrick, 2000). Cependant, lorsque le terrain se trouve sous la couverture forestière, les mesures InSAR ne permettent pas de localiser le niveau

du sol, car la phase interférométrique est située quelque part entre le sol et le sommet de la canopée, selon la densité de la végétation, la polarisation et la fréquence de l'onde radar. Pour lever les ambiguïtés, plusieurs mesures sont nécessaires : c'est le cas des mesures tomographiques pour lesquelles un jeu de plusieurs images interférométriques de la même scène est utilisé pour former des images de réflectivité à plusieurs niveaux de hauteur dans le couvert (Figure 2).

Dans le cas de la forêt boréale, c'est le mécanisme de diffusion du sol qui est dominant, tandis qu'en forêt tropicale, la contribution du volume de la forêt est beaucoup plus importante. Pour l'extraction de la biomasse en forêt tropicale, des solutions visant à minimiser la contribution du sol améliorent fortement les résultats (Minh, 2015). Les mêmes approches, qui consistent à séparer les contributions du sol et du volume végétal, peuvent être utilisées pour produire les MNT sous des couverts forestiers denses.

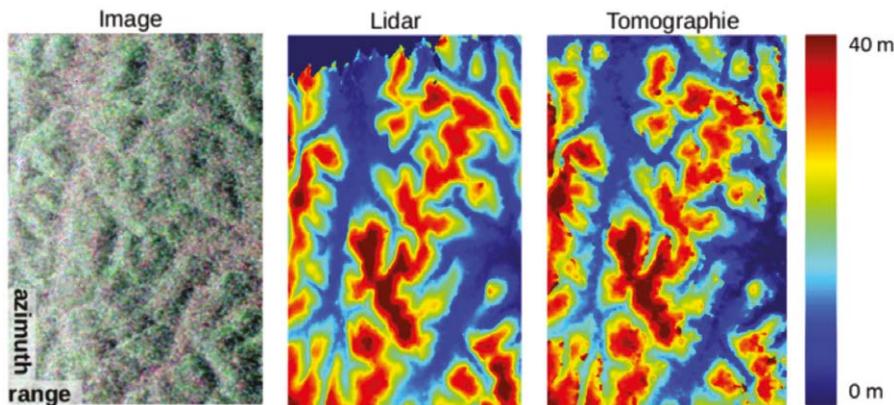


Figure 3. Comparaison d'un MNT obtenu par tomographie radar en bande P avec un MNT lidar sur le site de Paracou (Guyane) dans le cadre de la campagne TropiSAR (Huang et al., 2013). Source : Laurent Ferro-Famil.

Les données consistent en un jeu de N images en bande P, multi-orbites, multi-polarimétriques. Un couvert forestier est composé d'une canopée, qui peut être associée à un milieu volumique diffusant et caractérisée par une densité de réflectivité, et d'un sol sous-jacent dont la réponse est principalement due aux effets de couplage entre sol et végétation (notamment avec le phénomène de double rebond). Différents traitements de tomographie SAR ont été proposés dans la littérature, suivant des objectifs visant principalement à conserver la radiométrie dans la restitution des profils de réflectivité verticale, ou encore à optimiser leur résolution suivant cette dimension. Dans le but de produire un MNT, une approche consiste tout d'abord à dissocier les mécanismes de diffusion de volume et de couplage au travers de techniques de décomposition [par exemple de type SKP pour la matrice de covariance généralisée (Tebaldini, 2009)], puis à utiliser la focalisation tomographique pour localiser en 3D la contribution de ce couplage localisé au sol en configuration monostatique.

Dans le cadre des études préparatoires de la mission Biomass, ces méthodes tomographiques ont été appliquées sur plusieurs sites de forêts boréales et tropicales lors de campagnes aéroportées en Suède (BioSAR), en Guyane (TropiSAR) et au Gabon (AfriSAR). Si la précision des résultats obtenus pour la reconstitution du MNT s'avère du même ordre de grandeur qu'avec le lidar aéroporté, les performances en configuration spatiale restent à évaluer, notamment en raison de la bande de fréquence réduite à 6 MHz impliquant une résolution spatiale dégradée et une moindre robustesse au phénomène de décalage spectral, mais aussi en raison des perturbations liées à la ionosphère ou à la décorrélation temporelle (Hamadi, 2017) due à la configuration multi-passe. Toutefois, on sait d'ores et déjà que le MNT issu de la mission Biomass sera le premier MNT quasi global à être très peu affecté par la hauteur du couvert végétal. Cette potentialité, déjà mise en évidence dans le cadre de campagnes expérimentales aéroportées (figure 3), est d'une importance majeure pour les études basées

sur la géomorphométrie des zones fortement boisées.

■ Cartographie du substrat en zone aride

Le SAR orbital permet également, pour les zones désertiques arides, d'imager des structures du sous-sol situées à quelques mètres de profondeur. Cette capacité a été mise en évidence pour la première fois par le capteur de la mission radar SIR-A dans le désert égyptien (McCauley et al., 1982). En revanche, aucun modèle d'élévation n'a encore été créé pour le sous-sol dans les zones désertiques, à l'exception du MNT SRTM généré en utilisant des images SAR bande C ayant une pénétration d'environ 0,5 m (Ghoneim et al., 2007)

La figure 4 illustre le principe de la détection du substrat : une couche de sédiments secs (sable) recouvre un ancien réseau hydrographique incisant la roche de sub-surface. Alors qu'une image optique ne visualise que les sédiments de surface (SPOT à gauche), l'onde radar pénètre la couche superficielle et est rétrodiffusée par la roche (PALSAR au centre). Les anciens chenaux étant trop profonds, ils ne produisent pas de rétrodiffusion et apparaissent sombres par contraste avec la surface rocheuse environnante (schéma à droite).

A partir d'une couverture globale du Sahara en bande L, réalisée grâce au satellite japonais ALOS-PALSAR en 2007, il a ainsi été possible de cartographier des anciens réseaux hydrographiques, notamment un ancien fleuve, caché sous quelques mètres de dépôts éoliens, qui entaillait les grès de l'est de la Libye sur plus d'un millier de kilomètres (Paillou et al., 2009). Cet ancien

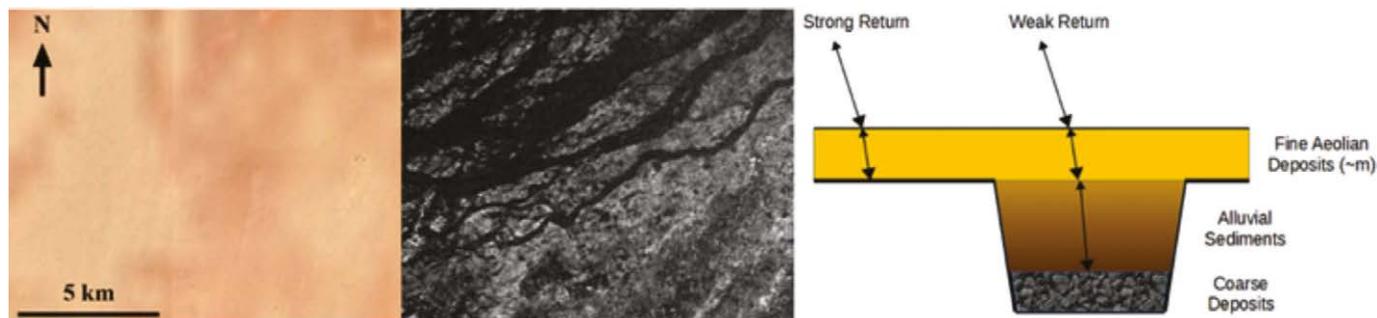


Figure 4. Images SPOT et radar bande L ainsi qu'une illustration du principe de détection du substrat dans l'image radar

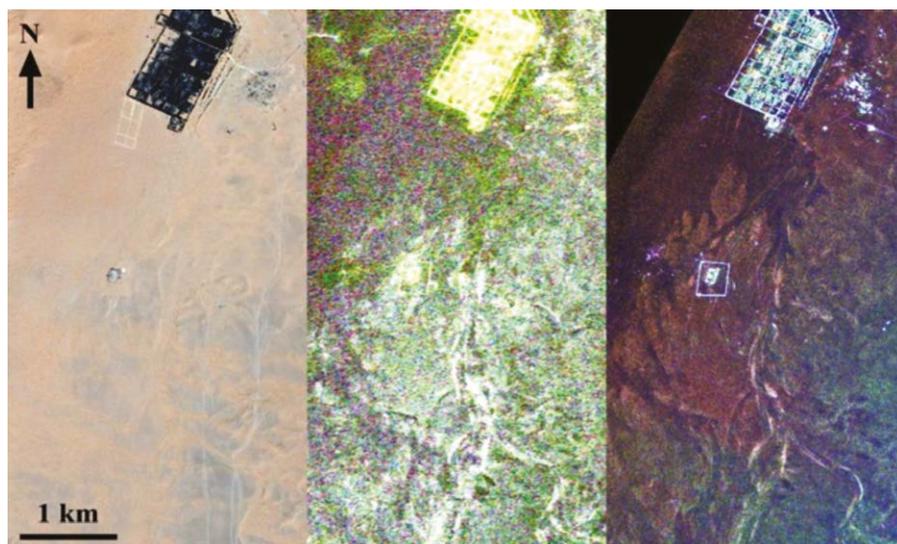


Figure 5. Images SPOT (à gauche), ALOS-2 (radar en bande L, au centre) et SETHI (radar en bande P, à droite) de la région de l'oasis de Ksar Ghilane (Tunisie)

► système était constitué par la réunification de trois affluents : un issu du flanc est du massif du Tibesti, l'autre venant du massif de l'Uweinat, et le dernier provenant du massif du Gilf Kebir. Les trois affluents traversaient le bassin de l'oasis de Kufrah dans le sud-est de la Libye, pour se rejoindre à hauteur de l'oasis en un lit unique, se dirigeant ensuite vers la côte méditerranéenne. Avant d'atteindre la mer Méditerranée, l'ancien fleuve s'élargit en un vaste delta qui se situe au beau milieu des grandes dunes de sable du désert libyque : c'est là certainement la source de cette énorme quantité de sable qui couvre de vastes étendues en Libye et en Egypte. Cet ancien fleuve est également la source d'importantes réserves d'eaux fossiles, qui sont exploitées par la Libye. Des quantités d'eau importantes sont pompées dans la région de l'oasis de Kufrah, pour ensuite être amenées sur la côte via un pipeline géant.

Alors que la bande L permet une profondeur d'auscultation de 1 à 2 mètres, on peut prédire que l'utilisation de la bande P de la mission Biomass devrait permettre d'atteindre des structures situées entre 5 et 10 mètres sous la surface. Des expérimentations aéroportées, réalisées en Tunisie en 2010 à l'aide du radar SETHI de l'ONERA, ont permis de montrer qualitativement qu'une fréquence plus basse est mieux adaptée à l'imagerie de la géologie du substrat (Paillou et al., 2011). La figure 5 montre une comparaison entre une

image SPOT (à gauche), ALOS-2 en bande L (au centre) et SETHI en bande P (à droite) de la région de l'oasis de Ksar Ghilane en Tunisie : la bande P met très nettement en évidence des structures hydrographiques cachées sous le sable, alors que la bande L est perturbée par la rétrodiffusion dans la couche de surface. L'utilisation des données polarimétriques, interférométriques et tomographiques de Biomass, combinée à une pénétration importante de la bande P dans le sol des zones désertiques, devrait permettre non seulement d'imager des structures du sous-sol, mais également de séparer les rétrodiffusions de la surface de sable et du substrat, pour générer un modèle tridimensionnel des couches géologiques des 10 premiers mètres du sous-sol.

Toutes les applications qui exploitent des MNT sur des terrains plus favorables devraient ainsi trouver sous les déserts une information précieuse notamment la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et en particulier la prospection des eaux souterraines et l'archéologie. Certaines de ces applications peuvent trouver dans des modèles 3D du substrat des descripteurs de terrain comme la pente, le réseau de drainage ou les fractures (Robinson et al., 2007). Ainsi les zones à infiltration élevée, où les eaux souterraines sont les plus susceptibles d'être situées, sont des zones à faible pente et ayant une densité de drainage et de

fracture élevée. Ces caractéristiques peuvent être recherchées dans un MNT en complément des approches bidimensionnelles, soit par une extraction automatique, soit par un ombrage du modèle 3D du substrat, sous réserve que la qualité de ce modèle (qui dépendra de l'épaisseur de la couche de sable) soit compatible avec une telle exploitation.

Perspectives

Comme nous l'avons exposé, les produits secondaires de la mission Biomass s'annoncent particulièrement prometteurs pour la cartographie du relief sous les forêts et du substrat sous les déserts de sable. Les possibilités offertes par les données Biomass sont donc particulièrement intéressantes pour de tels produits et pour les applications scientifiques ou opérationnelles associées. En attendant le lancement du satellite prévu en 2021, des travaux de recherche sont en cours pour le développement et la validation des méthodes de cartographie. Les enjeux sont multiples. Il s'agit d'une part d'ajuster les conditions d'acquisition et de traitement pour optimiser la détection du sol et donc minimiser l'incertitude sur l'altitude mesurée, et d'autre part, d'évaluer le réalisme du produit obtenu en termes de respect des formes. Ces deux aspects, de natures physique et géomorphologique respectivement, sont essentiels dans l'évaluation de la qualité que l'on peut attendre des produits topographiques issus de la mission Biomass.

Dans les deux cas, le fait que l'on s'intéresse à des surfaces cachées rend plus difficile l'évaluation. Ces deux problèmes correspondent à deux types de validation des MNT, que l'on peut appeler validation externe et validation interne (Polidori, 1995). La validation externe, ainsi appelée parce qu'elle utilise des données de référence, peut utiliser par exemple des positions GPS relevées dans des clairières pour évaluer le MNT sous forêt, ou les mesures d'un géoradar pour évaluer le modèle 3D du substrat sous une couche de sable. Compte tenu de la difficulté de collecte des données topographiques de contrôle dans les



zones couvertes par la végétation et le sable, la validation interne prend toute son importance. Il s'agit d'une méthode de contrôle de qualité sans données de référence, qui consiste à vérifier la vraisemblance du MNT selon des critères géomorphologiques (Polidori et al., 2014). Ainsi, la surface topographique sous forêt (contrairement à la canopée) et la surface du substrat en zone aride (contrairement à la surface de sable) sont souvent façonnées par l'eau, ce qui affecte par exemple la distribution des pentes et les propriétés fractales (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). Le calcul de la dimension fractale doit permettre en région désertique de différencier le sol du substrat et de vérifier si le modèle 3D obtenu à travers le sable à partir des données Biomass représente bien le substrat.

Ainsi, les données de la mission Biomass présentent un réel potentiel pour la cartographie du relief sous les forêts, et du substrat sous les déserts de sable, mais la qualité des MNT obtenus reste à évaluer, et du fait qu'il s'agisse de surfaces cachées, cette évaluation constitue un véritable défi. ●

Contacts

Laurent POLIDORI

laurent.polidori@cesbio.cnes.fr

Thierry KOLECK - Ludovic VILLARD

Thuy LE TOAN

CESBIO, Université de Toulouse, CNES/
CNRS/IRD/UPS, Toulouse, France

Mhamad EL HAGE

Laboratoire d'Etudes Géospatiales (LEG),
Faculté de Génie, Université Libanaise,
Tripoli, Liban

Philippe PAILLOU

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux,
Université de Bordeaux, Pessac, France

Références

Correia A. H. (2011) *Metodologias e resultados preliminares do projeto radiografia da Amazônia*. Anais XV° Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil, INPE, p. 8083

Elachi C., Roth L.E. & Schaber G.G. (1984) *Spaceborne radar subsurface imaging in hyperarid regions*. IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing, GE-22:383-388.

ESA (2012) *Report for Mission Selection: Biomass, ESA SP-1324/1 (3 volume series)*, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands.

Farr T.G. & Kobrick M. (2000) *Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data*, Eos, Transactions American Geophysical Union 81(48):583-5.

Ghoneim E., Robinson C. & El-Baz F. (2007) *Radar topography data reveal drainage relics in the eastern Sahara*. International Journal of Remote Sensing, 28(8), pp.1759-1772.

Hamadi A., Villard L., Borderies P., Albinet C., Koleck Th. & Le Toan T. (2017) *Comparative Analysis of Temporal Decorrelation at P-Band and Low L-Band Frequencies Using a Tower-Based Scatterometer Over a Tropical Forest*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 11, pp. 1918-1922.

Huang Y., Ferro-Famil L. & Lardeux C. (2013) *Polarimetric SAR tomography of tropical forests at P-band*, IGARSS 2013.

Le Toan T., Quegan S., Davidson M.W.J., Balzter H., Paillou P., Plummer S., Papathanassiou K., Rocca F., Saatchi S., Shugart H. & Ulander L. (2011) *The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle*. Remote Sensing of Environment, 115 (11), pp. 2850-2860.

McCauley J.F., Schaber G.G., Breed C.S., Grolier M.J., Haynes C.V., Issawi B., Elachi C. & Blom R. (1982) *Subsurface valleys and geoarcheology of the eastern sahara revealed by shuttle radar*, Science, 218(4576):1004-20.

Minh D.H.T., Tebaldini S., Rocca F., Le Toan T., Villard L. & Dubois-Fernandez P. (2015) *Capabilities of BIOMASS Tomography for Investigating Tropical Forests*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.53, no.2, pp.965-975.

Paillou Ph., Schuster M., Tooth S., Farr T., Rosenqvist A., Lopez S. & Malézieux J.M. (2009) *Mapping of a major paleodrainage system in Eastern Libya using orbital imaging Radar: The Kufrah River*, Earth and Planetary Science Letters, vol. 277, pp. 327-333, doi: 10.1016/j.epsl.2008.10.029, 2009.

Paillou Ph., Ruault du Plessis O., Coulombeix C., Dubois-Fernandez P., Bacha S., Sayah N. & Ezzine A. (2011) *The TUNISAR experiment: Flying an airborne P-Band SAR over southern Tunisia to map subsurface geology and soil salinity*, PIERS

2011, Marrakesh, Marocco.

Polidori L. (1995) *Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain*. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol. 139, pp. 10-19.

Polidori L., El Hage M. & Valeriano, M. D. M. (2014) *Digital elevation model validation with no ground control: application to the topodata DEM in Brazil*. Boletim de Ciências Geodésicas, 20(2), 467-479.

Robinson C.A., Werwer A., El-Baz F., El-Shazly M., Fritch T. & Kusky T. (2007). *The Nubian aquifer in southwest Egypt*. Hydrogeology Journal, 15(1), pp.33-45.

Rodriguez-Iturbe I. & Rinaldo A. (1997) *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press, 564 p.

Tebaldini S. (2009) *Algebraic Synthesis of Forest Scenarios From Multibaseline PolInSAR Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(12) : 4132-4142.

Villard L., Le Toan T., Minh D.H.T., Mermoz S. & Bouvet A. (2016) *Chapter 9 - Forest Biomass From Radar Remote Sensing*, In Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest, Ed. Nicolas Baghdadi and Mehrez Zribi, Elsevier, pp. 363-425.

ABSTRACT

The Biomass satellite mission will be launched by the European Space Agency in 2021 with a P-band synthetic aperture radar in order to map worldwide forest biomass, as well as the height and the disturbances of the forest cover. Several secondary products are also foreseen, such as 3D models of the topographic surface under the forests and that of the substratum under sand layers in deserts, taking benefit from the penetration capability of P-band radar waves and the ability of tomography to separate the contributions of different layers in a vertical backscattering profile. After demonstrating these possibilities during airborne campaigns, the quality of the 3D models expected from the Biomass mission remains to be assessed.

Auscultation par GPS d'un barrage en enrochement : modélisation en 3D du comportement du barrage par l'utilisation du logiciel ANSYS

■ Nadia BOUHOUCHE - Bachir GOURINE

La sécurité des barrages en enrochement ne dépend pas seulement d'une conception appropriée et d'une construction adéquate, mais aussi de la surveillance du comportement réel, non seulement pendant la construction et pendant la mise en eau, mais tout au long de l'exploitation de l'ouvrage.

La surveillance à l'aide de l'instrumentation géodésique et géotechnique appropriée, permet d'avoir un système d'avertissement en cas de comportement anormal de ces barrages.

La comparaison des valeurs de déformations calculées lors de la conception avec les déformations mesurées à l'aide des instruments de surveillance permet de valider ou de faire une réévaluation des paramètres utilisés dans les analyses [Szostak-Chrzanowski, 2008].

La modélisation du comportement des barrages en enrochement est un processus complexe dans lequel il faut considérer le comportement non linéaire des matériaux de construction, l'interaction entre le barrage et le sol de fondation et/ou le substratum rocheux, l'influence de la charge hydraulique sur le barrage et sur la fondation et les effets de saturation par l'eau. Le processus de déformation peut être modélisé en employant la méthode des éléments finis (MEF). Parmi les nombreux logiciels basés sur la méthode des éléments finis, ANSYS 15.0 est celui qui rend l'analyse des structures complexes possible avec moins d'erreurs [Varghese, 2014].

Ce travail vise à analyser le comportement des barrages en enrochement à l'aide du logiciel ANSYS, une application a été faite sur le barrage d'Altnkaya en Turquie.

■ MOTS-CLÉS

Barrage, déformation, déplacement, Global Positioning System (GPS), Auscultation, Méthode des éléments finis, ANSYS.

par l'augmentation des contraintes effectives lors de la construction par couches successives de matériau, de terre et aussi par des effets de fluage du matériau.

Les déformations sont influencées par les déformations de la fondation, le transfert de contraintes entre les différentes zones du barrage et les autres facteurs (séismes, glissements de terrain, etc.) [Szostak-Chrzanowski, A et al. 2006].

Rôle de la surveillance des barrages en enrochement

L'une des principales tâches de la surveillance est de chercher essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence de tel ou tel choix technique.

Il existe deux méthodes pour surveiller un barrage :

- La surveillance géotechnique à travers la vérification des paramètres de conception où les paramètres géotechniques sont de la plus haute importance ;
- La surveillance géodésique qui constitue un moyen d'obtention des déplacements planimétriques et altimétriques. [Benmadani & Lemchouchi, 2008].

Auscultation géométrique d'un barrage en enrochement par GPS

Il s'agit des techniques d'observations géodésiques dédiées au suivi du comportement des barrages, qui conduisent à l'évaluation de déplacements temporels absolus d'un

Introduction

Les barrages en enrochement présentent des tassements et subissent des déformations de plusieurs types (affaissement, cisaillement...) ; ils sont soumis aussi à de grandes déformations verticales en raison de leur poids et du réarrangement des blocs d'enrochement. L'étanchéité est souvent assurée par un masque amont et/ ou noyau central ; ces déformations peuvent induire des déformations excessives de l'organe d'étanchéité.

La prévention des tassements s'avère en effet capitale pour assurer l'étanchéité et la stabilité des barrages. L'évaluation des déformations constitue également un enjeu important pour la réhabilitation ou la confortation de ces ouvrages.

■ Sécurité des barrages en enrochement

Les déformations d'un barrage en enrochement commencent souvent pendant la construction, elles sont provoquées

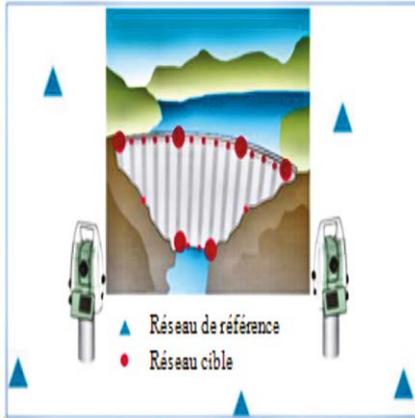


Figure 1. Les principaux réseaux géodésiques d'auscultation d'un barrage [Milev, 2010]

ensemble discret de points construits sur l'ouvrage pour mettre en évidence des mouvements superficiels du barrage et de son voisinage (tendances des déplacements et déformations) par des techniques spatiales de positionnement "GPS" [Kahlouche, 2012].

Si les points de mesure sont situés à l'intérieur du barrage, seuls les déplacements relatifs sont obtenus. En revanche, pour obtenir des indications sur l'évolution des déformations ou dans le cas d'un comportement particulier, des valeurs de déplacements absolus sont requises. A cet

Tableau 1. Informations sur les dates de mesures et le niveau d'eau

Période N°	Dates de mesure		Niveau D'eau
	Début	Fin	
1	21.09.2000	23.09.2000	170.34 m
2	05.06.2001	08.06.2001	167.53 m
3	20.09.2001	22.09.2001	164.20 m

effet, le système propre au barrage (réseau cibles) est complété par un réseau de référence situé dans une zone stable (réseau d'auscultation) auquel il est relié (cf. Figure 1). A ce dernier, un espace de référence étendu stable (réseau de base) est adjoint. Les trois réseaux doivent être rattachés au même système géodésique [Kahlouche, 2012].

■ Situation et données sur le barrage Altinkaya (cas d'étude)

Le barrage d'Altinkaya (cf. figure 2) est le quatrième plus grand barrage en Turquie, avec une capacité de 139 millions m³. C'est un barrage en enrochement à noyau central argileux destiné essentiellement à l'irrigation et à la production de l'énergie électrique. Il est situé sur la rivière Kızılırmak, à 23 km au sud de Bafra et 35 km à l'ouest de Samsun, au nord de la Turquie [Yazan&Öztan, 2011].

■ Réseau géodésique de suivi des déformations du barrage Altinkaya

Le réseau géodésique du barrage Altinkaya est composé de six piliers encadrant la zone du barrage et onze points cibles établis sur la crête du barrage pendant sa construction (cf. figure 3) [Taşçi, 2012].

Avant de commencer les mesures de déformation, tout l'équipement a été calibré.

Afin d'éviter ou de réduire les erreurs d'équipement, les mêmes récepteurs GPS et antennes ont été utilisés sur les mêmes points pendant toutes les périodes.

Les longueurs des lignes de base varient entre 60 m et 2 km dans le réseau de déformation (Figure 3). Les mesures liées au réseau de référence ont été réalisées avec 3 récepteurs GPS. La période d'observation était de 45 minutes avec un taux d'échantillonnage de 10 secondes. Le masque d'élévation du satellite a été sélectionné à 15° afin d'éviter l'effet de multi-trajet.

Les déformations ont été calculées par la méthode statique du GPS deux fois par an pendant une durée de deux ans [Taşçi, 2010]. Les mesures ont nécessité quatre campagnes de mesures ; deux mesures distinctes ont été faites au barrage d'Altinkaya : une entre les points de référence et l'autre sur les points cibles en utilisant 3 récepteurs GPS Ashtech Z et des antennes GPS 700700B_Mar.III_L1 / L2.

Les informations liées à la mesure de déformation du réseau sont données dans le tableau 2. [Gökalp & Taşçi, 2009].

Le réseau d'auscultation du barrage a été traité avec le logiciel GeoGenious 2000 en un ajustement libre. La précision des lignes de base a montré une valeur maximale de 1,2 mm horizontalement et de 3,2 mm verticalement pour les 4 périodes d'observation [Gökalp, Taşçi, 2009].



Figure 2. Barrage d'Altinkaya



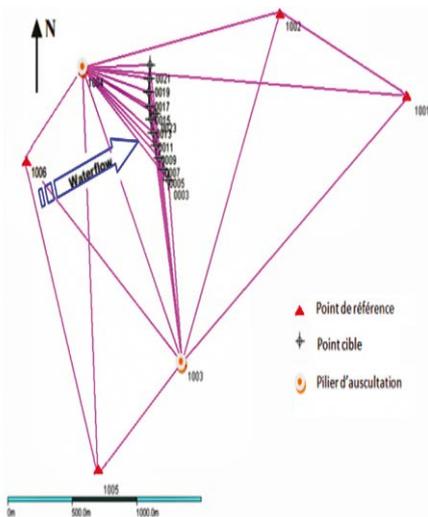


Figure 3. Réseau géodésique du barrage Altınkaya [Gökalp, Tađcı, 2009]

La méthode des éléments finis (MEF) pour l'analyse des déformations des barrages en enrochements

La méthode des éléments finis est une méthode numérique pour trouver des solutions approximatives aux équations aux dérivées partielles et équations intégrales. Au lieu de résoudre un problème continu, l'espace où une équation doit être résolue est divisé en un ensemble fini d'éléments interconnectés au niveau des nœuds [Daniel, 2010].

Les étapes de base dans la méthode des éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, illustrées dans la figure 4, sont les suivantes [Oudin, 2008] :

- discrétisation du milieu continu en sous-domaines ;
- construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- assemblage des matrices élémentaires ;
- prise en compte des conditions aux limites ;
- résolution du système d'équations.

Étape 1 : Discrétisation et prétraitement du modèle éléments finis

La discrétisation consiste à procéder à un découpage du domaine *D* continu représentant l'objet à modéliser, en sous-domaines *De* de formes élémentaires (cf. Figure 5).

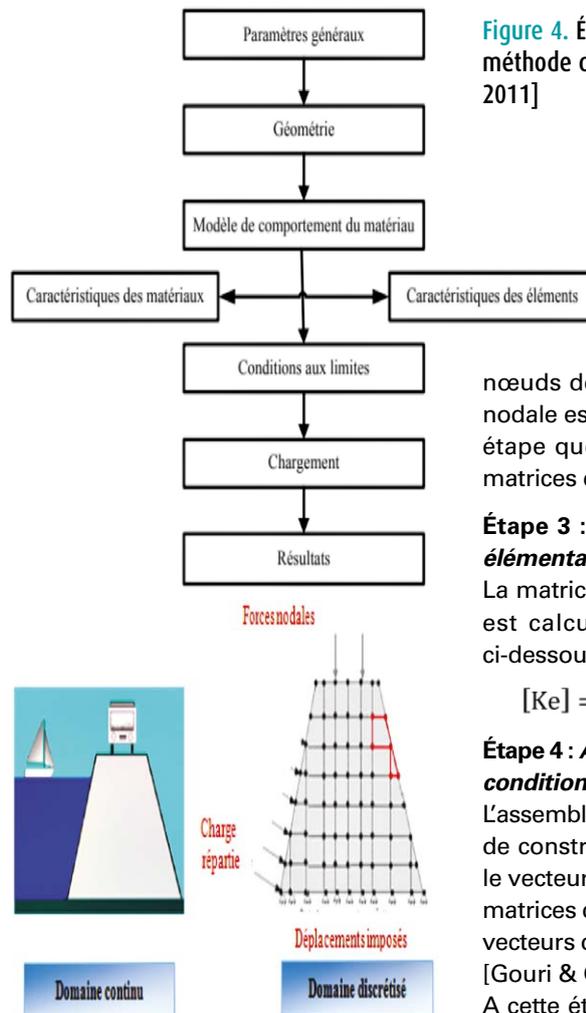


Figure 5. Principe de discrétisation

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie du barrage souvent complexe par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune. Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés comme proposé sur la figure 4. Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution [Oudin, 2011].

Étape 2 : Construction de l'approximation nodale par sous-domaine

Dans chaque élément *De*, la variable telle que le déplacement, la pression, la température, est approchée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autres. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de

Figure 4. Étapes générales de la méthode des éléments finis [Mertani, 2011]

nœuds de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires.

Étape 3 : Construction de la matrice élémentaire de rigidité [Ke]

La matrice élémentaire de rigidité [Ke] est calculée en utilisant l'équation ci-dessous [Varghese, 2014] :

$$[Ke] = \int B^T [C][B]dV \quad (2)$$

Étape 4 : Assemblage et application des conditions aux limites

L'assemblage est l'opération qui permet de construire la matrice globale [K] et le vecteur des sollicitations à partir des matrices de chaque élément [Ke] et des vecteurs des sollicitations élémentaires [Gouri & Gilbert, 1981].

A cette étape, toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.

Étape 5 : Calcul de la déformation

En appliquant les équations d'équilibre, la déformation à chaque nœud est calculée en utilisant l'équation :

La méthode des éléments finis fournit une solution numérique à un problème complexe. On peut donc s'attendre à ce que la solution converge vers la solution exacte dans certaines circonstances.

$$[K][D] = [P] \quad (3)$$

$$[D] = [K]^{-1}[P] \quad (4)$$

Avantages de la méthode des éléments finis

Voici les avantages de la méthode des éléments finis :

- la méthode peut être appliquée efficacement pour répondre aux limites irrégulières ;

- elle peut résoudre les structures ayant un type de frontière compliqué ; les matériaux homogènes, hétérogènes, anisotropes, isotropes, orthotropes peuvent être traités sans trop de difficultés ;
- les structures à géométrie complexe peuvent être analysées ; l'analyse non linéaire et dynamique peut être effectuée.

Afin de quantifier les déformations engendrées dans le corps du barrage Altinkaya, le logiciel ANSYS basé sur la méthode des éléments finis a été utilisé.

■ ANSYS V 15.0

ANSYS 15.0 est un code d'éléments finis d'usage général dédié à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physiques en général. Ces problèmes portent notamment sur : l'analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire), le transfert de chaleur, la dynamique des fluides, l'acoustique, l'électromagnétique. ANSYS 15.0 (<http://www.ansys.com>) a été développé à Canonsburg en Pennsylvanie par la société du même nom, qui est l'un des plus grands développeurs et fournisseurs de logiciels de simulation numérique. [Mertani, 2011]. Dans notre étude nous avons utilisé l'interface ANSYS Workbench version 15. De façon générale, une résolution par le logiciel ANSYS comporte trois étapes résumées dans le *tableau 2*. Le modèle 3D de la structure du barrage Altinkaya que nous avons développé est illustré dans la *figure 6* ci-contre :

Dans cette analyse statique du barrage Altinkaya, nous avons considéré que les enrochements du barrage sont typique-

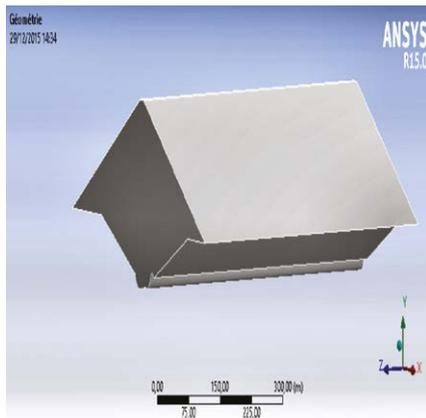


Figure 6. Modèle du barrage Altinkaya en 3D

ment modélisés de manière à ce qu'ils soient liés à la roche de fondation. Le barrage est modélisé de manière à ce qu'il soit considéré comme une structure monolithique avec des propriétés linéaires, élastiques et isotropes.

L'étape suivante consiste à définir un maillage en éléments finis. Ces derniers peuvent être de différentes formes. Les formes les plus couramment utilisées en 3D sont le tétraèdre ou l'hexaèdre.

Dans notre étude, nous avons opté pour le type de maillage tétraédrique, car il est plus facile à générer et à adapter selon beaucoup de formes de structure complexe.

La discrétisation de la structure, servant à la modélisation, est représentée sur la *figure 7*.

Modélisation

Les déplacements calculés entre la 1^{ère} et les autres périodes seront pris comme conditions aux limites.

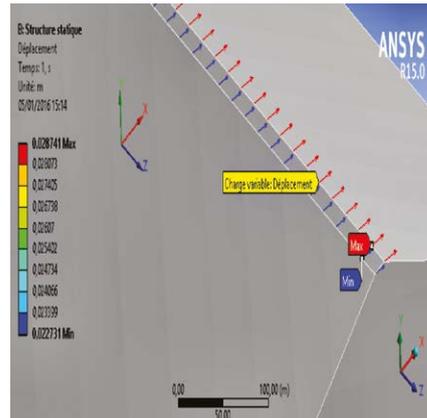


Figure 7. Modèle du barrage discrétisé en sous-domaines, méthode des triangles seuls

Dans cette partie, la première période (*Tableau.1*) sera prise comme période de référence, tous les déplacements et les déformations se calculeront par rapport à elle.

Après insertion des déplacements calculés entre la 1^{ère} et la 2^e période sur la crête du barrage, on obtient la *figure 8* (même tendance pour les autres périodes).

D'après les vecteurs déplacements, le barrage tend à se déplacer vers l'amont (même constatation pour toutes les périodes).

■ Champs de déplacement dans le corps du barrage

Les figures 9 et 10 présentent la valeur minimale et maximale respectivement de déplacement engendrées dans le corps du barrage qui correspondent aux périodes 1 et 2, 1 et 4 respectivement. Les valeurs des champs de déplacements totaux sont récapitulées dans le *tableau 4*.

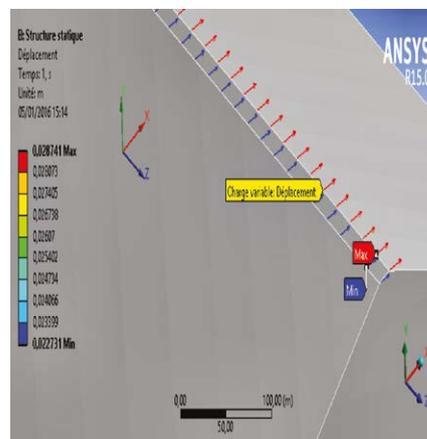


Figure 8. Vecteurs déplacements sur la crête du barrage

Tableau 2. Etapes de modélisation par ANSYS

Procédure	Étapes
Préprocesseur	<ul style="list-style-type: none"> - Entrer le type d'élément - Entrer les propriétés du matériau (module de Young, coefficient de poisson, densité, etc.) - Entrer les données géométriques (épaisseur des plaques, surface, volume, inertie, etc.) - Générer le maillage - Entrer le chargement (forces statiques, gradient de température, etc.) - Entrer les conditions aux limites
Solveur	<ul style="list-style-type: none"> - Entrer le type de calcul effectué (statique, dynamique, etc.) - Listing, impression et visualisation des résultats
Post-Procasseur	<ul style="list-style-type: none"> - Listing, impression et visualisation des résultats

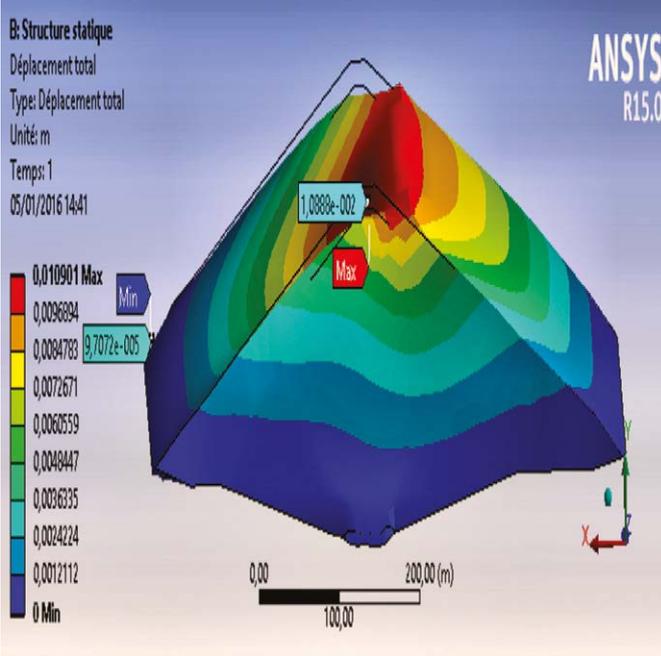


Figure 9. Champ de déplacement minimal dans le barrage entre les périodes 1 et 2, retenue vide

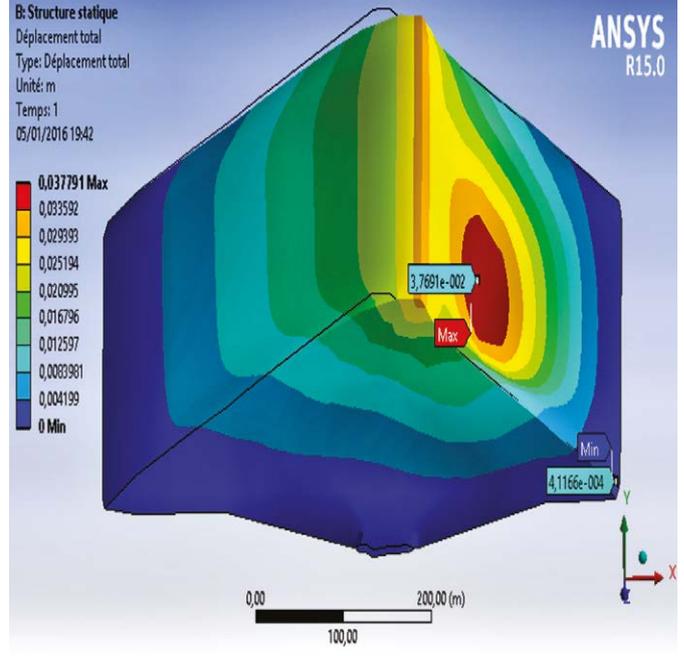


Figure 10. Champ de déplacement maximal dans le barrage entre les périodes 1 et 4, pressions hydrostatiques actives



D'après le tableau 4 on remarque que la même tendance est enregistrée pour la variation des déplacements qui se génèrent au niveau de la crête du barrage quand il est soumis à son poids propre. La valeur maximale est de l'ordre de 23,3 mm entre la 1^{re} et la 4^e période, cela est due à la diminution de la résistance des enrochements constituant le barrage, ce qui a provoqué un affaissement dans la partie amont du barrage.

Or, quand le barrage est soumis à la charge hydrostatique et à son poids propre, on constate que le déplacement s'oriente vers le centre de la digue et au niveau de la crête du barrage, sa valeur maximale est égale à 37,6 mm engendrée entre la 1^{re} et la 4^e période, à cause de la charge d'eau et des pressions hydrostatiques appliquées sur le talus amont. Les tassements du barrage sont assez réguliers et se génèrent dans la crête ; ils sont accentués au niveau du talus amont.

■ Déformations dans le corps du barrage

Les valeurs minimales et maximales induites dans le corps du barrage sous l'effet de son poids et la pression hydrostatique sont représentées dans les figures ci-contre.

Les valeurs maximales et minimales des déformations induites dans le corps du barrage sont résumées dans le tableau 5.

La déformation produite entre la 1^{re} et la 3^e période, et entre la 1^{re} et la 4^e période est de l'ordre de 307 ppm ; cela signifie que le corps du barrage n'a pas bougé pendant ces deux époques. On peut considérer que l'ouvrage est stable vu qu'il est soumis uniquement à son poids propre.

On constate que les mouvements les plus importants observés se produisent entre la 1^{re} et la 3^e période, au milieu de la crête du barrage du côté amont, c'est-à-dire du côté où la charge d'eau est exercée.

Tableau 4. Tableau récapitulatif des valeurs maximales et minimales des déplacements

	Périodes	Valeurs maximales (mm)	Valeurs minimales (mm)
Poids propre	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	10.8	0.09
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	27.6	0.84
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	23.3	0.64
Pression hydrostatique et poids propre du barrage	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	43.1	0,29
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	10.9	0.47
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	37.6	0.41

Ces mouvements sont dus à la diminution du niveau de la retenue (de 170,34 m à 164,20 m) en raison de l'absence des précipitations dans cette

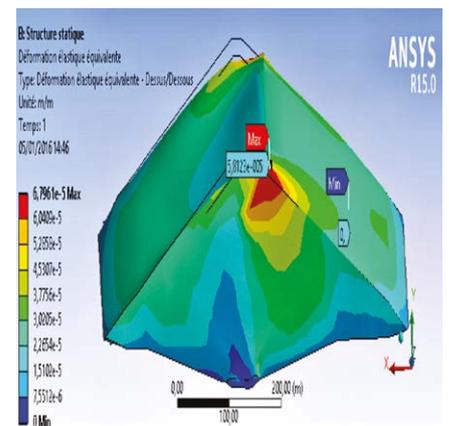


Figure 11. Déformation minimale du barrage entre les périodes 1 et 2, retenue vide

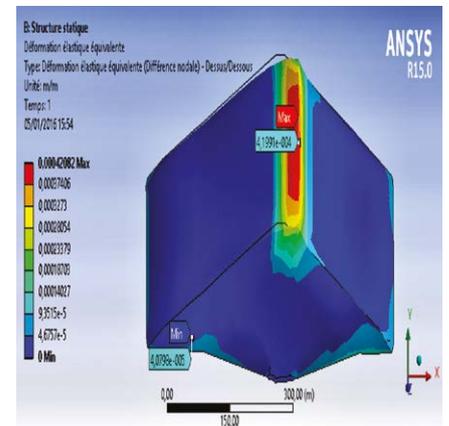


Figure 12. Déformation maximale du barrage entre les périodes 1 et 3, pressions hydrostatiques actives



Tableau 5. Tableau récapitulatif des valeurs maximales et minimales de déformations

	Périodes	Valeurs maximales (ppm)	Valeurs minimales (ppm)
Poids propre	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	58,1	0
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	307	43,3
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	307	38,2
Pression hydrostatique et poids propre du barrage	Entre 1 ^{re} et 2 ^e période	245	20,7
	Entre 1 ^{re} et 3 ^e période	419	40,7
	Entre 1 ^{re} et 4 ^e période	311	56,4

période et de la grande production électrique ; la déformation induite est de l'ordre de 419 ppm.

Le remplissage du réservoir a un effet sur le comportement des enrochements du barrage. L'eau a entraîné un soulèvement des particules immergées, qui a diminué leurs résistances et peut endommager leurs formes.

Conclusion

Cette analyse a permis de vérifier la capacité du logiciel ANSYS dans la modélisation du comportement d'un barrage en enrochements soumis à une combinaison de charge hydrostatique et son propre poids, avec la considération des mesures d'auscultation GPS. Ces derniers ont montré que la crête du barrage a subi des mouvements horizontaux et verticaux caractérisés par une direction dominante vers l'aval et par un phénomène de tassement.

Le barrage Altinkaya a montré une déformation maximale au niveau de sa crête en raison de son poids propre et de la charge hydrostatique ; cette dernière joue un rôle important sur l'évolution des déformations et des déplacements.

L'ensemble du massif en enrochements du barrage présente un faible tassement général de l'ouvrage dû aux actions du poids propre et de la pression de l'eau. Compte tenu des résultats de l'analyse effectuée, on peut considérer que l'ouvrage a un comportement tout à fait satisfaisant pendant la période d'observation GPS (09/2000 jusqu'à 05/2002) ; l'ouvrage présente toutes les garanties d'une bonne durabilité. ●

Contacts

BOUHOUCHE Nadia,
bouhouchenadia@yahoo.fr

GOURINE Bachir
bachirgourine@yahoo.com
Centre des techniques spatiales,
Département de Géodésie spatiale, Arzew,
Algérie

Bibliographiques

1. Benmadani, M & Lemchouchi, W. *Étude de différences techniques d'auscultation des barrages*. Mémoire d'ingénieur, Centre des Techniques Spatiales, Arzew-Algérie (2008).
2. Daniel, C. *Méthode des éléments finis par l'exemple*. Groupe Mécanique Modélisation Mathématique et Numérique, Université de Caen, France (2010).
3. Gökalp, E & Taşçi, L. *Deformation monitoring by GPS at embankment dams and deformation analysis*. Survey Review, 41, 311 pp.86-102 (2009).
4. Kahlouche, S. *Projet de mise en place d'un réseau d'auscultation géométrique du barrage de Sikkak (Tlemcen) à partir d'observations spatiales*. Atelier technique de l'Agence Spatiale Algérienne sur l'Utilisation des technologies spatiales au service des ressources en eau (2012).
5. Taşçi, L. *Analysis of dam deformation measurements with the robust and non-robust methods*, Scientific Research and essays Vol.5 (14), (2010).
6. Mertani, B. *Modélisation numérique et expérimentale du comportement des panneaux sandwichs à âme en nids d'abeilles*, Mémoire de magister université Ferhat Abbas - Setif (2011).
7. Milev, J. *Geodetic Deformation Analysis as the main part of monitoring projects*, Using Adjustments in a Monitoring Network (2010).

8. Moulay, E. *Etude paramétrée de la stabilité des barrages poids*, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie (2014).

9. Szostak-chrzanowski, A. et al. *Kinematic Analysis of Behavior of Large Earth Dams*, TS 68 - Deformation Measurements of Dams. Munich, Germany (2006).

10. Varghese, B. et al. *Finite element analysis of arch dam*. International Journal of Research in Engineering and Technology, IJRET, India (2014).

11. Yazan & Öztan, *Altinkaya Braji ve hes jeoteknik çalismalari*. Ankara, Turkey (2011).

ABSTRACT

KEYWORDS: Dam, deformation, displacement, Global Positioning System (GPS), auscultation, Finite Element Method, ANSYS.

The safety of rockfill dams does not depend only on an appropriate design and adequate construction, but also for monitoring the current behavior, not only during construction and during impoundment, but throughout dam process [Szostak-chrzanowski, 2008]. Monitoring using the appropriate geodetic and geotechnical instrumentation allows warning system in case of abnormal behavior of the dams. The comparison calculated behavior deformations values when designing and deformations measured using the monitoring instruments, allows to validate or make a reassessment of the parameters used in the analyzes. Modeling the behavior of rockfill dams is a complex process in which we must consider the nonlinear behavior of construction materials, the interaction between the dam and the soil foundation and / or bedrock, the influence of hydraulic load on the dam and on the foundation and the effects of water saturation. The deformation process can be modeled using the finite element method (FEM). Among the many processors based on the finite element method, ANSYS which makes possible the analysis of complex structures with fewer errors [Varghese, 2014]. This work aims to analyze the behavior of rockfill dams using the ANSYS computer code; an application was made on Altinkaya Dam in Turkey.

Stéphane Dafflon : U+25A6 ou le goût pour la nuance

■ Jean-Pierre MAILLARD

Créés en 1982 par Jack Lang alors ministre de la Culture, les fonds régionaux d'art contemporain (FRAC), sont pilotés par l'État pour mettre en valeur et soutenir l'art visuel actuel (peinture, sculpture, vidéo, etc.) dans chaque région de France, la collectivité territoriale participant à son financement. En contribuant à la découverte de l'art contemporain par des publics les plus diversifiés, les FRAC concourent, non sans critique, à la réduction des disparités géographiques, sociales et culturelles dans le domaine des arts plastiques. Juridiquement ces institutions sont de simples associations loi 1901, sous tutelle du Ministère de la culture, qui assurent une mission de service public.

Les FRAC aujourd'hui

Les objectifs des FRAC visent à la constitution en région d'un patrimoine d'art contemporain par acquisitions et commandes, autant que possible au travers de partenariats publics et privés, à la diffusion des œuvres dans le territoire du fonds constitué, pour de multiples actions impliquant des établissements scolaires et aussi la sensibilisation du public à l'expression artistique actuelle par des expositions, des visites, des conférences, des rencontres avec les créateurs et autres initiatives.

Les FRAC sont différents des musées et des centres d'art attachés aux lieux qui les reçoivent. La présentation des collections des FRAC peut ainsi être largement décentralisée d'abord en région, puis en France, voire à l'étran-



Le mural AM012-AM013

ger. C'est ainsi que le tiers des presque trente mille œuvres rassemblées depuis la création des FRAC est chaque année montré au public.

Les œuvres présentes dans les collections des vingt-trois FRAC existant en France (26 000 en 2013) sont pour l'essentiel postérieures à 1960 et réalisées par des artistes représentatifs des créations française et internationale (4 200 en 2013). Pour l'instant, la réduction à treize du nombre de régions en France, effectivement intervenue le 1^{er} janvier 2016, n'a pas eu d'incidence sur celui des FRAC existants. Les collections des FRAC constituent le troisième ensemble public d'art contemporain en France, après la collection du centre national des arts plastiques (CNAP) et celle du musée national d'art moderne à Paris.

Avec environ 1 300 œuvres et 500 artistes présents, le classement du FRAC Île-de-France est modeste sachant toutefois que l'offre des musées et galeries parisiens satisfait déjà très grandement la demande et

les besoins franciliens. Deux lieux sont dédiés à la présentation des collections : "Le Plateau" de la rue des Alouettes à Paris et le château du parc culturel de Rentilly-Michel Chartier à Marne-la-Vallée, le siège de la communauté d'agglomération Marne-et-Gondoire.

Les FRAC n'échappent pas à la contestation de leurs présentations qui peuvent être perçues à l'occasion comme obscures et quelquefois hermétiques. Pour autant, elles mettent souvent en valeur le travail d'artistes vivants dont la filiation artistique est lisible. Cette fois à Paris, dans la vitrine du FRAC Ile-de-France Le Plateau, est accueillie une installation/exposition "Art et géométrie", dans la lignée de son compatriote suisse Max Bill, un élève du Bauhaus.

U+25A6

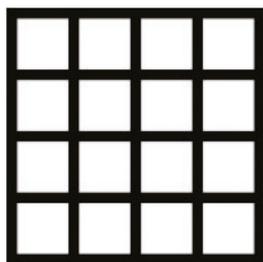
Cette formule alphanumérique sert de titre à l'exposition personnelle de



Stéphane Dafflon, plasticien, invité à revisiter les espaces du Plateau. En harmonie avec les œuvres présentées, l'artiste a choisi un titre abstrait U+25A6. Et pourtant sous ce code se cache un carré hachuré horizontalement et verticalement, une grille contenant seize petits carrés uniformes puisque ce titre renvoie au standard informatique Unicode développé par un consortium éponyme, ce standard permettant des échanges de textes dans différentes langues. Ce faisant, il affirme être dans le concret puisque la codification est une pratique courante de Stéphane Dafflon : par exemple, dans l'inventaire de ses œuvres, il intitule ses œuvres AST299 pour acrylique sur toile n° 299 ou encore AM012-AM013 pour adhésif mural n°s 12 et 13.

Les quatre espaces sont investis par la mise en scène de tableaux acrylique sur toile carrés, triangulaires ou encore hexagonaux. Ils renvoient à des murs entièrement couverts d'adhésifs de couleur en vinyle composant un horizon impressionniste. Les tableaux sont divisés de façon très ordonnée, en carrés, puis en triangles ou encore en trapèzes de couleur, couleurs déclinées chaudes ou froides dans chacune des créations.

Les œuvres peintes sont complétées de trois sculptures élémentaires assemblées par des aimants : un triangle équilatéral et un décagone, d'une hauteur d'homme, avec à l'entrée un hexagone étiré qui se présente comme un miroir sans glace et annonce la composition de la dernière salle. Outre le décagone, cette salle présente dix-neuf toiles bicolores et hexagonales dont les côtés verticaux sont allongés. Divisée en deux parties égales, chaque toile reçoit deux aplats d'une même couleur dominante, l'une plus foncée que l'autre permettant la perception



Code U+25A6 (standard Unicode)



© Martin Argyroglo

La rangée d'hexagones

d'une ombre. Alors, après un temps, l'illusion du volume s'impose jusqu'à se demander quelle protection assure cette rangée de boucliers présentée comme autant d'écus anonymes.

Le triangle posé contre AM012-AM013 a une base en bois et deux côtés en chrome porteurs d'une fonction miroir, de renvoi des couleurs du mur, l'effet voulu étant renforcé par un néon clignotant. La proposition n'est pas démonstrative car comprendre instantanément que ce néon du plafond défectueux contribue à une œuvre n'est pas immédiat.

Pour les amateurs d'art et de géométrie les deux murs couverts d'adhésifs muraux constituent la novation de l'exposition.

Le mural AM012-AM013

Posés sur deux murs à angle droit les adhésifs colorés sont autant de pixels. Créé à l'écran puis transposé de l'ordinateur au mur, AM012-AM013, comme toute l'installation, a été conçue pour le lieu. Le fondu enchaîné chromatique a été pensé dans la recherche du mouvement. Pour autant la trame reste visible comme dans un tableau Excel.

Dans son ensemble une diagonale de AM012-AM013 fait passer l'adhésif d'une couleur chaude à une couleur froide et celui de l'autre diagonale du sombre à la lumière. Ainsi la composi-

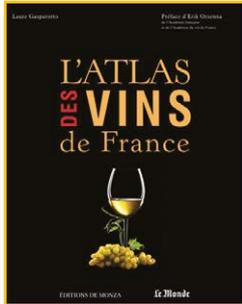
tion localise des adhésifs à dominante jaune au bas de la médiane centrale en suggérant un soleil levant.

Si l'artiste a déjà réalisé des muraux avec la technique de l'adhésif, c'est la première fois qu'il investit un mur en totalité en "all-over" comme il le dit lui-même. Si Jesús Rafael Soto nous fait entrer dans ses pénétrables, Stéphane Dafflon attire avec la même vigueur le regard vers une peinture élargie qui s'invente en dehors des supports classiques. Il a pensé l'installation comme un rythme, une sonorité visuelle, voire une onde d'échos d'un mur à l'autre.

Stéphane Dafflon

Stéphane Dafflon, citoyen suisse, vit et travaille à Genève. Diplômé de l'école cantonale d'art de Lausanne (ECAL) en 1999 il y enseigne depuis 2001. Il est représenté dans la capitale par la galerie Air de Paris. Il n'hésite pas à faire sortir sa peinture du châssis. L'artiste transpose à sa façon et en couleur la musique et ses vibrations, dont il s'inspire.

Ainsi le FRAC d'Ile-de-France offre à Stéphane Dafflon sa première exposition personnelle dans une institution parisienne. Elle est visible jusqu'au 15 avril 2018 au FRAC Ile-de-France Le Plateau, 22 rue des Alouettes Paris XIX^e (www.fraciledefrance.com) ●



■ L'Atlas des vins de France

**Laure GASPAROTTO et
Jean-Pierre de MONZA**

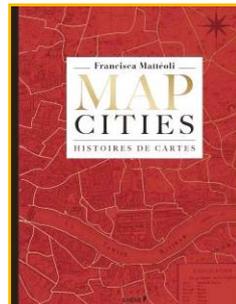
Dans sa préface, **Erik Orsenna** cite la devise d'un vigneron australien "Le vin, c'est de la géographie liquide". Cette nouvelle édition de l'Atlas des vins de France rend compte des grands changements intervenus dans le monde viticole depuis 2011, année au cours de laquelle l'importante réforme de la politique de qualité entreprise par l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO) a connu son aboutissement. L'ouvrage, enrichi et actualisé, présente en 360 pages abondamment illustrées, la totalité des Appellations d'origine contrôlée (AOC), des Indications géographiques protégées (IGP) et des Eaux de vie de France. Cette version de l'Atlas des vins de France bénéficie de la collaboration de la Sommellerie Française. Un premier chapitre résume ce qu'il faut savoir sur le vin. Chaque appellation ou dénomination, classée par régions viticoles, est présentée en douze critères (année d'obtention du label, superficie, encépagement, rendement à l'hectare, durée d'élevage, quantité de production, présentation détaillée et qualités organoleptiques, durée de consommation, durée de conservation, température de dégustation, affinités). Cet Atlas présente près de 100 cartes remarquables en couleur pour situer les différentes zones de production. Plus de 1 000 accords mets et vins. En fin d'ouvrage, un index général détaillé.

Laure Gasparotto, historienne, journaliste spécialisée dans le monde du vin pour le journal *Le Monde* est auteur de plusieurs ouvrages consacrés à ce sujet.

Jean-Pierre de Monza, initiateur de l'ouvrage, est auteur des éditions précédentes avec **Fernand Woutaz**.

Préface d'**Erik Orsenna** de l'Académie française et de l'Académie du vin de France.

► ÉDITIONS DE MONZA
39 € - 360 pages
ISBN : 978-2-916231-46-4



■ MAP CITIES histoires de cartes

Francisca MATTÉOLI

Toutes les grandes villes dans le monde ont une histoire : les cartes racontent les aventures humaines qui les ont fait naître, les légendes associées qui nous font rêver...

Qui n'a pas un jour rêvé en dépliant la carte d'une ville ? À l'époque des GPS, Francisca Mattéoli nous invite à un périple au fil des villes et des cartes qui l'ont fait rêver, en nous racontant aussi des aventures humaines qui ont permis la création des villes que nous connaissons aujourd'hui.

Qu'elles se nomment Pompéi, Babylone, Los Angeles, Édimbourg ou Paris, qu'elles aient disparu dans la nuit des temps ou soient bien réelles et constellées de gratte-ciel, les villes et les cartes de ce livre ont toutes une histoire qui les rendent uniques. Elles peuvent être légendaires ou oubliées, ultra-modernes ou datant d'une époque révolue : ces cartes et ces villes sont prétextes à une escale inattendue, à un récit qui parle du destin de notre monde et se mêle au nôtre quand nous déplaçons devant nous le grand accordéon de papier.

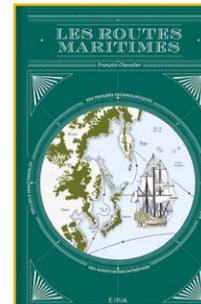
Francisca Mattéoli est chilienne. Elle est l'auteur de nombreux récits de voyages traduits en plusieurs langues et du livre *MAP STORIES*.

► ÉDITIONS DU CHÊNE
35 € - 176 pages
ISBN : 978-2-81231-579-4

■ Les routes maritimes

François CHEVALIER

Des premières grandes expéditions égyptiennes aux courses de bateaux ultramodernes, en passant par la découverte des pôles ou le percement des canaux, les hommes ne cessent d'explorer les océans. À l'aide



de cartes inédites, **François Chevalier**, spécialiste du monde maritime, retrace des siècles d'aventures sur les mers à travers les histoires des hommes et des bateaux. Que ce soit par des chemins semés d'embûches ou grâce à d'heureux hasards, c'est à chaque fois une victoire pour la connaissance du monde.

François Chevalier est à la fois historien, architecte naval et enseignant à l'université, il est l'auteur d'une vingtaine d'ouvrages de référence sur l'histoire de la plaisance. Il publie régulièrement des articles dans la presse internationale et a reçu le prix *Neptunia* du musée de la Marine.

► ÉDITIONS DU CHÊNE
25 € - 223 pages
ISBN : 978-2-85120-901-6

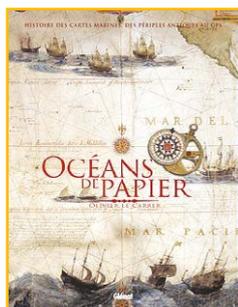
■ La dématérialisation de l'enquête publique en 3 clics : à l'usage de tous les acteurs de l'enquête publique

CNCE

Dans une société qui se numérise, l'ordonnance 2016-1060 du 3 août 2016 et son décret d'application 2017-1026 du 25 avril 2017, tout en maintenant et en rationalisant les modes de consultation traditionnels (registre papier et courrier postal), ont généralisé la dématérialisation de l'enquête publique, la faisant résolument entrer dans la modernité et le numérique.

Le présent ouvrage s'adresse à l'ensemble des acteurs de l'enquête publique, dont l'implication est une condition primordiale pour la pleine réussite du dialogue environnemental dans l'élaboration de la décision publique.

► Compagnie nationale des commissaires enquêteurs
CNCE
20 € - 138 pages
ISBN : 978-2-9510571-3-5



■ Océans de papier Une histoire de cartes marines

Olivier Le **CARRER**

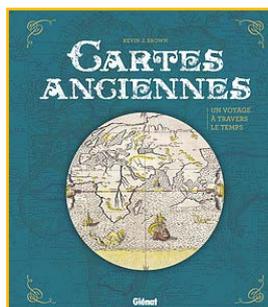
Au fur et à mesure que les hommes exploraient la planète, ils en dressèrent les cartes. D'abord approximatives, elles devinrent de plus en plus précises en même temps que progressaient les instruments et les techniques de navigation.

Illustré par les plus belles cartes marines conservées à la Bibliothèque nationale de France, Océans de papier propose une histoire savoureuse des cartes marines de l'Antiquité à nos jours.

L'image de la terre avec ses cinq continents s'impose aujourd'hui comme une évidence. Elle a pourtant constitué pendant des millénaires un puzzle gigantesque dont personne ne pouvait prévoir la forme définitive, le nombre de pièces et les dimensions réelles. Résoudre cette énigme a pris des millénaires, au gré des échanges entre savants et voyageurs : une fabuleuse aventure humaine et scientifique au cours de laquelle on a appris à mesurer la mer, à dessiner l'espace et à s'y situer.

Olivier Le Carrer relate cette fascinante progression, avec les doutes, les espoirs, les fausses pistes et les succès de ses protagonistes. En se plongeant dans les cartes, on s'émerveillera de l'évolution des connaissances, depuis les spéculations fantaisistes de pionniers jusqu'à la précision impressionnante des documents modernes du XXI^e siècle. Écrivain et navigateur, ancien rédacteur en chef du magazine Bateaux, Olivier Le Carrer parcourt les mers du monde depuis quarante ans. Il est l'auteur de nombreux ouvrages de référence concernant l'histoire des bateaux et l'art de la navigation. Membre de la Société de Géographie, il réside en Bretagne où il explore le plus souvent possible côtes, rivières et canaux en Kayak.

► **GLÉNAT**
30 € - 128 pages
ISBN : 978-2-344-02497-3



■ Cartes anciennes Un voyage à travers le temps

Kevin J. **BROWN**

De la Table de Peutinger, plus ancienne carte du monde jamais découverte, jusqu'aux cartes de propagandes de la Première Guerre mondiale en passant par des cartes de lieux imaginaires, ce très bel ouvrage présente 70 magnifiques cartes anciennes du XII^e au XX^e siècle, racontant une représentation de l'histoire du monde.

Ce livre propose un voyage dans le temps à travers la cartographie héritée de Ptolémée, la cartographie médiévale, celle du début et du milieu de la Renaissance, en passant par les cartes les plus fantaisistes.

Objets de navigation, illustrant les intérêts économiques et politiques des puissances maritimes européennes mais aussi véritables outils de communication et de propagande, les progrès réalisés au fil des siècles sont considérables. Toutefois, la dimension géographique n'est pas ici la préoccupation majeure. Toutes ces cartes offrent également les différentes visions du monde qu'elles véhiculent, aussi bien sur les cultures, les croyances et l'histoire des civilisations, nous voyons ainsi les progrès réalisés au fil des siècles.

Kevin J. Brown est un collectionneur de cartes rares vivant à Brooklyn, New York. Il est fondateur de Geographicus Rare Antique Maps, un magasin spécialisé dans la vente des cartes rares et anciennes, allant du XV^e siècle au XIX^e siècle et provenant du monde entier et a une passion dévorante pour les cartes rares.

► **GLÉNAT**
39,95 € - 208 pages
ISBN : 978-2-344-02516-1



■ GRENOBLE 1968 Les jeux olympiques qui ont changé l'Isère

Par Olivier **COGNE** du Musée dauphinois / Collectif (13 auteurs)

Février 1968, le monde a les yeux tournés vers les Alpes iséroises. Le Général de Gaulle déclare ouverts les dixièmes Jeux Olympiques d'hiver de Grenoble. Un événement mondial ! Une fierté nationale ! Au delà de la fête populaire et sportive, le public est témoin de la transformation architecturale, économique et culturelle de la ville comme du département de l'Isère.

Au sommaire : Préhistoire des J.O. de Grenoble. La quinzaine olympique. Les Alpes françaises et l'olympisme : entre histoire et mémoire.

Cette exploration détaillée permet de mesurer l'ampleur des mutations suscitées par les Jeux et d'appréhender l'importance de leurs legs, encore bien présents dans la ville et dans les esprits. C'est un ouvrage illustré par une remarquable iconographie foisonnante et historique.

► **GLÉNAT** - 35 € - 192 pages
ISBN : 978-2-344-02590-1

■ Le livre des commémorations nationales 2018

En 2018, 129 anniversaires auront qualité de Commémoration nationale. Ainsi en a décidé le Haut comité que préside Danièle Sallenave, de l'Académie française. Le présent volume, sous la plume des meilleurs spécialistes et de passionnés, redonne vie et couleurs à des personnalités et des événements historiques de notre histoire qui défilent page après page. Une part consistante est réservée dans ce volume au centenaire de la Grande Guerre.

► **ÉDITIONS DU PATRIMOINE**
10 € - 336 pages - ISBN : 978-2-7577-0572-8

RÉPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 154

COVADIS GEOMEDIA	4 ^e de couv.	REIS STOLZEL	14
ORPHEON GEODATA DIFFUSION	2	SPECTRA PRECISION	2 ^e de couv.

La Team Teria participe au 17^e Raid Amazonnes au Cambodge et a choisi d'accomplir la performance pour GSF

■ Claire GALPIN

Le Raid Amazone c'est un raid féminin qui regroupe 360 femmes réparties en 80 équipes de 3 femmes et 60 équipes de 2 femmes. C'est un raid 100 % féminin et solidaire de 6 jours vécu entre performance et découverte du pays et de ses habitants.

La Team Teria c'est 3 femmes de Mayotte dont deux sont associées dans des cabinets de géomètres-experts et la troisième architecte. Elles ont décidé de relever le défi du 4 au 14 mars 2018 dans une jungle luxuriante au Cambodge. Ce raid est organisé tous les ans par Alexandre Debanne et l'équipe ZBO qui soutient l'ONG "Toutes à l'école" œuvrant pour que les filles aillent à l'école. Quand on sait que les femmes instruites envoient beaucoup plus leurs enfants à l'école, c'est une action primordiale dans de nombreux pays et particulièrement en Afrique rurale. C'est une cause pour laquelle GSF milite et agit (certes modestement et dans la mesure de ses moyens) lors de ses actions de développement local.

Elles ont choisi de soutenir GSF et sollicitent les bonnes volontés. Elles sont soutenues par le réseau Teria/EXAGONE le réseau de stations permanentes en France métropolitaine, dans les DOM et bientôt à Mayotte. De la pose de balises pour suivre les déplacements des requins-baleines aux exploits d'un jeune champion de kart, de l'America's Cup à la mesure des sommets, EXAGONE soutient des actions qui associent l'image de la profession de géomètres à celle de l'excellence et de la réalisation de soi. <https://www.reseau-teria.com/>

A l'heure où j'écris ces lignes Candice, Frédérique et Stéphanie s'entraînent d'arrache-pied au canoé, au tir à l'arc et au vélo. Avec une capitaine d'équipe géomètre-expert, les courses



d'orientation devraient être facilitées. Leur performance permettra de faire connaître et mettre à l'honneur les professions d'architecte et de géomètre-expert et l'interdisciplinarité. Participer à un raid féminin sous les couleurs de Teria c'est également mettre l'accent sur la féminisation de ces professions mais aussi sur la modernisation et l'usage des technologies.

Les donateurs sont présents à l'appel et leur contribution viendra s'ajouter à celles de nos fidèles cotisants et aux subventions obtenues grâce à l'investissement bénévole de nos membres : (i) cours de géodésie spatiale et d'utilisation du GPS, (ii) formation sur l'atelier parcellaire et le langage Python dans l'environnement ESRI au bénéfice des cadres de l'Agence nationale du cadastre algérien et (iii) participation à la *Mesa de Expertos* en appui au gouvernement colombien pour la mise en place du Cadastre multi-finalité inscrit au premier chapitre des accords de paix.

Ces fonds ont permis de financer (i) la scolarité d'Olivier, étudiant burundais parrainé par GSF qui termine le cycle d'ingénieur à l'ESGT et (ii) de soutenir Ange-Frédéric Koffi un jeune photographe ivoirien lors des rencontres de Bamako, biennale africaine de la photographie, qui a promu les actions



de GSF lors de cette rencontre internationale.

GSF aimerait dédier les fonds collectés par la Team Teria à un projet d'appui à l'autonomisation des femmes au Tchad, en partenariat avec des groupements féminins en milieu rural. Le projet allie la création d'activités génératrices de revenus (construction de séchoirs et de cuisines solaires) et un projet foncier de mise en commun des terres prêtées aux femmes avec expérimentation de l'irrigation traditionnelle dite "tassa" pour augmenter les rendements, notamment des céréales et du maraîchage. Le budget minimum pour mener à bien ce projet est de l'ordre de 30 000 euros. Ce ne sera qu'une petite goutte dans l'océan des besoins. ●

Pour plus d'information et suivre leur aventure

<https://www.raidamazonnes.com/concept/index.php>

<https://www.facebook.com/search/top/?q=team%20teria>

N'oubliez pas que GSF continue à collecter les appareils anciens en fonctionnement pour leur donner une seconde vie auprès des membres des pays en développement. Deux demandes au Tchad et au Burkina Faso sont en attente et donc les équipes de Topo Sans Frontières pour leur mission.



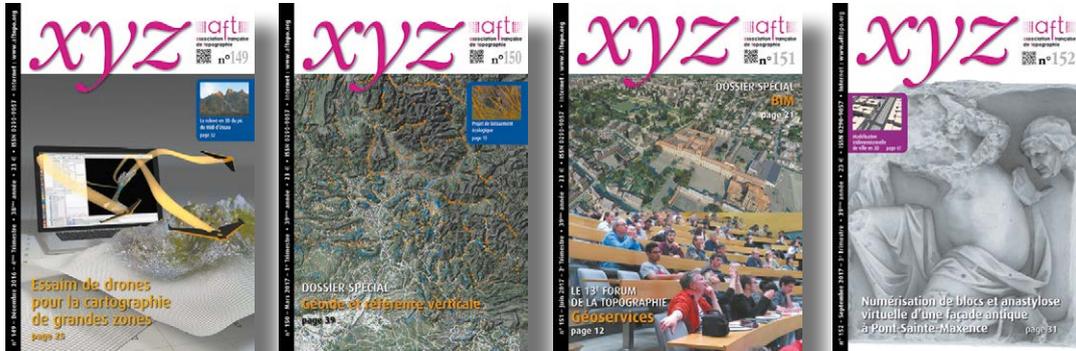
Bulletin d'adhésion ou d'abonnement 2018

à retourner à l'AFT par courrier ou courriel sauf inscription par Internet

*Les adhésions et abonnements s'entendent par année civile entière et donnent droit au service de la revue XYZ (4 numéros par an).
 Les démissions sont à adresser à l'AFT et prennent effet en fin de l'année en cours.*

Je souhaite adhérer à l'Association française de topographie.

- technicien ou enseignant, si règlement sur compte personnel, ou étudiant, ou chômeur, ou retraité **55 €**
 - cadre ou personne morale, et pour tout règlement émanant d'une administration ou d'une entreprise **90 €**
- (Ces tarifs comprennent l'abonnement à la revue XYZ au tarif préférentiel de 45 €)**



Je souhaite m'abonner à la revue XYZ :

- France **90 €**
- Étranger **93 €**

Je vous adresse :

- soit un bon de commande afin de recevoir une facture au préalable
- soit le règlement de : _____ €
 - par chèque à l'ordre de l'AFT, accompagné de ce bulletin dûment rempli
 Pour les chèques payables sur une banque à l'étranger, ajouter 10 € pour les frais bancaires.
 - par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR.
 sans omettre d'adresser le bulletin dûment rempli par courrier ou courriel
 - par carte bancaire, via notre site internet www.aftopo.org
 (seulement depuis un pays à monnaie transférable).
 - Je désire recevoir un reçu après règlement

M/Mme Nom : _____ Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

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

Tél. : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] Portable : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Courriel : _____

Date / / Signature



Nouvelle version 16

Obtenez les outils BIM
pour vos projets
d'aujourd'hui et de demain...

GEOMEDIA SAS
Immeuble "La Vigie" - 20, quai Malbert - CS 42 905 29 229 BREST Cedex 2 - France
Tél. 02 98 46 38 39 - Fax 02 98 46 46 64
E-mail : contact@geo-media.com - Site Web : www.geo-media.com

© 1993-2017 GEOMEDIA S.A.S. : COVADIS est une marque déposée de GEOMEDIA S.A.S.
Tous les autres noms de produits cités sont des marques déposées de leurs propriétaires respectifs.

 **AUTODESK.**
Gold Partner
Architecture, Engineering & Construction