

xvz

aft
association française
de topographie



n° 158

HYDROGRAPHIE En quête de justesse page 48



Numérisation et
modélisation 3D du jardin
d'Hiver du Musée de la
Faïence de Sarreguemines
page 21



SPECTRA[®]
GEOSPATIAL

UNE NOUVELLE IDENTITÉ, DE NOUVEAUX HORIZONS

La nouvelle marque Spectra Geospatial s'appuie sur la réputation et la notoriété forgées sous son ancienne identité Spectra Precision. Elle reflète l'évolution de l'organisation qui fournit une vaste palette de solutions spécifiquement conçues pour l'industrie géospatiale.



Stations Totales



Carnets de Terrain



Récepteurs GNSS



Récepteurs
GNSS portables



Tablettes



Logiciels

SOMMAIRE

Directeur des publications

Tania Landes
Maître de conférences
INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe
Rédaction et administration XYZ
73 avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. +33 (0) 1 43 98 84 80

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière

Rédacteur en chef adjoint

Flavien Viguière
Ingénieur topographe
Comité de rédaction

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

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

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothee Picard

ALBEDIA IMPRIMEURS

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



Dépôt légal

1^{er} trimestre 2019 ISSN 0290-9057
Trimestre de ce numéro : 1 600 ex

Abonnement annuel

France : 90 €
Étranger (dont CEE) : 93 €
Les règlements payés par chèques
payables sur une banque située hors
de France doivent être majorés de 10 €,
sauf à utiliser l'identifiant international de
compte IBAN

FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048

Le numéro : 25 €

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

L'AFT n'est pas responsable des opinions
émises dans les conférences qu'elle
organise ou les articles qu'elle publie.

Tous droits de reproduction ou d'adaptation
strictement réservés.

Couverture : Récupération de la barre de contrôle
de la profondeur, à bord du Bourgidou, dans le sas de l'écluse
de Saint-Gilles, par l'équipe de la Cellule Bathymétrie VNF
de Palavas-les-Flots, le 14 décembre 2017.
© VNF - Jean-François ROUMÉGOUX



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

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres)

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

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

Éditorial

InfoTopo

> Les informations de la profession 4

Hommage

> Hommage à Franck Perdrizet 9

> Hommage à Richard Biancale 10

Manifestation

> Colloque G2 2018 à Montpellier

Nicolas le Moigne - Séverine ROSAT - Françoise
Duquenne 11

> La fédération des géomètres francophones

à Rabat au Maroc
Bernard FLACELIÈRE 12

Télédétection

> Application de la loi de Benford au contrôle

de qualité des modèles numériques de terrain
Laurent POLIDORI - Mhamad EL HAGE 13

> Comparaison de MNT à haute résolution issus

de techniques laser et photogrammétriques
Michel KASSER - Nicolas DELLEY

Stéphane CRETEGNY 17

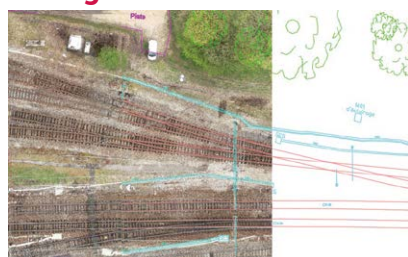
PRIX DE L'AFT

Patrimoine

> Numérisation et modélisation 3D du Jardin d'Hiver

du Musée de la Faïence de Sarreguemines
Valentin GIRARDET 21

Ingénierie



> Mise en place de procédures automatisées
pour les reports topographiques en milieu ferroviaire
à partir de données photogrammétriques et LiDAR
acquises par drones

Marion HINAUX 28

Géodésie

> Utilisation d'infrastructures géodésiques

mondiales pour la réalisation nationale
Raphaël LEGOUGE - Gaël ANDRE - Adélaïde MISSAULT

Julian LE DEUNF - Samuel BRANCHU 35

GNSS

> Développer l'Afrique, grâce au recensement
des stations GNSS permanentes

Derrick KOOME - Clement OGAJA - Eldar RUBINOV
Version française Bernard FLACELIÈRE 44

Hydrographie

> En quête de justesse

Bernard CATALA-COTTINI 48

Topographie



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

Thomas TOUZE
Matthieu HANSEN 57

Topo vécue

> Le gouffre le plus profond du monde

Paul COURBON 65

Histoire

> Le nivellement de Saint-Germain-en-Laye

Alain COULOMB 71

Art et géométrie



> Freddy Mamani :
le sommet
des couleurs

Jean-Pierre MAILLARD
..... 76

Ouvrages

André BAILLY 78

Foncier

> Chicoco Maps Our Cities, une interview d'Anne
Girardin, Cadasta Foundation 80

Pour la recherche de nos annonceurs consulter
la page 79

PROCHAIN XYZ - n° 159
L'évolution des réseaux NRTK vers le PPP-RTK :
un exemple avec le réseau TERIA

Le mobile GNSS temps réel le plus rapide du monde

Plus besoin de buller la canne

Sans limite d'inclinaison

Indifférent aux interférences magnétiques

Leica GS18 T

Venez le découvrir
sur le forum AFT et
Testez-le sur votre
chantier !

Plus d'informations auprès
de votre interlocuteur
Leica Geosystems



Leica Geosystems
www.leica-geosystems.fr



Contactez-nous : info.france@leica-geosystems.fr

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems



Topographes : des atouts réels pour le virtuel ?

La bataille sémantique est l'un des fronts de la guerre technologique. Les nouveaux mots, ou *buzzword*, rendront *has been* celui qui ne les emploiera pas en temps et en heure, de préférence dans leur version anglophone. Et s'il est bien un domaine touché, c'est celui du numérique et de la 3D où topographes, ingénieurs, architectes, grand public, *gamers* et communicateurs en tous genres imaginent de séduisants usages des technologies de réalité virtuelle, mixte ou augmentée. Toutes les prédictions sont claires, ce marché est en très forte expansion, avec un taux annuel de croissance estimé entre 40 % et 80 %, atteignant dès 2025 le volume du marché des PC actuel. Un consensus émerge aussi sur le rôle majeur de la réalité augmentée dans cette trajectoire. Toutes ces nouvelles interfaces homme-machine promettent une immersion inédite, parfois à juste titre, dans le monde virtuel. Un outil qu'on imagine incomparable pour de nombreuses prises de décisions. Mais une fois immergés virtuellement, quelle déception lorsqu'un environnement virtuel n'apporte pas les réponses aux problèmes posés dans le monde réel par manque de détails, d'exactitude ou d'actualité !

La restitution numérique spatiale de la réalité, tout comme sa numérisation initiale, sont des arts qui requièrent une large palette d'outils et savoirs techniques. Surtout, amis topographes, ne nous laissons pas submerger par la déferlante technologique, qui ferait oublier qu'avant tout autre, notre métier en a fait profession. Numériser le réel, en extraire une compréhension, que l'on restituera sous la forme la plus adéquate à son usage : voilà le défi réel de toutes ces technologies. Ce n'est pas le passage progressif de la 2D à la 3D qui change la nature du problème ; en revanche, la diversité des solutions croît à une fréquence et une amplitude inédite. Avec un flot d'actualités et de promesses continu, il est parfois bien difficile de se construire une vision claire, pourtant nécessaire à notre développement professionnel.

Sans aucun doute, l'AFT reste un lieu privilégié pour appréhender ces évolutions et faire corps face aux défis qui n'ont de cesse de bousculer nos métiers. Sa revue XYZ instruit une grande variété de techniques et méthodes modernes, ce numéro 158 l'illustre, et son forum annuel est une occasion toujours riche d'échanger et de rafraîchir notre connaissance des pratiques.

Le 15^e forum de la topographie se tiendra donc le jeudi 28 mars, au lycée Henri Loritz de Nancy, autour de "**l'immersion numérique en topographie**". Quelles opportunités offrent ces technologies dans notre pratique quotidienne ? Quel rôle le topographe trouve-t-il dans ces nouveaux marchés ? De quels atouts dispose-t-il et de quelles nouvelles compétences doit-il s'armer ? Autant de réponses que seuls la discussion, les témoignages et les échanges viendront enrichir.

Jean-François Hullo

■ Les drones français Delair rachètent l'américain Airware



La société Delair a annoncé la conclusion d'un accord d'acquisition de la société Airware avec la reprise des actifs principaux (plate-forme logicielle de traitement et d'analyse des données collectées par les drones, portefeuille mondial de clients et de distributeurs, et collaborateurs en France). Cette reprise permet à Delair de renforcer sa présence aux États-Unis, ainsi que dans des secteurs d'activité stratégiques. Suite à cette acquisition, la société française Redbird, achetée par Airware en 2016, revient sous pavillon français.

■ La date d'application du PCRS reportée à 2026, au lieu de 2019

De nouveaux aménagements à la réforme anti-endommagement (DT-DICT) qui encadre depuis 2012 les travaux effectués à proximité des réseaux de transport et de distribution sont parus au Journal Officiel du 30 novembre 2018. Si l'entrée en vigueur de l'arrêté initial est bien maintenue au 1^{er} janvier 2019, des échéances progressives sont prévues. Elles concernent notamment celles relatives aux nouvelles modalités de réponses aux DT-DICT, à l'harmonisation des classes de précision ou de manière plus accessoire la suppression de la télécopie comme mode de déclaration de travaux. Ainsi, le standard PCRS (Plan corps de rue simplifié) concerne désormais tous les ouvrages sensibles et non sensibles, en toutes localisations. Cependant la date

d'obligation est repoussée au 1^{er} janvier 2026, contre 2019. Certaines échéances restent maintenues avec un délai plus rapproché, comme celle du 1^{er} janvier 2020 pour les exploitants de réseaux amenés à mener des opérations ou à fournir des informations sur des ouvrages souterrains sensibles pour la sécurité implantés en zones urbaines. Le décret renvoie la date d'obligation au 1^{er} janvier 2032 concernant les autres ouvrages souterrains. Comme le rappelle le CNIG, cette évolution avait été annoncée lors de la commission Données du 21 septembre 2017. Il ne manquait plus que la parution de cet arrêté, en date du 26 octobre 2018.

Source : SIGMAG

Arrêté : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/10/26/TREP1723507A/jo/texte>



La Géoplateforme lauréate du Fonds pour la transformation de l'action publique

Dans le cadre de la GovTech Summit, la Géoplateforme, l'espace public de l'information géographique, a été désignée lauréate du 2^e appel à projet du Fonds pour la transformation de l'action publique (FTAP). Retenue parmi les seize projets sélectionnés sur une soixantaine présentés, la Géoplateforme se voit dotée d'un montant de 3,6 millions d'euros sur un budget total de 11,3 millions d'euros. Fort de l'expérience du Géoportail, l'IGN a pris l'initiative de co-construire, avec des partenaires, la Géoplateforme, une composante géographique de l'État-plateforme. Elle vise à mettre à la disposition des agents publics et des citoyens une infrastructure ouverte, collaborative et mutualisée, rassemblant des communautés et des usages autour des données et services géolocalisés. Elle est une opportunité de rationaliser les dispositifs existants en évitant des redondances tout en apportant des gains de qualité et de délai dans la production, le traitement et la diffusion d'informations géographiques pour qu'ils bénéficient au plus grand nombre. Ce faisant, la Géoplateforme améliorera notamment l'approche territoriale des politiques publiques.

► Site : www.ign.fr

■ Arcure lance sa nouvelle caméra stéréoscopique Omega

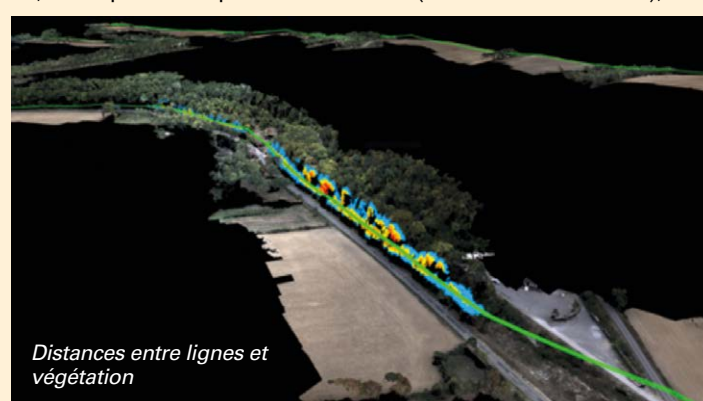
Arcure, leader dans le domaine de l'intelligence artificielle pour les véhicules industriels a dévoilé son dernier produit Omega lors du grand rendez-vous mondial de la vision industrielle, la Vision Messe de Stuttgart. Omega est un capteur 3D de stéréovision intelligente à destination des intégrateurs industriels. Omega permet une reconstitution 3D en temps réel de l'environnement du capteur avec une grande robustesse dans des environnements variés et difficiles. Les domaines d'application sont très nombreux, de l'agriculture aux usines, en passant par la robotique industrielle. Avec Omega, Arcure rentre sur le vaste marché des capteurs 3D où elle entend bien faire valoir les avantages de la stéréovision sur les technologies traditionnelles comme le lidar ou le radar.

► Site : <https://arcure.net/>



■ Delair vole pour Enedis : une des plus grandes opérations d'inspection des lignes électriques par drones d'Europe

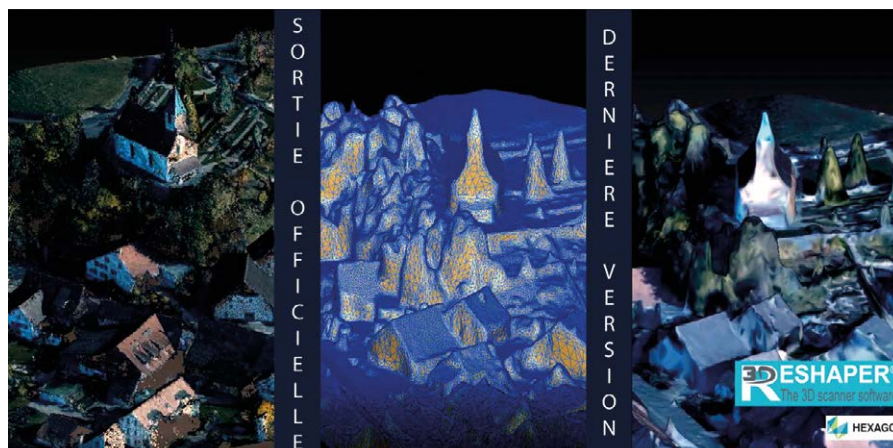
En 2018, Delair a réalisé une opération pilote de grande envergure pour Enedis afin d'optimiser l'inspection et l'entretien des lignes électriques. L'objectif était de produire une copie digitale dynamique du réseau grâce aux données collectées par les drones, et en déduire un plan d'entretien préventif à l'échelle nationale. Les données collectées et retraitées ont permis de créer une copie digitale dynamique de 500 km de lignes électriques et de leur environnement proche. En appliquant des algorithmes de reconnaissance visuelle et d'apprentissage automatique, les modèles 3D produits permettent de visualiser les zones à risque d'empiètement et, pour Enedis, de déclencher des plans d'élargissement préventifs appropriés. Le drone utilisé est le Delair DT18 HD, choisi pour ses capacités d'endurance (autonomie de 2 heures), et sa connectivité



© Delair

Distances entre lignes et végétation

3G permettant un guidage à distance par le pilote. La mission a duré 19 jours avec 56 heures de vol, 3 566 km parcourus et 63 000 images collectées.



■ Sortie officielle de 3DReshaper 2018 MR1

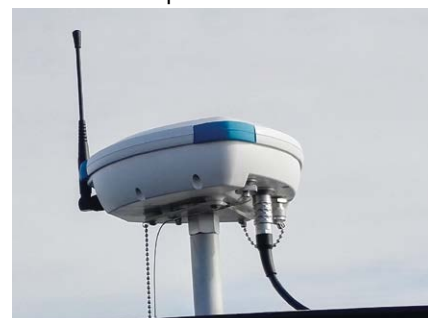
La société Technodigit a sorti la dernière version de son logiciel 3DReshaper MR1. Des améliorations ainsi que trois nouvelles fonctionnalités ont été apportées : la génération de modèles numériques de surface en quelques clics, la classification des points du nuage d'un bâtiment (murs ou sols), le déroulement des polygones en une ligne pour faciliter la transition 2D/3D. Les scanners Leica BLK360 peuvent être dorénavant connectés au logiciel. La gestion de nouveau format est incorporée : .lgs (Leica), .rdbx (Riegl) et .e57 (export).

► Site : www.3dreshaper.com/fr.

■ L'antenne G-Nav de Cadden retenue par Bouygues énergie & services



La société nantaise Cadden, spécialisée dans les systèmes et instruments de mesure en géomatique et télédétection, a été retenue pour équiper la plate-forme technologique de GetYourSpace, nouveau service d'optimisation de ressources en contexte urbain lancé par Bouygues énergie & services. L'antenne intelligente G-Nav assure le géoréférencement et la synchronisation des données collectées en temps réel mobile. La plate-forme technologique du service GetYourSpace est une solution embarquée sur un véhicule qui identifie, collecte, analyse les données sensorielles de l'environnement et les restitue sous forme cartographique. Grâce à ces informations, les villes sont en mesure d'optimiser les infrastructures et l'utilisation de ressources clés. L'éclairage public – l'un des principaux services en contexte urbain – est concerné au premier chef.



■ 2018, année record pour Airbus Space Systems



Airbus Space Systems a vécu une année 2018 record avec de nombreux succès comme le montre cette illustration : lancements de satellites, nouveaux contrats, etc. Le premier des trois satellites militaires d'observation optique de très haute résolution de nouvelle génération (CSO) a ainsi été lancé le 19 décembre 2018 depuis le port spatial européen de Kourou, en Guyane, à bord d'un lanceur Soyuz. Les satellites CSO fourniront des renseignements géographiques de très haute résolution à l'armée française, ainsi qu'à ses partenaires allemands, belges et suédois. Ils sont équipés d'un système de pointage extrêmement agile et commandés depuis le sol via un centre de contrôle opérationnel sécurisé.

31^e PRIX ROBERVAL

Des œuvres pour comprendre la technologie en langue française

Le prix Roberval, organisé par le service des cultures scientifique, technique et industriel de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), est un concours international francophone qui récompense des œuvres littéraires, audiovisuelles ou multimédias consacrées à l'explication de la technologie. Ces œuvres peuvent être destinées au grand public ou à l'enseignement supérieur de la technologie et sont conçues et réalisées en langue française. La cérémonie de remise du 31^e prix Roberval Enseignement supérieur a eu lieu le 11 janvier 2019 à l'Académie royale de Belgique. Michel Kasser, président d'honneur de l'AFT, participait à cette cérémonie en tant que co-responsable éditorial à Techniques de l'Ingénieur pour la section Géomatique.



■ BnF : Exposition Le Monde en sphères

Le globe est un objet familier, profondément ancré dans l'imaginaire de chacun. Un objet d'art et de savoir qui a incarné au fil des siècles la vision sphérique du monde. Comment appréhender aujourd'hui l'univers tel qu'il était connu et imaginé avant Copernic, avant Newton, avant les révolutions scientifiques et la conquête spatiale ? Initialement présentée au Louvre Abu Dhabi, l'exposition conçue par la BnF retrace 2 500 ans d'une histoire des sciences et des représentations du ciel et de la Terre. De l'Antiquité à nos jours, de la conception d'un monde sphérique clos centré sur la Terre à celle d'un univers infini en perpétuelle évolution, elle tisse les fils qui relient la quête de savoir à la science et à l'imaginaire d'aujourd'hui. Un voyage exceptionnel rendant hommage aux savants qui ont approché, de sphères en sphères, de cercles en ellipses, la modélisation d'un cosmos qui n'a pas fini de livrer ses secrets.

► Exposition à la BnF - François-Mitterrand du 16 avril - 21 juillet 2019

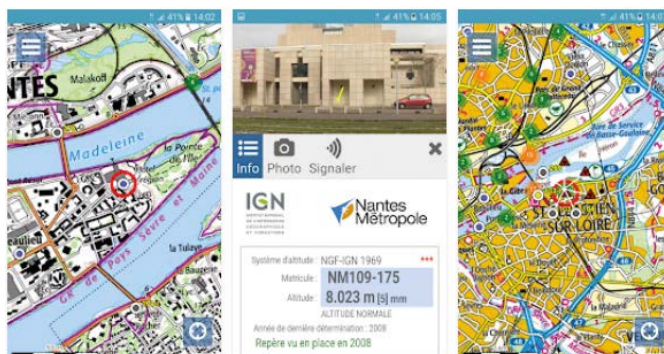
■ Leica Geosystems France change de siège social

Leica Geosystems, filiale du groupe Hexagon, a intégré son nouveau siège social le 22 février 2019 à Nanterre (92). Les interlocuteurs habituels demeurent inchangés, cependant les coordonnées téléphoniques sont modifiées. Les nouvelles coordonnées sont les suivantes :

LEICA GEOSYSTEMS SAS
Immeuble le Navarque
35 avenue de l'Île-Saint-Martin
92000 NANTERRE
Tél. : +33 1 81 93 61 50
Fax : +33 1 81 93 61 51
Centre d'appel : +33 1 81 93 61 61
(Assistance technique et SAV)

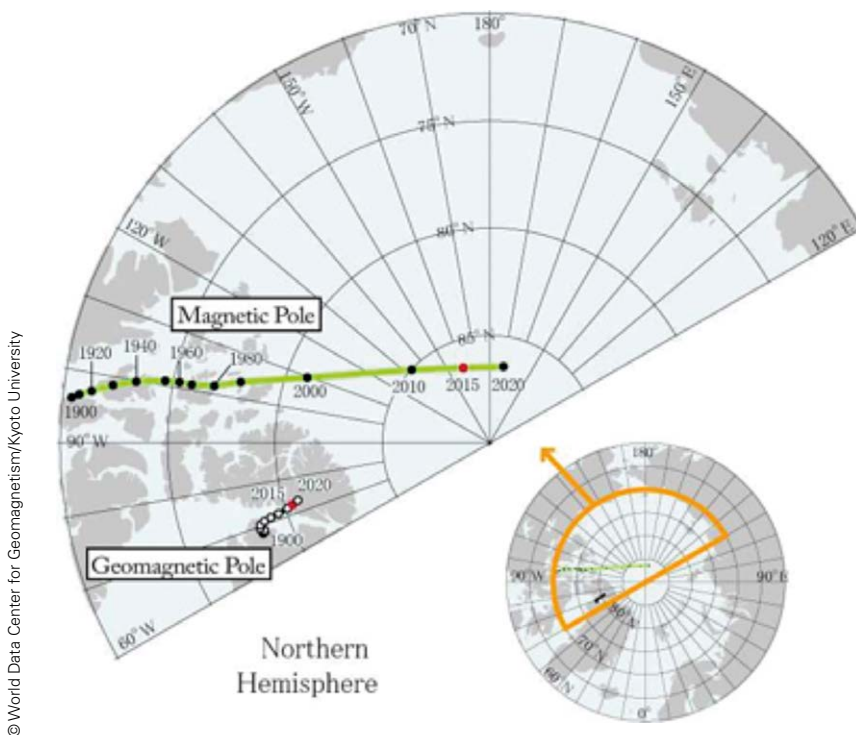
■ Géodésie de Poche : la version 2 de l'application sous Android est disponible

Géodésie de poche est un serveur mobile de fiches signalétiques de points géodésiques et de repères de nivellement. Cette application IGN est proposée pour compléter utilement le site



des fiches géodésiques et satisfaire l'utilisateur mobile qui est avant tout sur le terrain. Même si la réception est rompue, vos infos sont sauvegardées et vous pouvez travailler hors-ligne. Géodésie de poche permet la consultation de la base de quelque 200 000 points géodésiques et 380 000 repères de nivellement en France métropolitaine et Outre-Mer. L'utilisateur peut en outre signaler des modifications à apporter sur le référencement des points (points détruits, dégradés, vus en place, etc.) et proposer leurs photographies des bornes et repères afin d'assurer aux fiches signalétiques une actualité optimale.

■ Déplacement du pôle Nord magnétique

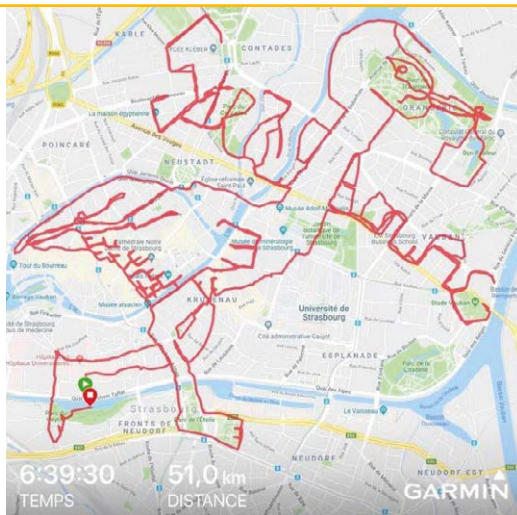


Différents magazines dont Futura Sciences ont relayé l'information sur l'accélération du déplacement du pôle Nord magnétique. Ce phénomène oblige les scientifiques à renouveler précocement le modèle magnétique mondial (*World Magnetic Model* ou *WMM*) décrivant le champ magnétique terrestre, utilisé dans les systèmes de navigation maritime et aérienne. Mis à jour pour la dernière fois en 2015, le modèle devait tenir jusqu'en 2020. La publication de la nouvelle version a été faite en février 2019. Pour le positionnement satellitaire GNSS, la question est posée sur les perturbations possibles. La réponse de Michel Kasser est à lire sur le site de DÉCRYPTAGÉO à l'adresse suivante : <http://decryptageo.fr/le-deplacement-du-pole-nord-magnetique-menace-nos-gps-vrai-ou-faux/>

■ Une cigogne dessinée au GPS – “GPS drawing”

Antoine, ingénieur topographe diplômé de l'INSA depuis septembre dernier, s'est amusé, muni d'un récepteur GPS, à dessiner une cigogne en courant dans les rues de Strasbourg durant 6 h 39 et sur 51 km. Il fait ainsi découvrir le “GPS drawing”, dessin assisté par géolocalisation satellite. La réalisation est présentée sur la chaîne Youtube de l'auteur.

► Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=SgIkulKU7il>



■ L'IGN signe avec l'Andra un accord de collaboration scientifique

Le 28 janvier 2019, l'IGN et l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) ont signé un accord de collaboration scientifique afin de mettre en synergie leurs besoins et leurs savoir-faire dans le domaine de l'information géographique.

Cet accord portera sur plusieurs thématiques autour de la cartographie, de la visualisation 3D et de l'analyse d'imagerie aérienne. Plusieurs projets ont d'ores et déjà été identifiés :

- la modélisation 3D du Laboratoire de l'Andra situé à 500 m sous terre à partir de l'outil iTowns développé à l'IGN ;
- un suivi de l'évolution du paysage sur le territoire autour du centre de l'Andra en Meuse/Haute-Marne afin de détecter les changements paysagers et d'occupation du sol ;
- le suivi de la déformation des terrains en surface dont les couvertures des centres de stockage grâce à des moyens de mesures aéroportés, et l'expérimentation du suivi des déformations des ouvrages du Laboratoire souterrain (galeries) par relevés photogrammétriques.

■ Le BRGM et l'IPGP renforcent leur coopération



Michèle Rousseau, P.-D.G. du BRGM et Marc Chaussidon, directeur de l'Institut de physique du globe de Paris, ont signé le 18 janvier 2019 un premier accord-cadre. Il vise à renforcer la collaboration scientifique entre les deux entités, tant en matière de suivi des risques volcaniques et sismiques que de recherche en géosciences. L'accord-cadre, d'une durée de quatre ans, vise à institutionnaliser une coopération scientifique entre les deux établissements aussi bien sur le plan de la recherche scientifique que de l'enseignement. Elle se traduit par la réalisation d'études, d'analyses et d'exploitations de données acquises dans le cadre de projets de recherche ainsi que par la participation conjointe à des projets européens. Les sujets communs abordés sont multiples et couvrent un large spectre des sciences de la Terre et de l'environnement.

ERRATA

Dans le numéro XYZ 157 à la page 45, la légende de la Figure 2 est Cylindrique conforme.

À la Figure 3 de la page 46, la légende est : Orthodromie (en bleu) et loxodromie (en rouge).

Agenda des manifestations 2019

■ Le 28 mars, Forum de l'AFT au lycée Loritz de Nancy

■ Le 30 mars, colloque bicentenaire de Laussedat au CNAM Paris <http://www.sfmt.fr>

■ Les 2 et 3 avril, BIM World à la Défense, Paris <https://www.bim-w.com/>

■ Du 8 au 10 avril, Commercial UAV Expo à Amsterdam, Pays-Bas – <https://www.expouav.com/europe/>

■ Du 9 au 11 avril, Ocean Business 19 à Southampton, UK <https://www.oceanbusiness.com/>

■ Du 22 au 26 avril, FIG 2019 à Hanoï <http://www.fig.net/fig2019/>

■ Du 13 au 17 mai, European Space Agency's Living Planet Symposium à Milan, Italie – <https://lps19.esa.int/QuickEventWebsitePortal/living-planet-symposium-2019/website>

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

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

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

■ Du 27 au 29 août, quatrième CFPT, “photogrammétrie et télédétection à l'heure de l'IA”, à Rouen <https://cfpt2019.sciencesconf.org/>

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

■ Du 4 au 6 septembre, 7th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS à Zurich, Suisse <https://gssc.esa.int/activities/science-colloquium/>

■ Du 16 au 20 septembre, ION GNSS+ à Miami, Floride, USA <https://www.ion.org/gnss/>

■ Du 17 au 19 septembre, INTERGEO à Stuttgart, Allemagne <https://intergeo.de/intergeo-en/>

■ Du 18 au 20 septembre, Journées de la topographie à l'INSA de Strasbourg – <http://topographie.insa-strasbourg.fr/sujet/journees-de-la-topographie/>

■ Du 4 au 6 octobre, Festival international de géographie à Saint-Dié – <http://fig.saint-die-des-vosges.fr/>

■ Les 16 et 17 octobre, Conférence francophone esri aux docks de Paris <https://sig2019.esrifrance.fr/>

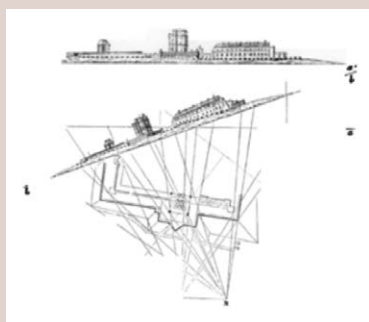
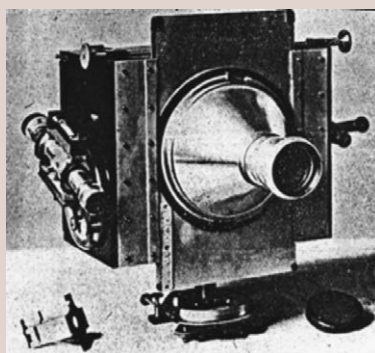
■ Du 2 au 3 décembre, Workshop LowCost 3D 2019 à l'INSA de Strasbourg, en partenariat avec l'AFT <http://www.lc3d.net/>

JOURNÉE DU BICENTENAIRE

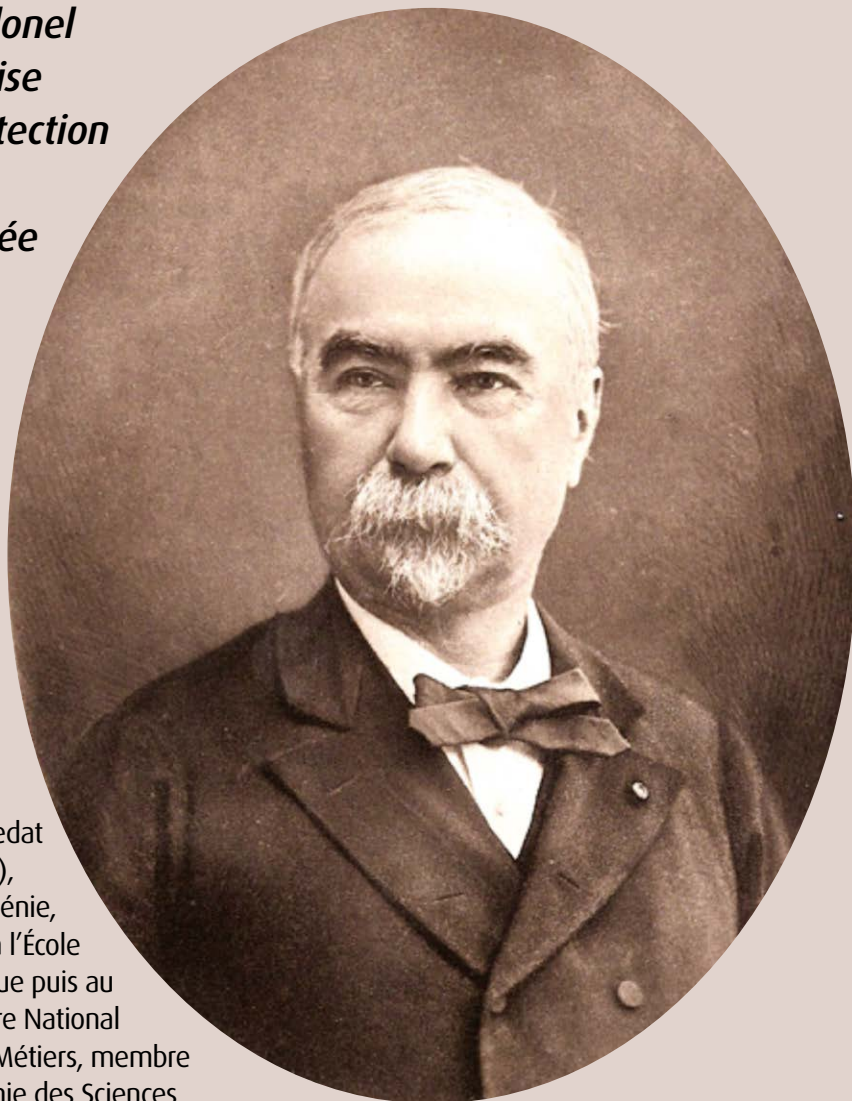
Aimé Laussedat (1819-1907)

Le mardi 30 avril 2019
au CNAM - Amphithéâtre Abbé Grégoire
292 rue Saint-Martin 75003 Paris

À l'occasion du bicentenaire du colonel Aimé Laussedat, la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection et l'Association Française de Topographie organisent une journée en hommage à l'inventeur de la photogrammétrie.

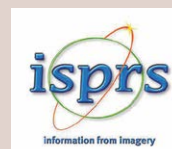


Aimé Laussedat
(1819-1907),
officier du Génie,
professeur à l'École
Polytechnique puis au
Conservatoire National
des Arts et Métiers, membre
de l'Académie des Sciences



Le Conservatoire National des Arts et Métiers, que Laussedat dirigea de 1881 à 1900, accueillera cette journée du bicentenaire

Entrée gratuite - inscription obligatoire
inscriptions : isabelle.grujard@sfpt.fr - tél. : (33) 1 64 15 32 86
plus d'informations sur www.sfpt.fr



Hommage à Franck Perdrizet

À leur tour, l'AFT et XYZ rendent hommage à Franck Perdrizet, ingénieur et géomaticien décédé en novembre 2018. De longue date il était un adhérent de l'association et contribuait à la revue par des articles mettant en valeur son travail de constitution de systèmes d'information géographiques (SIG) au Havre et à Montpellier. Fidèle à XYZ il en gardait jalousement sa collection complète jusqu'à demander le remplacement de quelques exemplaires objets d'un léger dégât des eaux.

Franck Perdrizet a obtenu son diplôme d'ingénieur ENSAIS en 1981 dans la spécialité Topographie. De 1994 à 1998, passionné de photogrammétrie architecturale, il avait travaillé sur plusieurs projets de documentation du patrimoine en collaboration avec le laboratoire de photogrammétrie de l'ENSAIS (devenu INSA). Pierre Grussenmeyer et Samuel Guillemin de l'INSA de Strasbourg se souviennent. Pierre Grussenmeyer, alors jeune enseignant-chercheur, repense à sa première mission de relevés photogramétriques en avril 1994 avec Franck en Grèce centrale pour le compte de l'École Française. À l'époque les relevés étaient encore très complexes avec la mise en œuvre de chambres argentiques de moyen format (Wild P32) ou d'appareils photos de type Reflex d'amateurs ou semi-métriques. Samuel Guillemin a également réalisé plusieurs missions avec lui en Grèce et en Roumanie et multiplié les heures de stéréorestitution sur les systèmes de photogrammétrie analytique du laboratoire de l'ENSAIS avec la production de nombreux plans en support des travaux de Franck Perdrizet en ces deux pays. Ces travaux ont donné lieu à deux publications que l'on peut retrouver dans les archives de l'ISPRS*.

Olivier Banaszak rapporte la suite du parcours de Franck Perdrizet : "Il a rejoint le service SIGU de la ville du Havre en 1998. Sous sa direction le service a



Franck Perdrizet en 2017

engagé un processus d'ouverture des données à l'ensemble des services de la collectivité. Il a notamment permis le développement et la mise en service d'un logiciel de visualisation des données SIG sur Intranet, permettant de rendre les documentations géographiques de référence (plan cadastral, MNT, orthophotoplans, plan de ville...) accessibles à tous. Les outils mis en place ont permis de constituer une plateforme de partage et de diffusion des données géographiques, contribuant ainsi au décloisonnement des services et au développement d'une culture du SIG au sein de la collectivité territoriale. (cf. article XYZ n° 82 consacré au service SIGU de la ville du Havre). En parallèle, Franck a impulsé dès l'an 2000 la création d'une maquette numérique 3D du territoire, laquelle a connu rapidement de nombreux usages en particulier pour l'accompagnement des projets de renouvellement urbain. Son intérêt profond pour l'histoire l'a amené à se pencher aussi sur l'intégration de données historiques dans le SIG, en numérisant et en géoréférençant cartes, plans et photographies aériennes anciennes."

Fabien Blasco actuel directeur Innovation, politiques contractuelles et SIG (DICOsig) Montpellier Méditerranée Métropole où Franck Perdrizet travaillait au moment de sa disparition a salué le "cartographe atypique, passionné par la ville de Montpellier et le patrimoine" et

souligné sa vision : "Il souhaitait notamment mettre au point un memento visuel territorial, capable d'associer l'histoire, le patrimoine et la variété des unités de mesures utilisées à travers les âges et dans le monde pour dire le territoire dans sa plus grande universalité. Comment aussi nous sommes passés de civilisations primitives, agraires et de l'usage du sol à des civilisations qui pensent l'usage du monde de façon dématérialisée. Les constructions et représentations techniques qui accompagnent ces différents âges des sociétés, recèlent des permanences. Il y a consacré beaucoup d'énergie et de travail ces dernières années et son souhait serait que ses réflexions soient poursuivies par des travaux de chercheurs et d'amateurs du domaine."

Cette approche temporelle de la topographie lui avait fait rejoindre le conseil de la société française de photogrammétrie et de télédétection (SFPT).

Ancien président de la SFPT Laurent Polidori a reconnu en Franck Perdrizet un des membres des plus éminents de la communauté nationale des sciences géographiques : "Spécialiste en cartographie numérique et en particulier en imagerie 3D qu'il mettait en œuvre pour la gestion des territoires, dénotant par son érudition et sa hauteur de vue, Franck avait un positionnement assez rare à l'interface entre deux mondes professionnels : les collectivités territoriales et la recherche académique. Il ne ménageait pas ses efforts pour décloisonner ces deux mondes en faisant du Havre et de Montpellier des laboratoires grandeur nature des nouvelles technologies de l'information géographique." ●

* Grussenmeyer, P., Perdrizet, F. (1996). *Archeological Photogrammetry with small format camera: the survey of the forum vetus in Sarmizegetusa (Romania)*. International archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, 9-19 July 1996, Vol. XXXI Part B5, pp. 200-204.

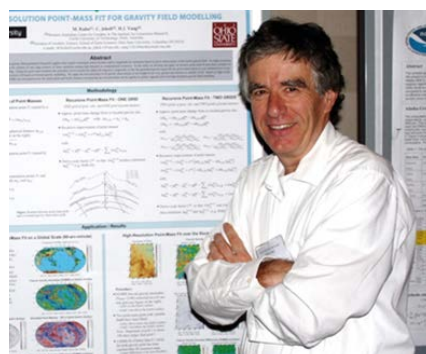
* Perdrizet, F., Grussenmeyer P. (1997). *Multi-scale photogrammetry for archaeology*. International archives of Photogrammetry and Remote Sensing, CIPA Symposium in Göteborg, Sweden October 1-3 1997, Vol. XXXII Part 5C1B, pp. 101-107.

Hommage à Richard Biancale

Richard Biancale, grande figure de la géodésie française, vient de disparaître brutalement le 4 février à l'âge de 66 ans. Après sa retraite du CNES, l'automne dernier, il avait rejoint le GeoForschungsZentrum (GFZ) à Oberpfaffenhofen en Allemagne où il travaillait en compagnie du Dr Frank Flechtner à des méthodes innovantes de traitement des données GRACE-FO.

Richard était diplômé de l'École Spéciale des Travaux Publics de Paris (1976). La même année il avait obtenu un master d'astronomie, mécanique céleste et géodésie ; en 1977 un master d'océanographie et en 1978 soutenu sa thèse de doctorat d'astronomie à l'Université Pierre & Marie Curie. C'est aussi dans cette université qu'il avait passé en 2006 son habilitation à diriger des recherches. Sa carrière professionnelle a débuté en Allemagne pendant son doctorat en tant qu'assistant du professeur Ch. Reigber. Il travaillait sur l'orbitographie précise et le positionnement des stations. Il a ensuite effectué son service militaire à l'Observatoire astronomique de São Paulo en 1979-80 où il a travaillé sur la théorie analytique des satellites galiléens de Jupiter dans l'équipe du professeur S. Ferraz-Mello. En 1981 il rejoint le *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut* (DGFI) à Munich pour travailler sous la supervision du professeur Reigber au projet POPSAT, projet ESA de mission spatiale dédiée à l'étude de la cinématique terrestre. En 1982 il rejoint le Centre de Recherches en Géodynamique et Astrométrie (CERGA) à Grasse dans l'équipe du professeur F. Barlier pour préparer le traitement scientifique des données de l'expérience LASSO, expérience ESA de synchronisation des horloges terrestres installées à bord du satellite SIRIO-2 (expérience malheureusement infructueuse à cause d'un échec lanceur).

Un an plus tard il est engagé au CNES, à Toulouse, dans le département de géodésie spatiale dirigé par Michel Lefebvre, pour travailler sur la définition du nouveau système de positionne-



ment précis DORIS et sur la mission altimétrique TOPEX/Poseidon. Depuis 1984 il était au cœur de la coopération franco-allemande sur la modélisation du champ de gravité terrestre initiée par G. Balmino.

En 1991 il a été *visiting fellow* au *Goddard Space Flight Center* de la NASA (dans la section de géodynamique, à Greenbelt, en compagnie de F. Lemoine) ; il était le représentant CNES dans le cadre de la mission commune franco-américaine TOPEX/Poseidon. Richard a été nommé chef du département de géodésie terrestre et planétaire du CNES en 1992, dans la division de G. Balmino, puis est devenu chef du service de géodésie du CNES en 2005. Dans l'intervalle, Richard avait été en 1993 chef de projet scientifique du satellite géodésique Laser STELLA et avait passé une année (2001-2002) au GFZ à Potsdam pour préparer l'équipe CNES au traitement des données GRACE.

En plus de ses responsabilités de manager au CNES, Richard avait assumé la direction du Bureau Gravimétrique International (BGI) en 2006-2007, avait été président de la section de géodésie du Comité National Français de Géodésie et Géophysique (2008-2012), puis vice-président de la section de géodésie du Comité National Français de Géodésie et Géophysique pour l'UGGI (2012- 2018). De 2008 à 2017 il a été directeur exécutif du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS), qui regroupe 120 chercheurs répartis dans 10 organismes autour de la recherche en géodésie spatiale française.

Une caractéristique de la carrière de Richard est le lien très fort qu'il a entre-

tenu entre le CNES et le GFZ (lien initié par G. Balmino et Ch. Reigber, poursuivi avec P. Schwintzer puis F. Flechtner), avec à la clef une solide et très fructueuse coopération scientifique. Richard était le responsable scientifique de l'accéléromètre STAR, installé à bord du satellite CHAMP, mission qui a ouvert la "décennie d'or" de la géodésie spatiale avec ensuite les missions GRACE et GOCE. CHAMP a permis de se familiariser avec la technique innovante de l'accélérométrie électrostatique qui sera utilisée dans les missions suivantes. Richard et son équipe, en coopération étroite avec l'équipe de la Section 1.2 du GFZ *Global Geomonitoring and Gravity Field*, ont travaillé à améliorer les standards de traitement et les modèles utilisés pour produire les modèles EIGEN (*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*) du champ de gravité statique et variable de la Terre. Richard était un membre très actif des équipes scientifiques GRACE et GRACE-FO.

Richard et ses collègues du GRGS et du GFZ participèrent également aux efforts déployés pour essayer d'atteindre les objectifs du *Global Geodetic Observing System* (GGOS) visant à établir un système de référence terrestre (TRF) précis et stable. Parmi les projets les plus récents dont Richard était un PI scientifique, soumis au *Earth Explorer Call 9* de l'ESA, figurent E-GRASP (*European Geodetic Reference Antenna in Space*), E-MOTION et MOBILE. Ces dernières années il s'est beaucoup investi dans un projet qui lui tenait particulièrement à cœur : l'établissement d'une station géodésique fondamentale à Tahiti regroupant sur un même site les quatre techniques de géodésie spatiale – SLR, DORIS, GNSS, VLBI. Richard était l'auteur ou co-auteur de nombreuses publications dans des journaux scientifiques de premier plan ; il a enseigné la géodésie pendant plus de 20 ans dans différentes écoles d'ingénieurs, universités ou au cours de formations spécifiques (écoles d'été du GRGS, écoles d'été brésiliennes, EuroSAE...) ; il a été l'encadrant de 16 doctorants et post-doctorants. ●

G. Balmino et J.-M. Lemoine



Colloque G2 2018 à Montpellier

■ Nicolas LE MOIGNE - Séverine ROSAT - Françoise DUQUENNE

Le colloque G2 2018, Instrumentation nouvelle et combinaison d'observations géophysiques, s'est déroulé sur le campus de la délégation CNRS à Montpellier du 12 au 14 novembre. Il a réuni 94 participants au cours de 4 sessions orales et de la session posters.

1. Session imagerie structurale : combinaison d'observations et inversion - 2. Session instrumentation nouvelle et développements méthodologiques - 3. Session processus dynamiques : modélisation et assimilation de données - 4. Session blanche

Le colloque fut l'occasion de faire un tour des derniers développements instrumentaux incluant entre autres l'interférométrie atomique, la sismométrie sous-marine, la gradiométrie, l'accélérométrie, l'inclinométrie, la muographie. Des nouveaux développements méthodologiques ont été en outre présentés dans le cadre des applications GNSS, marégraphiques, gravimétriques, interférométriques radar, ionosphériques et sismologiques. Ce colloque a mis en évidence la vivacité de la recherche en géodésie-géophysique au service de la connaissance de la forme de la Terre et de ses déformations.

Le programme détaillé et les présenta-

tions sont disponibles sur le site web <https://www.g2-2018.org/>.

L'ouverture du colloque a été assurée par Pierre Briole [directeur de recherche à l'École normale supérieure, actuel vice-président et à partir de 2019 nouveau président du Comité national français de géodésie et de géophysique (CNFGG)], Eric Servat [directeur de l'Observatoire de recherche Méditerranéen de l'environnement (OREME), nouveau vice-président du CNFGG], Benoît Ildefonse (directeur de Géosciences Montpellier), Anthony Mémin [Maître de conférences à l'université de Nice, membre du bureau de RESIF (Réseau sismologie & géodésique français)].

Ce congrès a permis de réunir un public

varié issu pour beaucoup de laboratoires INSU (Institut des sciences de l'univers) spécialisés en Géodésie et Géophysique, mais également des membres de laboratoires travaillant sur des développements instrumentaux ainsi que des industriels.

La diversité thématique des travaux présentés et des outils utilisés souligne l'importance de ce colloque en tant que lieu privilégié d'échanges entre différentes communautés travaillant sur la Terre et ses déformations.

Le colloque a aussi laissé une large part aux doctorants et jeunes chercheurs issus de différents laboratoires français.

Ce colloque n'aurait pas pu se faire sans le soutien de la DR13 CNRS pour le prêt de l'amphithéâtre et l'accueil ni les aides financières de RESIF, de l'université de Montpellier, de OREME, de Géosciences Montpellier et du CNFGG. Félicitations et merci à la sympathique équipe d'organisation Cécilia Cadio, Cédric Champollion, Nicolas le Moigne. ●

Olivier Reis

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

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

Reinhard Stölzel

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

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

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service

La fédération des géomètres francophones à Rabat au Maroc



Le palais des congrès à Skhirat

Retour à Rabat pour la FGF

C'est avec émotion que les anciens de la fédération des géomètres francophones sont de retour à Rabat. Pour les nouveaux, nous rappelons que c'est le royaume chérifien qui a vu la création de la FGF en 2005. Depuis 2010 les conférences et universités de perfectionnement sont régulières et nous entraînent de Niamey (2010), Ouagadougou (2012), Yaoundé (2013) à Dakar (2014), Cotonou (2015), Abidjan (2016) et dernièrement à Lomé (2018). L'Ordre national des ingénieurs géomètres topographes (Onigt) et son président Khalid Yousfi accueillent au palais des congrès à Skhirat plus de 500 participants de 20 pays. Signe de l'importance donnée à l'évènement par les autorités, le chef du gouvernement Saâdeddine El Othmani introduit la conférence ayant pour thème « Technologies avancées pour des politiques foncières efficaces ». Le président de la FGF, Marc Vander-schueren, après l'accueil des participants et l'annonce du programme, nous

informe des adhésions de la Suisse, du Rwanda et des Comores (voir encart). Il rappelle que la FGF est membre du Réseau des associations de professionnels francophones (RAPF) qui dépend lui-même de l'Organisation internationale de la francophonie (OIF).

Programme des universités

Les quatre Masterclass sont focalisées sur les technologies émergentes et sont menées par Trimble (axe GNSS), ONIGT et NELGA / SLGA (axe politique foncière), Leica Geosystems (axe capture 3D) et de nouveau ONIGT et NELGA / SLGA (axe développement des compétences dans le foncier). Les sessions plénières peuvent être résumées en :

- technologies émergentes et administratives du foncier,
 - bonnes pratiques dans la transformation numérique,
 - instruments juridiques et financiers pour une politique foncière efficace,
 - aménagements et réformes foncières.
- Panel et table ronde ont porté sur le changement climatique et la sécurité des données. Une vingtaine d'exposants était présente lors de ces journées.

En marge des universités...

...mais tout aussi d'actualité, nous avons pu suivre ces actions engagées par la FGF :

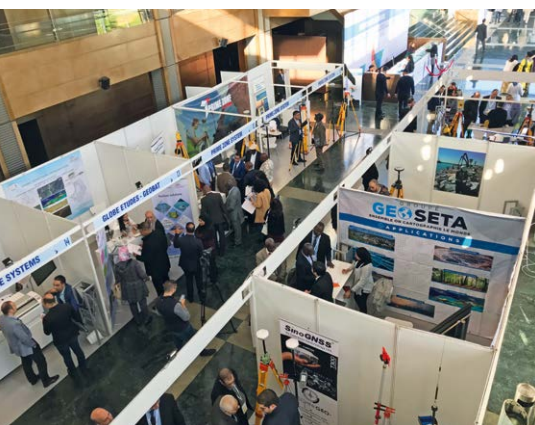
- l'accord entre la FGF et Cobaty international (association internationale de la construction, de l'urbanisme et de l'environnement), un gage de mobilisation de la francophonie dans les instances internationales,
- la constitution d'un collectif des femmes géomètres francophones, qui devrait servir à affirmer leur présence dans la profession,
- la constitution du réseau des jeunes géomètres francophones afin de rejoindre enfin le *Young Surveyors Network* à la Fédération internationale des géomètres.

Rendez-vous en 2019 à Dakar puis à Alger en 2020 et à Québec en 2021, ces deux dernières destinations doivent bien sûr être confirmées. ●

► Pour en savoir plus : <http://www.geometres-francophones.org/evenements/rabat-2018/>

Bernard FLACELIÈRE

Au 1^{er} décembre 2018, les pays, territoires et organismes membres de la FGF sont l'Algérie, la Belgique, le Bénin, le Burkina Faso, le Cameroun, le Canada, les Comores, la Côte d'Ivoire, la France, le Gabon, la Guinée, Haïti, le Liban, Madagascar, le Mali, le Maroc, le Niger, la province du Québec, la République centrafricaine, la République Démocratique du Congo, la République du Congo, la République tchèque, la Roumanie, le Rwanda, le Sénégal, la Suisse, le Tchad, le Togo, la Tunisie, ainsi que l'Union Arabe des Géomètres.



Application de la loi de Benford au contrôle de qualité des modèles numériques de terrain

■ Laurent POLIDORI - Mhamad EL HAGE

La loi de Benford fait le constat empirique d'une régularité dans la distribution statistique du premier chiffre dans de nombreuses séries de nombres (géographie, sport, économie, etc.). Elle a été utilisée pour détecter des fraudes comptables ou électorales. Dans le même esprit, nous avons cherché à l'utiliser comme critère de vraisemblance pour évaluer la qualité des modèles numériques de terrain. Les métriques considérées sont l'altitude, la pente et l'ordre de Strahler.

MOTS-CLÉS

Loi de Benford, MNT, validation

Parmi les données disponibles dans un système d'information géographique, le modèle numérique de terrain (MNT) qui décrit la géométrie de la surface topographique, est particulièrement exigeant en termes de qualité. En effet, il est utilisé pour des applications très diverses, dont il faut concilier les exigences. De plus, il représente une surface familière qui s'offre quotidiennement à la vue, ce qui peut rendre inacceptable le moindre défaut. La plupart des opérations de contrôle visant à évaluer la qualité d'un MNT sont basées sur la comparaison des altitudes du MNT avec des points de contrôle au sol dont l'altitude est censée être connue avec une meilleure précision que celle du MNT. Le problème est que la précision de l'élévation n'est pas le critère de qualité le plus pertinent pour un certain nombre d'applications qui nécessitent souvent des informations sur les pentes et les formes du relief plutôt que sur les positions absolues (Polidori 1995). Dans des travaux antérieurs, nous avons ainsi mis en évidence la possibilité de contrôler également le respect de règles de vraisemblance (El Hage 2012, El Hage et al. 2012, Polidori et al. 2014).

La loi de Benford, qui décrit empiriquement la distribution statistique du premier chiffre dans des séries de nombres, ayant été utilisée comme critère de vraisemblance pour détecter des fraudes comptables ou électorales,

nous nous sommes interrogés sur la possibilité de l'appliquer au relief terrestre, pour évaluer la vraisemblance des modèles numériques de terrain.

La loi de Benford

Dans de nombreux domaines des sciences mais aussi de l'économie, du sport et bien d'autres, on constate dans les séries de nombres que la fréquence d'apparition de N comme premier chiffre décroît rapidement en fonction de N, en suivant approximativement une loi $\log(1+1/N)$, avec 1 dans 30 % des cas, 2 dans 18 % des cas et ainsi de suite (figure 1).

Ce constat empirique est la loi de Benford, du nom du physicien américain Frank Benford qui avait constaté

que les pages d'une table de logarithmes n'avaient pas le même degré d'usure, découverte déjà faite auparavant mais qu'il avait généralisée à d'autres domaines (Delahaye 2007). Cette loi difficilement explicable et pas toujours respectée met en évidence des régularités surprenantes. On retrouve ainsi la loi de Benford dans certaines suites mathématiques. C'est le cas de la célèbre suite de Fibonacci, qui commence par exemple par deux fois le nombre 1, et dont chacun des termes suivants est la somme des deux précédents : 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, etc. Le premier chiffre obéit presque parfaitement à la loi de Benford, une régularité qu'on ne retrouve pas pour le deuxième chiffre (cf. figure 2).

On la retrouve dans un certain nombre de variables naturelles issues du monde biologique ou géophysique, notamment des données géographiques comme les populations des villes ou la longueur des cours d'eau. La loi de Benford semble se vérifier surtout lorsque l'amplitude de variation couvre plusieurs ordres de grandeur, tandis qu'elle ne s'applique évidemment pas lorsque l'amplitude

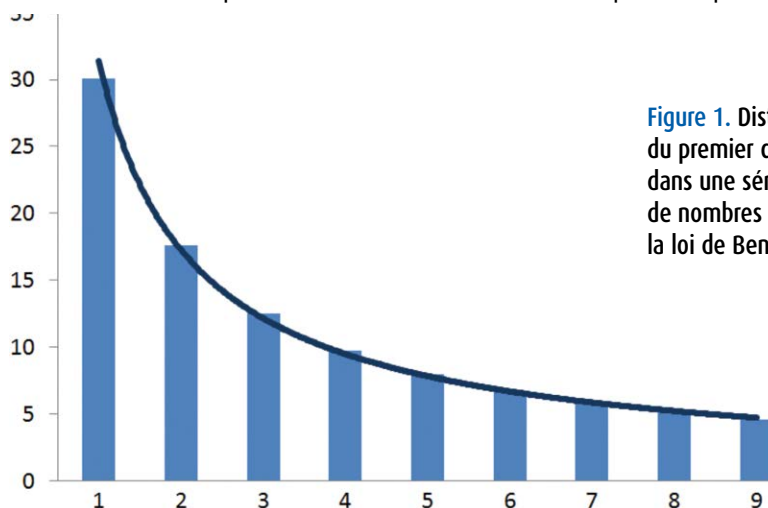


Figure 1. Distribution du premier chiffre dans une série de nombres selon la loi de Benford

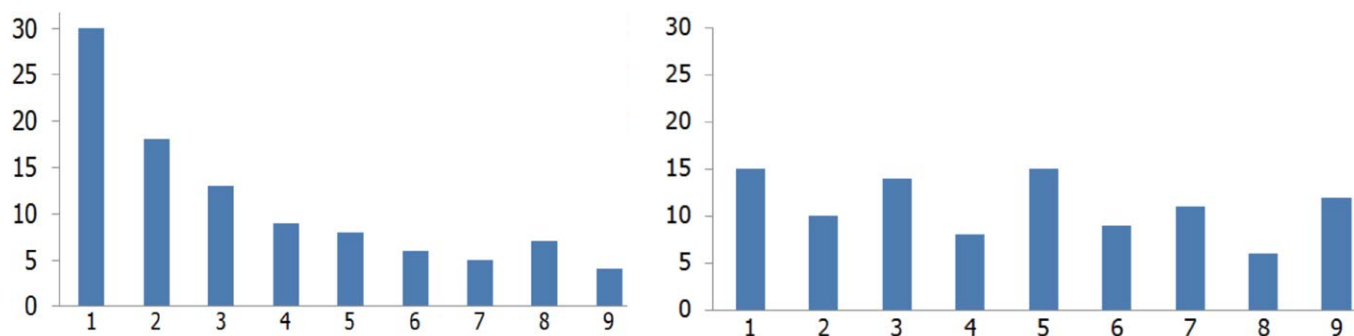


Figure 2. Distribution du premier chiffre (à gauche) et du deuxième chiffre (à droite) dans les 100 premiers termes de la suite de Fibonacci

de variation est naturellement limitée (comme la taille des hommes adultes en mètres, dont le premier chiffre est presque toujours 1, ou la superficie des départements français qui est presque toujours proche de 6 000 km² à la suite d'un découpage planifié du territoire).

Dans ces deux exemples, on peut s'interroger sur l'influence de l'unité choisie (ici m et km²) puisque la valeur numérique en dépend. En réalité, la loi de Benford est invariante par changement d'échelle. Un changement d'unité n'étant rien d'autre qu'un changement d'échelle, le changement d'unité est donc sans effet sur le respect ou non de la loi de Benford.

Recherche de lois logarithmiques dans le relief terrestre

Parmi les variables naturelles pour lesquelles Benford a vérifié le respect de la loi qui porte son nom, on trouve par exemple la longueur des rivières. Cela suggère que le relief terrestre présente des régularités selon la loi de Benford. Les rivières les plus longues sont les moins nombreuses, et cette raréfaction suit une loi logarithmique. Cela n'est pas sans rappeler la propriété d'autosimilarité de la côte bretonne, premier objet étudié par Mandelbrot (1975) pour illustrer la théorie des objets fractals : en mesurant la longueur de cette côte granitique avec une unité de longueur de plus en plus courte (ce qui revient à effectuer un zoom), on fait apparaître des détails de plus en plus petits et on trouve une distance de plus en plus grande, qui croît selon une loi logarithmique. Dans des études anté-

rieures, nous avons cherché à mettre en évidence des régularités dans le relief terrestre, soit pour mieux comprendre l'organisation spatiale de l'hydrographie (Polidori et al. 2014a), soit pour établir des règles de vraisemblance, afin de contrôler la qualité des MNT sans recourir à des points de contrôle (Polidori et al. 2014b). Pour mettre en évidence des régularités au sens de la loi de Benford, nous devons identifier des variables susceptibles d'être extraites d'un MNT et analyser la distribution statistique du premier chiffre, en espérant observer une décroissance logarithmique. Afin d'élargir les possibilités, nous ne nous limitons pas à la loi $\log(1+1/N)$ mais à toute forme de décroissance logarithmique fonction du premier

chiffre de la variable étudiée, ce qui nous permet de conserver l'esprit de la loi de Benford.

Nous avons effectué cette recherche sur un MNT extrait de la base altimétrique Topodata éditée par l'INPE au Brésil (Valeriano & Rossetti, 2012). La base Topodata est caractérisée par une maille de 30 m obtenue par densification du MNT SRTM initialement échantillonné à 90 m. La zone d'étude est située dans le Sud-Est du Brésil et présente un relief varié. Des tests supplémentaires ont été également effectués sur un MNT LiDAR à très haute résolution sur le Gabon.

L'altitude du MNT Topodata varie de 0 à 2635 m. Avec plusieurs ordres de grandeurs emboîtés, il n'est pas

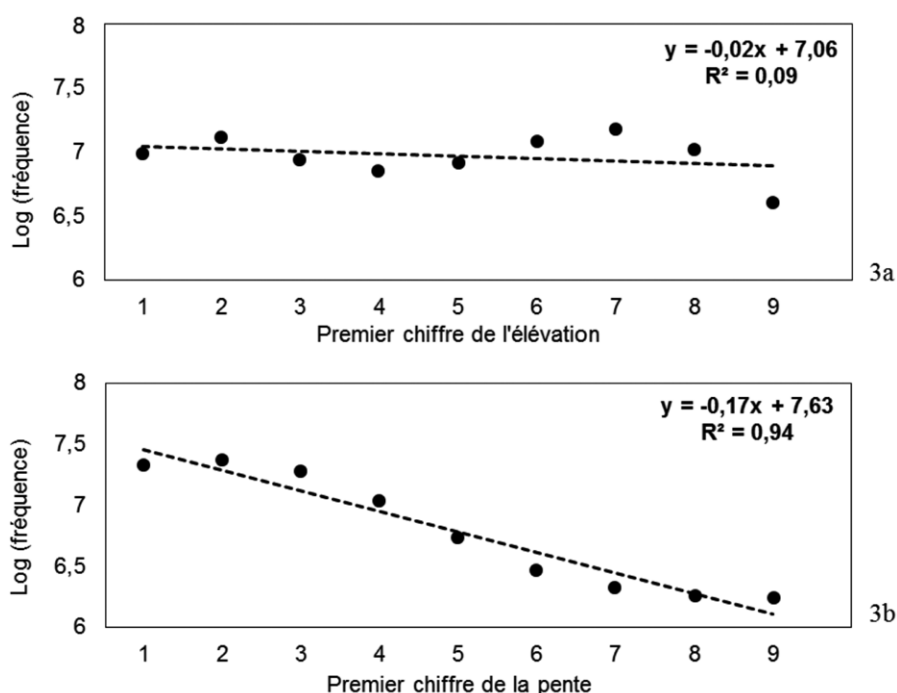


Figure 3. Distribution du premier chiffre des altitudes (3a) et du premier chiffre des pentes (3b) dans un MNT Topodata

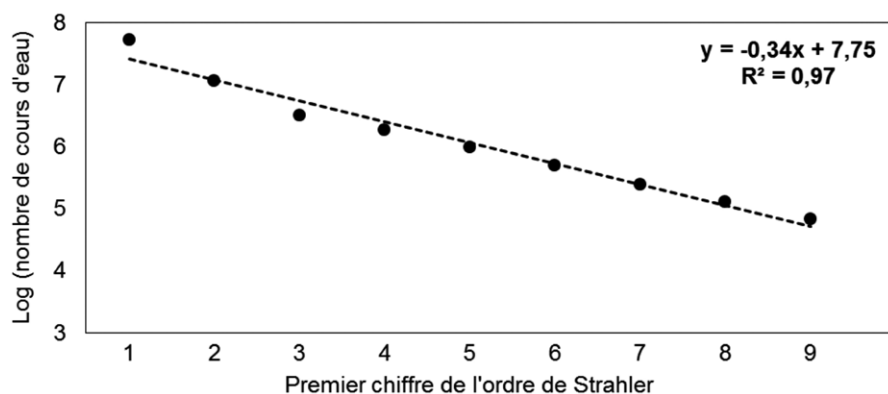


Figure 4. Nombre de tronçons de cours d'eau en fonction du premier chiffre de l'ordre de Strahler (MNT Topodata)

aberrant de se demander si l'altitude respecte la loi de Benford. Les résultats montrent qu'il n'en est rien : plus précisément, aucune régularité n'apparaît dans le premier chiffre de l'altitude (*figure 3a*). On observe une certaine régularité liée à la continuité de la variable d'altitude, mais aucune tendance logarithmique d'ensemble ($R^2=0,09$).

La pente varie de 0 à 527 pourcents (pourcentage défini par la tangente de l'angle entre le sol et le plan horizontal). Contrairement à ce que l'on observe pour l'altitude, le premier chiffre de la pente présente une distribution régulière avec une décroissance logarithmique caractérisée par $R^2=0,94$ (*figure 3b*). Des tests menés sur d'autres MNT mènent à des résultats similaires, jusqu'à $R^2=0,98$ pour un MNT LiDAR à très haute résolution (1 m) dans un bassin versant non anthropisé au Gabon.

La grandeur qui présente la tendance logarithmique la plus forte est l'ordre de Strahler. Dans un réseau hydrographique, chaque tronçon reliant une confluence amont et une confluence aval est caractérisé par un ordre dit de Strahler (Strahler 1952). Un tronçon reliant la source et la première confluence est d'ordre 1. Deux tronçons d'ordre 1 forment un tronçon d'ordre 2. Celui-ci ne change pas d'ordre lorsqu'il est rejoint par des tronçons d'ordre 1, mais sa confluence avec un autre tronçon d'ordre 2 donne un tronçon d'ordre 3, et ainsi de suite. Les tronçons de cours d'eau d'ordre 1 (de la source à la première confluence) sont plus nombreux que les tronçons

d'ordre 2, eux-mêmes plus nombreux que les tronçons d'ordre 3 et ainsi de suite. Cette raréfaction qui est conforme à l'intuition suit une loi logarithmique (*figure 4*) conséquente de la géométrie fractale du réseau hydrographique. Des tests menés sur de nombreux autres MNT conduisent au même résultat, c'est-à-dire à une linéarité presque parfaite.

Application au contrôle de qualité des MNT

La loi de Benford a été utilisée pour détecter des invraisemblances dans des domaines très éloignés de celui qui nous intéresse ici, notamment dans des bilans comptables, permettant de détecter des chiffres trafiqués (Nigrini, 2011). Cette loi empirique a pu permettre, non pas d'identifier avec certitude des erreurs dans des séries de chiffres mais de déclarer suspectes ces séries de chiffres. Dès lors, on est tenté de se demander si elle ne pourrait pas contribuer à décla-

rer suspectes des séries d'altitudes. L'idée est de déterminer une métrique qui a un comportement prévisible au sens de la loi de Benford sur la base d'observations répétées, à laquelle on puisse confronter les données réelles issues d'un MNT.

Si l'altitude est inopérante à offrir un tel critère de vraisemblance, on a vu qu'au contraire la pente est une métrique intéressante qui respecte la loi de Benford. La pente est d'ailleurs une métrique plus sensible que l'altitude aux erreurs du MNT, et la loi de Benford peut détecter une erreur de pente beaucoup plus sûrement qu'une erreur d'altitude. En effet, l'incertitude altimétrique va rarement affecter le premier chiffre de l'altitude sauf si un point à 1000 m, placé 1 m trop bas dans le MNT se retrouve à 999 m, ou si un point à 200 m est placé à 199 m, etc.

On peut donc se demander si le premier chiffre de la pente (ou plus exactement de la tangente de la pente exprimée en pourcents) respecte la loi de Benford, et interpréter un écart significatif à cette loi comme la manifestation d'une qualité dégradée. La *figure 5* montre la distribution de la fréquence de répétition du premier chiffre de la pente (en pourcent) calculée à partir d'un MNT LiDAR très haute résolution (1 m) sur une zone urbanisée. Cette figure montre une régularité à partir de l'ordre 2 avec une valeur de R^2 presque égale à 1. Les pentes ayant 1 comme premier chiffre se trouvent un peu plus fréquentes, ce qui est dû à la présence des bâtiments qui font un angle droit avec les terrains avoisnants, et par conséquent, produisent

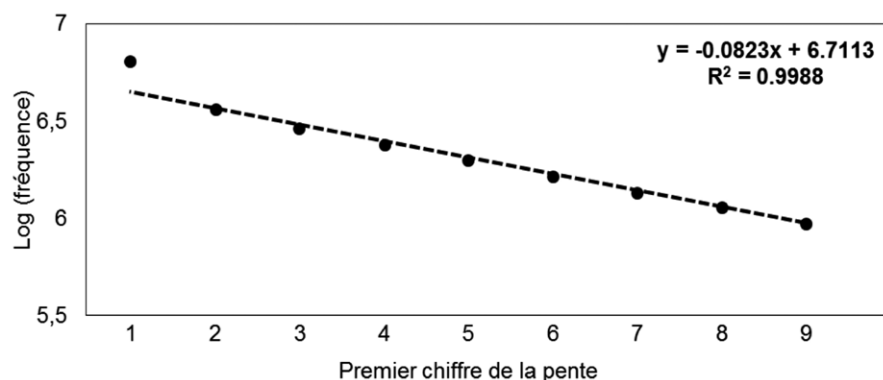


Figure 5. Mise en évidence d'une régularité logarithmique à partir de l'ordre 2 dans la distribution de la pente (MNT LiDAR à très haute résolution)

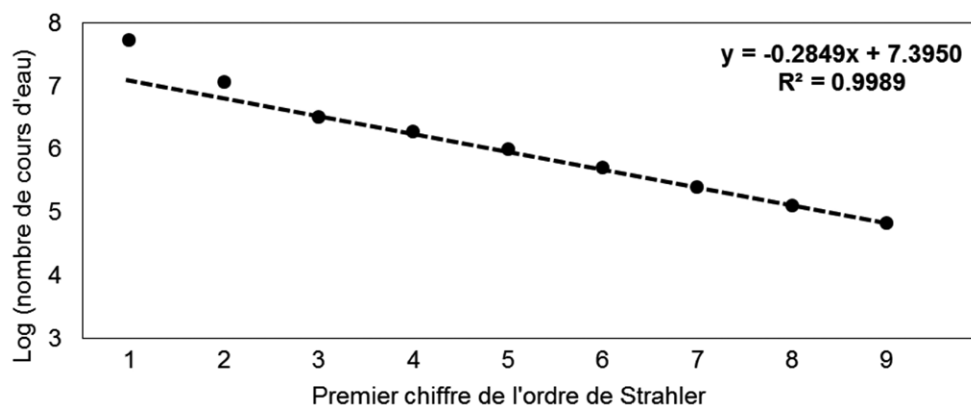


Figure 6. Mise en évidence d'une régularité logarithmique à partir de l'ordre 3 dans la distribution du nombre de cours d'eau en fonction du premier chiffre de l'ordre de Strahler (MNT Topodata)



un nombre élevé de pentes supérieures à 1 000 % (> 84°). Un artefact dû à la présence d'objets artificiels est ainsi mis en évidence.

Le réseau hydrographique présente également presque toujours une régularité que nous avons décrite plus haut, et qui peut être vérifiée en examinant la variation du nombre total de tronçons de même ordre de Strahler en fonction de cet ordre. Pour les ordres les plus élevés, l'effectif réduit peut conduire à des statistiques peu représentatives et à un écart au modèle logarithmique que l'on ne peut pas imputer à la qualité du MNT. Au contraire, les ordres les plus petits (typiquement 1 et 2) correspondent à de petits cours d'eau qui sont plus difficiles à détecter et dont les motifs spatiaux s'expriment aux mêmes fréquences spatiales que les principaux artefacts du MNT (lissage, bruit, anisotropies liées à la structure raster...). La figure 6 reprend les mêmes données que la figure 4 en mettant en évidence un nombre anormalement élevé de tronçons d'ordre 2 et surtout 1, comparativement aux prédictions que l'on peut faire par un modèle logarithmique.

Conclusion

Nous avons présenté une application originale de la loi de Benford qui consiste à interpréter des régularités empiriques comme des critères de vraisemblance pour les modèles numériques de terrain afin d'identifier des défauts. Cette approche est justifiée par l'existence de régularités logarithmiques dans le premier chiffre de certaines variables qui caractérisent

le relief terrestre, notamment la pente et l'ordre de Strahler. D'autres métriques pourraient être étudiées. Bien que ces régularités ne puissent être établies que de manière empirique, le fait qu'elles soient observées dans un très grand nombre de jeux de données permet d'en faire des critères de vraisemblances utiles pour la validation des MNT. Cela vient renforcer la légitimité des méthodes de validation de MNT qui n'utilisent pas de données de référence. ●

Références

- Delahaye J. P. (2007) *L'étonnante loi de Benford*. Pour la Science, p. 90-95.
- El Hage M. (2012) *Étude de la qualité géomorphologique de modèles numériques de terrain issus de l'imagerie spatiale*. Thèse de doctorat, CNAM.
- El Hage M., Simonetto E., Faour G. & Polidori L. (2012) *Evaluation of elevation, slope and stream network quality of SPOT DEMs*. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Melbourne, Australia, Volume 1-2, pp. 63-67.
- Nigrini M. J. (2011) *Forensic Analytics: Methods and Techniques for Forensic Accounting Investigations*. Wiley, 480 p.
- Polidori L., Claden M., Frelat R., El Hage M., Bendraoua F., Doliscar G., Mondesir P., Piard B. & Gaucherel C. (2014a). *Elaboration du référentiel hydrographique d'Haïti à partir d'un MNT ASTER*. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°205, pp. 49-57.
- Polidori L., El Hage M. & Valeriano M.M. (2014b) *Digital elevation model validation with no ground control: application to the*

Topodata DEM in Brazil. *Bol. Ciênc. Geod.*, sec. Artigos, Curitiba, v. 20, no 2, p. 467-479.

Polidori L. (1995) *Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain*. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, N°139, p. 10-19.

Strahler A.N. (1952) *Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology*, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 63, no 11, 1952, p. 1117-1142.

Valeriano M. M. & Rossetti D. F. (2012) *Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data*. *Applied Geography (Sevenoaks, England)*, 32, p. 300-309.

Contacts

Laurent POLIDORI

laurent.polidori@cesbio.cnes.fr
CESBIO, Université de Toulouse, CNES/
CNRS/IRD/UPS/INRA, Toulouse, France

Mhamad EL HAGE

mhamad.elhage@ul.edu.lb
Laboratoire d'Études Géospatiales (LEG),
Faculté de Génie, Université Libanaise,
Tripoli, Liban

ABSTRACT

Benford's law makes the empirical observation of a regularity in the statistical distribution of the first digit in many series of numbers (geography, sport, economy etc.). It has been used to detect accounting or electoral fraud. In the same spirit, we have tried to use it as a realism criterion for digital elevation model quality assessment. The metrics considered are altitude, slope and Strahler order.

Comparaison de MNT à haute résolution issus de techniques laser et photogrammétriques

■ Michel KASSER - Nicolas DELLEY - Stéphane CRETEGNY

Dans le cadre d'une étude génomique de plantes de haute altitude nécessitant des modèles de terrain extrêmement précis, une étude sur les comparaisons de modèles acquis par des outils différents a été menée, ceci dans des sites sans végétation haute. Diverses pistes sont présentées pour expliquer les différences observées.

MOTS-CLÉS

modèle numérique de terrain, photogrammétrie haute résolution, drones, lasergrammétrie.

Introduction

Le projet Genescale a visé à étudier le génome d'une espèce végétale (*Arabis alpina*) qui pousse en altitude (1800-2200 m) dans les préalpes Vaudoises, et d'en corrélérer les variantes avec la micro-topographie. Il est en effet important de pouvoir analyser, au niveau sub-décimétrique, quels sont pour chaque plant qui a été échantillonné : son exposition, l'ensoleillement reçu compte tenu des ombres portées (même par des éléments proches comme des rochers, ou par la topographie plus distante), la durée de son enfouissement sous la neige, les températures, la pluviométrie, l'humidité, etc. Des capteurs météo ont aussi été installés sur une durée d'un an. Il a alors été recherché quelles solutions pouvaient être envisagées pour l'établissement de telles modélisations fines de la topographie à très haute résolution et à faible coût. Pour les drones, seule possibilité envisageable, ce type de site en altitude est très défavorable, compte tenu des vents souvent forts, et de la rapidité de changement de situation météorologique. Le choix s'est porté sur un drone à voilure fixe, capable de voler même avec des vents dépassant les 40 km/h et, peut-être la chance aidant, les vols programmés ont tous réussi du

Figure 1. Situation géographique des quatre sites ayant fait l'objet de l'étude. En orange, le site de La Pare



premier coup. Et puis en cours de route et indépendamment de cette étude, le Canton de Vaud a financé un vol lidar dense sur l'ensemble de son territoire, avec une densité allant de 8 à 12 points par m², ce qui a permis de tenter une comparaison avec les modélisations photogrammétriques obtenues, ceci dans des zones rarement étudiées sous cet angle, avec peu de végétation et sans aucun artefact d'origine humaine (bâtiments, routes, etc.).

Donc de façon annexe au programme de recherche génomique, nous avons mené des comparaisons entre différents procédés d'acquisition de MNT. Nous avons disposé de prises de vues par drone, à pixel sol de petite taille (de l'ordre de 4 cm), sur quatre sites de haute montagne, qui ont été traités avec des paramétrages différents. Le point intéressant est que, compte tenu de la végétation très basse, c'est la même surface qui a été vue et traitée par photogrammétrie et par le lever laser. En effet, les leviers photogrammétriques ne peuvent mesurer qu'une

seule surface, celle qui est apparente en sommet de végétation, alors que le lever laser peut fournir également (dernier écho de chaque tir) la position du sol. Donc en présence de végétation haute, ces deux techniques n'auraient pas été comparables.

Les leviers par drone et les traitements effectués

Pour que l'étude soit ensuite plus facile à généraliser, quatre sites différents des préalpes vaudoises ont été choisis, avec des situations topographiques similaires : La Pare, Col des Essets, Pierredar et Martinets, sensiblement dans les mêmes tranches d'altitudes (cf. Figure 1).

Ils ont fait l'objet de leviers aériens par drone, dans les conditions matérielles suivantes :

- Utilisation d'un drone à voilure fixe eBee de SenseFly, capable de voler de manière autonome, même avec des vents de 50 km/h. Le recouvre-

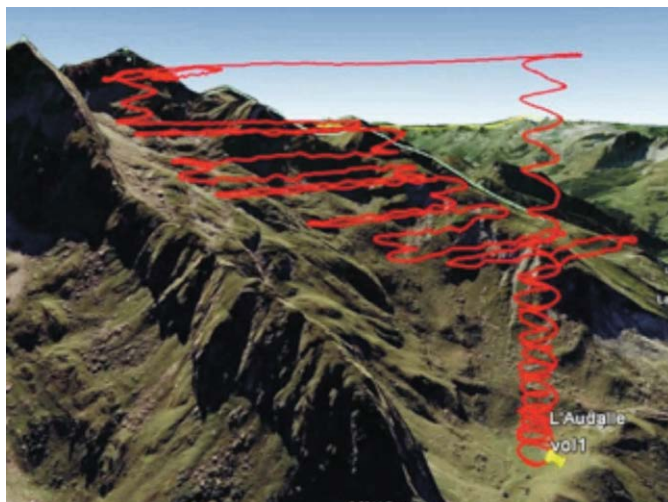


Figure 2. Plan de vol sur le site de La Pare



Figure 3. Mesure d'une marque de peinture d'un sentier balisé en GNSS RTK



ment longitudinal prévu était de 75 %, le recouvrement latéral de 60 %, permettant une bonne stéréoscopie. À chaque fois deux vols ont été effectués, l'un avec une caméra couleur 4 608 x 3 456 pixels et l'autre avec une caméra disposant d'une bande dans l'infrarouge proche, de 4 048 x 3 048 pixels. La hauteur de vol souhaitée étant de 130 m, le plan de vol a été adapté aux importants reliefs (cf. Figure 2), et le pixel sol est ainsi voisin de 4 cm. Malgré la topographie très défavorable, l'atterrissage automatique du drone a permis un fonctionnement nominal pour chaque vol.

- Stéréopréparation par mesure de points d'appui (entre 10 et 25 selon le site), matérialisés par des points naturels, et localisés par GNSS précis en mode RTK, avec un écart-type allant, selon le site, de 2 à 6 cm.
- Calculs de MNT et d'orthophotographies (pour chacune des deux caméras) en utilisant le logiciel Pix4D. Les MNT ont été produits avec une maille de 5, 10, 20 et 50 cm, et les orthophotos au pixel de 10 et 20 cm.

Les mesures laser aéroportées

Les comparaisons approfondies entre méthodes différentes pour l'obtention des MNT ont été menées sur le site de La Pare. Le lever laser a été effectué le 30 juin 2015 entre 8 h et 9 h. Le matériel utilisé était un Lidar Optech ALTM Gemini, de longueur d'onde 1 064 nm. Le plan de vol a permis une altitude

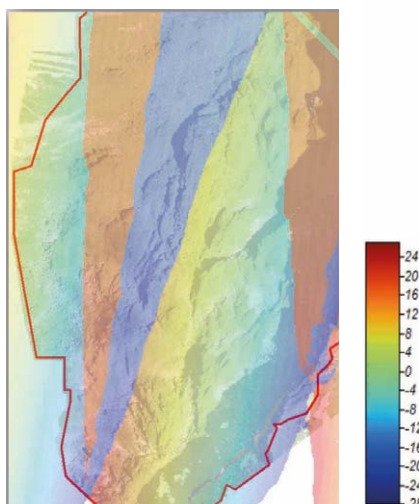


Figure 4. Valeurs d'angles de balayage en degrés

au-dessus du sol de 650 m environ, ce qui, compte tenu de la divergence du laser, représente une tache au sol de 16 cm de diamètre. La densité de mesures varie entre 8 et 12 points

par mètre carré. Par ailleurs, le lidar utilise un angle de balayage de 20° environ de part et d'autre de la verticale. Dans la zone qui a fait l'objet des comparaisons, la carte (Figure 4) met en évidence les valeurs angulaires en degrés du faisceau lors des différentes mesures de distance : le faisceau laser a balayé cette zone à moins de 5° de la verticale.

Les sites choisis pour les comparaisons

Trois types de terrains ont été sélectionnés, sur le site de La Pare (Figure 5), pour mener des comparaisons de MNT : terrain à pente régulière en herbe, terrain avec des pentes fortes ou falaises, terrain rocheux. Ces types de terrain présentent en effet des problèmes de représentation du terrain par un MNT assez différents, et il est intéressant de les étudier en

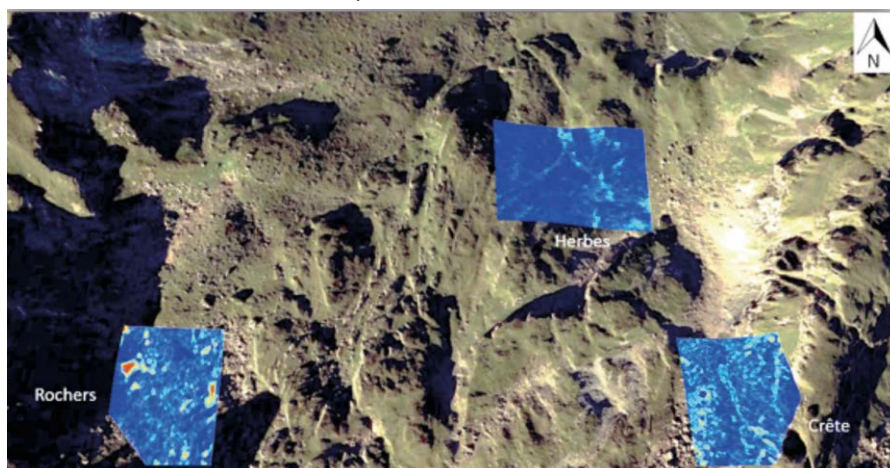


Figure 5. Le site de La Pare, avec les trois zones retenues

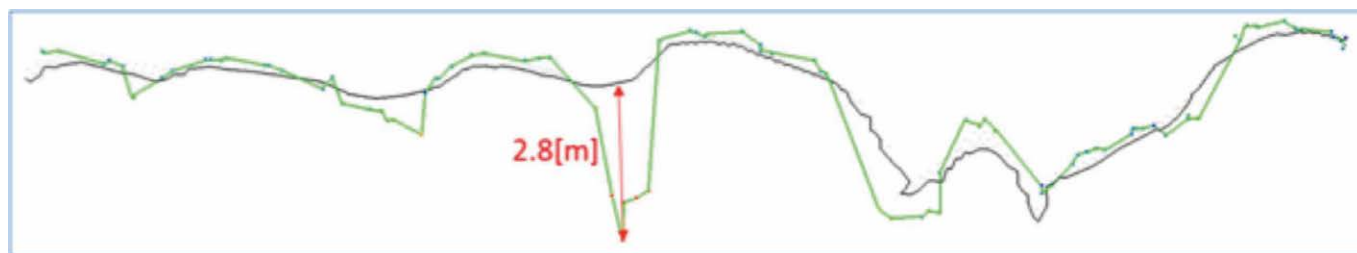


Figure 6. En vert, section du MNT obtenu par Lidar, en noir, par photogrammétrie, dans la zone de rochers. On note de grandes différences : entre les blocs rocheux (le laser descend jusqu'au fond des anfractuosités rocheuses, où le corrélateur photogrammétrique est en échec), et sur les blocs (le Lidar effectue une moyenne et lisse la surface, décrite au contraire très finement par photogrammétrie).

disposant des mesures extrêmement détaillées qui ont été acquises.

Analyse des écarts obtenus

■ Problème général de la comparaison de MNT

La comparaison de MNT est un problème géométrique complexe, qui peut se simplifier dans certains cas. Par exemple, lorsque deux modélisations d'un terrain sensiblement horizontal sont comparées, une statistique sur les écarts selon la composante verticale z est une solution simple mais suffisante. Par contre, lorsque la forme du terrain s'écarte significativement de l'horizontale, les incertitudes sur la localisation planimétrique x, y des points comparés interviennent d'autant plus que la pente est forte, de sorte qu'un défaut général de mise en référence planimétrique intervient directement dans le résultat, alors que ce n'est qu'un artefact. Pour des surfaces complexes, on peut utiliser la distance de Hausdorff. Dans tous les cas, il faut gérer la différence de densité de points de mesure entre les deux ensembles de points comparés. Ici les comparaisons entre MNT ont été effectuées en utilisant les outils disponibles dans le logiciel open source CloudCompare.

■ Comparaisons de MNT

Le MNT, par définition, représente le sol, débarrassé du sur-sol : habituellement, végétation haute et constructions diverses. Ici pas de végétation haute ni de constructions, mais un problème supplémentaire, qui ne nous concerne que parce que nous cherchons une grande précision et parce que nous sommes en altitude : celui de la neige. Nos levés photo-

grammétriques ont logiquement été effectués lorsque plus aucune neige n'est présente. Mais les données laser, à leur date d'acquisition plus précoce, montrent la présence résiduelle de neige sur plusieurs parties du terrain. Cette neige est bien détectée lors de la comparaison des MNT laser et photogrammétrie, et ceci est validé lors de l'analyse des images acquises simultanément au lever laser. Et comme lors des acquisitions d'images par drone il n'y avait plus de neige, nous avons pu éliminer facilement cet effet sans intérêt lors de nos comparaisons ultérieures.

Une première classe de différences entre MNT laser et photogrammétrie est liée à la technologie laser. D'une part la mesure se fait, pour un écho donné, sur une zone unique couvrant environ deux décimètres carrés. Dans cette zone, la mesure de distance est effectuée comme la moyenne des distances des zones diffusantes élémentaires éclairées par le laser, moyenne pondérée par l'albedo de chacune de ces surfaces. Ce phénomène bien connu engendre des artefacts à la périphérie des zones de rochers. En effet, l'albedo des rochers est toujours différent de celui de la végétation rase qui les entoure. En outre, le faisceau laser n'est pas strictement vertical, et certains échos sont ainsi localisés sous d'autres points acquis sur un rocher par exemple. Donc la modélisation du terrain par lever laser ne peut pas être décrite par un vrai modèle en 3D, mais plutôt par du 2.5 D, soit une seule valeur de z pour une position horizontale x, y (cf. Figure 6).

Une seconde série de différences est liée au fonctionnement du corrélateur photogrammétrique. À l'intérieur d'une

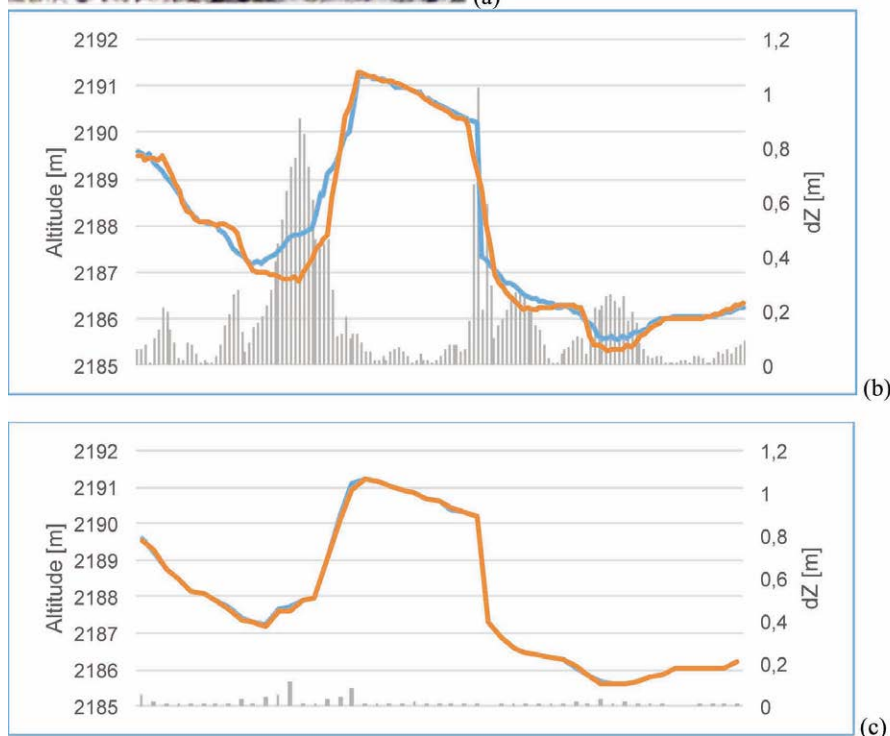
image aérienne, le contraste entre les zones exposées au soleil et les zones à l'ombre dépend principalement de deux facteurs, (i) la diffusion atmosphérique, et (ii) l'angle solide sous lequel est vu le ciel depuis la zone à l'ombre considérée.

- (i) La diffusion atmosphérique est composée de la diffusion Rayleigh (diffusion par les molécules de l'air, en λ^{-4} , visible surtout dans la partie bleue du spectre) et de la diffusion de Mie, due aux aérosols (poussières, gouttelettes d'eau de toutes tailles). Plus l'altitude est élevée, plus la diffusion de Mie est réduite. Dans les zones étudiées, vers 2000 m d'altitude, elle est donc très faible. Il en résulte que les zones à l'ombre, qui ne sont éclairées que par la diffusion atmosphérique, sont très sombres par comparaison à ce qu'on observerait au niveau de la mer.
- (ii) Les zones d'image qui sont formées par l'ombre d'un rocher ne reçoivent qu'une partie de la diffusion renvoyée par le ciel, typiquement entre le quart et la moitié, compte tenu de la géométrie du terrain.

Le résultat est que les images ont un contraste particulièrement élevé, bien davantage que lors d'acquisitions sur des terrains à basse altitude. Dans les zones sombres, la dynamique de l'image est ainsi très réduite, et donc le rapport signal/bruit est mauvais. Ce sont donc des zones où le corrélateur va fréquemment converger sur des maxima faux. Ces fautes locales sont ensuite lissées par calcul. On observe alors des erreurs qui seront différentes selon la taille du pixel final retenu pour le calcul du MNT, et selon la version du logiciel (dont les options de lissage des résultats de la corrélation sont diffé-



Figure 7. Exemple de la coupe A-A' effectuée dans un secteur rocheux. (a) image du terrain, (b) différence des MNT à pas de 5 cm (bleu) et 20 cm (brun) pour des versions différentes de Pix4D, (c) avec la même version. On note que les principales erreurs entre versions différentes du corrélateur photogrammétrique sont dans des zones à l'ombre.



rentes). Ici les comparaisons ont porté sur les MNT à 5 cm et 20 cm, et on peut noter (cf. Figure 7) :

- Les écarts peuvent devenir importants dans des zones à l'ombre (où le corrélateur fonctionne mal compte tenu du bruit élevé).
- Les écarts sont souvent bien plus importants si des versions différentes (et donc des paramétrages différents) du logiciel photogrammétrique sont employées.

Conclusions et aspects pratiques

Il est actuellement extrêmement intéressant d'utiliser un drone pour acquérir des prises de vues aériennes à taille de pixel très réduit. Le coût des images est très faible, et pour des pixels de quelques cm, c'est en outre

la seule solution disponible. Et on peut en obtenir un MNT à pas extrêmement fin (maillage 5 cm dans notre cas, avec une précision de même valeur) en utilisant un logiciel commercial peu onéreux. Pour des acquisitions sur des sites de ce type, en altitude, nous avons pu montrer que des drones rapides à voilure fixe permettaient d'atteindre tous les résultats attendus malgré des conditions d'environnement difficiles, et sont pleinement satisfaisants pour ces types d'études génomiques corrélées avec la micro-topographie.

Par contre, il faut être conscient de l'aspect peu intuitif de la qualité pouvant être obtenue dans un paysage naturel en montagne. En effet, les résultats optimaux ne seront pas obtenus par beau temps avec un soleil haut dans le ciel (proche de son passage au méridien). Dans ces périodes, le contraste dans les

images sera très élevé, et les zones à l'ombre ont alors toutes raisons d'être mal traitées par le corrélateur photogrammétrique. Les situations les plus adaptées impliquent un éclairage diffus bien plus important, par exemple sous un couvert nuageux ou avec le soleil bas sur l'horizon. Dans ces conditions, les seules zones dans lesquelles le MNT ultrafin obtenu pourra présenter des fautes, parfois importantes, sera dans des zones réduites encaissées entre des blocs. Par comparaison, un lever laser aéroporté implique actuellement l'emploi d'un avion, donc sa hauteur de vol est nécessairement élevée ainsi que sa vitesse, ce qui implique une tache éclairée de taille au moins décimétrique. Le MNT obtenu ne peut donc pas être de résolution ou de précision (au moins un décimètre) aussi intéressantes qu'avec le drone photogrammétrique. Par contre, aucune zone vue depuis l'avion ne lui sera invisible, y compris des zones très encaissées entre des blocs rocheux. Et bien évidemment, le coût en est considérablement plus élevé. Ceci pourra évoluer lorsque des Lidars légers seront davantage disponibles, pouvant voler sur drone. ●

Remerciements

Cette recherche a été financée par le Fonds National pour la Recherche Scientifique Suisse (GeneScale; CR3213_149741/1).

Contacts

Michel KASSER, Nicolas DELLEY, Stéphane CRETEGNY
HEIG-VD, Institut Insit, consortium GENESCALE (<https://www.wsl.ch/en/projects/genescale.html>)
michel.kasser@gmail.com

ABSTRACT

As part of a genomic study of high altitude plants requiring extremely accurate terrain models, a study on comparisons of models acquired by different tools was conducted, in sites without high vegetation. Various possibilities are presented to explain the observed differences.

Numérisation et modélisation 3D du Jardin d'Hiver du Musée de la Faïence de Sarreguemines

■ Valentin GIRARDET

En 2017, la Ville et les Musées de Sarreguemines ont pris la décision de modéliser et numériser le Jardin d'Hiver du Musée de la Faïence de Sarreguemines, les objectifs étant d'archiver ce patrimoine mais également de le mettre en valeur. Des méthodes topographiques, photogrammétriques et lasergrammétriques ont permis de réaliser la modélisation. Quant à la mise en valeur, elle s'est faite par l'intermédiaire de la réalité virtuelle selon différents moyens et sous de multiples formes. Les défis de ce projet ont été divers. Tout d'abord, il s'agit de trouver la meilleure chaîne de traitement pour modéliser au mieux la faïence, un matériau très réfléchissant. Aussi, pour des questions d'esthétisme, des traitements d'images ont été opérés. Enfin, comme les modèles sont volumineux, il a fallu trouver des méthodes afin de les réduire.

■ MOTS-CLÉS

Modélisation 3D, photogrammétrie, lasergrammétrie, patrimoine culturel, faïence, format RAW, maillage, traitement d'images, géoréférencement, smartphone, réalité virtuelle, surbrillances, impression 3D

liser en trois dimensions une pièce remarquable et emblématique de son Musée de la Faïence, le Jardin d'Hiver (Figure 1). Cet édifice, considéré comme une vitrine du prestige de l'entreprise et des savoir-faire développés, a été construit en 1880 sur la propriété de Paul de Geiger, le directeur de la manufacture. Dans ce Jardin d'Hiver, il est possible d'admirer, entre autres, deux allégories représentant le feu et la terre (symboles dont la fusion a permis de créer l'Art céramique à Sarreguemines), deux vues de Sarreguemines, des vases et une fontaine, la pièce la plus remarquable. Les objectifs de ce projet sont de :

- parvenir à modéliser le Jardin d'Hiver dans son intégralité avec un rendu esthétique satisfaisant pour pallier à toute éventualité comme une destruction ou un déplacement du site (conservation du patrimoine) ;
- réfléchir à des moyens de visualisation ludiques et virtuels et à la mise

Contexte de l'étude

La Ville de Sarreguemines est située dans le département de la Moselle (57) en Lorraine. Elle fait partie du bassin de vie de Moselle-Est et jouxte la frontière allemande. Sarreguemines compte environ 45 000 habitants pour l'aire urbaine et 22 000 pour la ville intra-muros [Sarreguemines, 2018]. Elle a fait sa réputation dans l'industrie faïencière au XIX^e siècle, ce qui lui vaut le nom de Cité des Faïences (Musée de la Faïence, 2018). A l'époque, le directeur de la manufacture de faïence régnait en maître sur son entreprise et avait un pouvoir certain sur la ville. En effet, la faïencerie employait plus de 3 000 personnes, ce qui est considérable pour une petite ville de 15 000 habitants. A la fin du XIX^e siècle, la faïence était exportée dans le monde entier jusqu'en Chine. Aujourd'hui, plusieurs sites en rapport avec ce passé sont remarquables. Il s'agit entre autres du Moulin de la Blies, qui contient le Musée des techniques faïencières, du Jardin des

Faïenciers, du Casino de la Faïencerie, d'un ancien four et du Musée de la Faïence.

Aujourd'hui, à des fins d'archivages et touristiques, la Ville et les Musées de Sarreguemines souhaitent modé-



Figure 1. Jardin d'Hiver de Sarreguemines (www.sarreguemines-museum.eu)



en valeur des modèles adaptés aux attentes du musée afin d'en faire profiter le public (visite virtuelle interactive en immersion, vidéos, espace numérique interactif, impressions 3D).

Des méthodes photogrammétriques et lasergrammétriques modernes seront exploitées pour construire le modèle du Jardin d'Hiver. Toutes les données seront géoréférencées pour être rattachées aux systèmes de coordonnées nationaux (RGF93-CC49 en planimétrie et NGF-IGN69 en altimétrie). Le défi à relever est de numériser de la faïence, un matériau très réfléchissant qui occasionne des surbrillances sur les prises de vues ainsi que du bruit dans les nuages de points. Pour ce qui est du volet visualisation, diverses expérimentations avec un système de réalité virtuelle seront entreprises.

Travaux antérieurs

La modélisation du Jardin d'Hiver a commencé en octobre 2017 au cours du Projet de Recherche Technologique. Le but était de tester les techniques lasergrammétriques et photogrammétriques sur le matériau réfléchissant que constitue la faïence. Par ailleurs, des tests de superposition de données de sources différentes (laser fixe/laser mobile et laser/photo) ont donné satisfaction quant à la possibilité de fusionner celles-ci pour tirer profit des avantages de chaque technique et combler le manque d'informations par endroit.

Il en a été conclu que la photogrammétrie fonctionne dans des conditions spécifiques (minimum de reflets, grande focale, distance courte, nombre de photos important, minimum de relief) et qu'elle sera un atout pour modéliser les objets remarquables du Jardin d'Hiver et pour appliquer les textures. Quant à la lasergrammétrie, elle fonctionne relativement bien pour acquérir de grands espaces et de grands volumes de données. Elle sera préconisée pour modéliser l'ensemble du Jardin d'Hiver mais également pour suppléer la photogrammétrie sur les objets remarquables si nécessaire.

État de l'art

L'état de l'art établi durant ce projet rend tout d'abord compte de ce qui se fait déjà en lasergrammétrie et en photogrammétrie sur la faïence. La clé est avant tout d'essayer de maîtriser les conditions lumineuses [Tucci et al. 2015] et d'homogénéiser la lumière pour éviter les réflexions spéculaires en photogrammétrie [Nicolae et al., 2014]. Pour des raisons techniques (grandes verrières), la quantité de lumière entrant dans le capteur n'a pas pu être régulée, ni homogénéisée. En revanche, l'appareil photo (Canon EOS 5DSR) a été choisi de sorte à pouvoir prendre des clichés au format RAW et retoucher les images après-coup. En lasergrammétrie, plus l'intensité de la lumière est élevée, plus la pénétration du laser est profonde dans le matériau [Guidi et al., 2009], ce qui peut provoquer des biais dans la mesure de distance ainsi qu'une augmentation du bruit dans le nuage de points. Le choix du scanner laser s'est tourné vers le Faro Focus 3D X 330, pour sa précision (0,5 mm à 25 m), sa vitesse de numérisation (976 000 points/s), sa portée (330 m) et surtout sa masse (5,2 kg) qui offre une bonne maniabilité de l'appareil sur les terrains difficiles, notamment s'il est nécessaire de scanner en hauteur. De plus, il utilise un système de mesure à balayage de phase adapté aux objets peu éloignés, ce qui est le cas. Le scanner à main Faro Freestyle 3D est quant à lui employé dans les endroits difficiles d'accès avec le Focus.

Le second axe important des recherches bibliographiques a porté sur les moyens de mise en valeur des modèles 3D du patrimoine culturel. La réalité virtuelle semble être un très bon moyen pour y parvenir. En effet, elle offre la possibilité de mettre en place des visites virtuelles interactives en immersion ou sans immersion, ce qui permet de transmettre des informations culturelles de manière ludique. Pour Kersten et al., (2018), l'immersion est le meilleur moyen de mettre en place des visites virtuelles. Toutefois, trois piliers doivent être respectés pour que la réalité virtuelle fonctionne dans le patrimoine culturel. Il s'agit de la narration, de la présence et de la ludification.

A l'issue des recherches, trois solutions ont été dégagées et pourraient intéresser le Musée de la Faïence afin de promouvoir le Jardin d'Hiver. Il s'agit tout d'abord de la mise en ligne des objets remarquables sur la plate-forme Sketchfab. Cette plate-forme offre une bonne qualité d'affichage des modèles avec ou sans lunettes de réalité virtuelle et elle est facile d'utilisation. En revanche, la taille des modèles est limitée à 50 Mo pour un compte gratuit, ce qui limite son utilisation. La deuxième solution est l'immersion en 3D dans le nuage de points du Jardin d'Hiver sur SCENE à l'aide du système HTC Vive. Dans ce mode, il est possible de faire des études de précisions et de visualiser de grandes zones. En revanche, la qualité visuelle est globalement moyenne et on ne peut pas encore intégrer de modèles à proprement parler. La dernière solution est la visite virtuelle interactive à l'aide d'un moteur de jeux vidéo comme Unreal Engine. Elle permet de modéliser selon ses envies la visite et offre une bonne qualité de visualisation. Toutefois, la construction de cette visite est réservée à une catégorie de personnes initiées, car il s'agit d'un outil très technique et donc long et fastidieux pour les non-initiés. Dans tous les cas, le système HTC Vive disponible sera sollicité pour ces expérimentations.

Modélisation lasergrammétrique de l'ensemble du Jardin d'Hiver

■ Acquisitions

Pour produire le modèle 3D, il a fallu procéder à diverses mesures et acquisitions. Dans un premier temps, un canevas de neuf points d'appui a été implanté autour du musée dans le but de géoréférencer le futur modèle. Huit points sur neuf ont été mesurés avec une antenne GNSS Leica Viva qui donne en temps réel les coordonnées des points dans les systèmes planimétrique et altimétrique voulus. Sept stations de polygonation ont ensuite été faites avec une station totale Leica TS02 pour relier ces points entre eux et pour permettre la mesure de points à l'intérieur du Jardin d'Hiver. Au total, cinquante-sept points d'appui ont pu être mesurés à l'intérieur

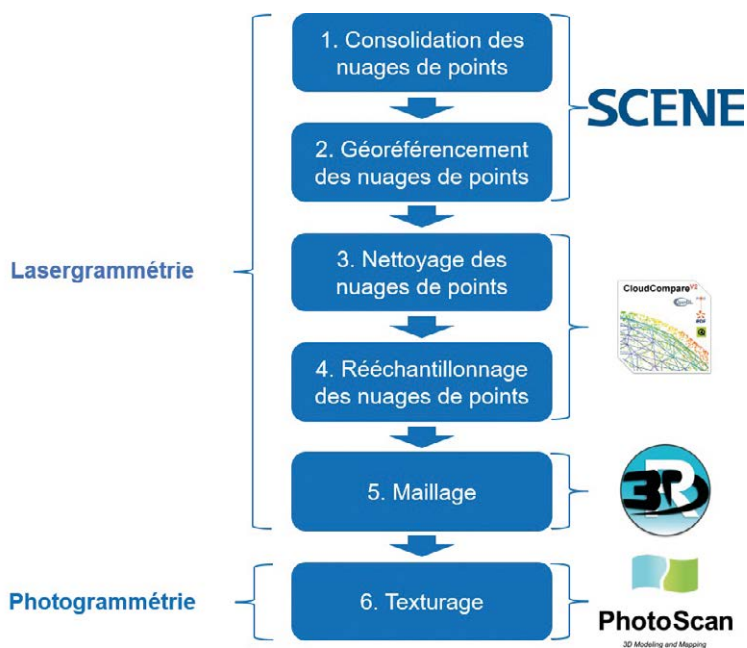


Figure 2. Chaîne de traitements pour la modélisation du Jardin d'Hiver

et à l'extérieur du Jardin d'Hiver (dont quarante et un sur la fontaine, dix au sol et six sphères). Tous ont été calculés par recalage Helmert 2D en planimétrie et par recalage manuel en altimétrie. Afin d'obtenir une texture de qualité, des photos au format RAW ont été prises avec l'appareil photo reflex à raison de trente-quatre photos par objet remarquable et de cent quatorze photos pour la volumétrie. Enfin, une quarantaine de balayages laser répartis en cinq missions de terrain ont été nécessaires pour disposer de l'intégralité de Jardin d'Hiver en nuages de points. Pour arriver au modèle 3D final, une chaîne de traitements spécifique a été construite (Figure 2).

■ Consolidation et géoréférencement

La première étape de cette chaîne consiste à consolider les nuages de

points entre eux, c'est-à-dire les placer correctement les uns par rapport aux autres. Cela se fait par l'intermédiaire de sphères que le logiciel SCENE reconnaît automatiquement ou par l'intermédiaire de points caractéristiques. La tension moyenne entre les sphères trouvée ici est de 1,7 mm, soit dans la précision constructeur du scanner qui est de 2-3 mm.

Puis, il faut les géoréférencer à l'aide des coordonnées obtenues par les mesures tachéométriques. Pour ce faire, un fichier CSV contenant les coordonnées planimétriques dans le système RGF93 en projection – CC49 et altimétriques en NGF-IGN69 a été intégré.

■ Nettoyage et rééchantillonnage

Ensuite, il s'agit de nettoyer les nuages de points, c'est-à-dire enlever tous les parasites qui ont pu se glisser dans les nuages (objets, personnes, points faux,

bruit). Pour ce faire, des filtres sont présents dans les logiciels pour ôter les points faux mais également segmenter les nuages. La segmentation consiste à sélectionner manuellement la partie indésirable à supprimer (Figure 3).

Les nuages ont été rééchantillonnés à 1 mm pour disposer d'une densité de points homogène. Cela permet de conserver les détails tout en allégeant le nuage et en le rendant utilisable pour les prochaines étapes de traitement CloudCompare, le logiciel libre de traitement de nuages de points développé par EDF a été employé pour effectuer ces tâches.

■ Maillage

L'étape suivante est celle de la construction du modèle 3D appelée aussi maillage. Il s'agit de solidifier le nuage de points. Afin de faciliter la manipulation des données, le Jardin d'Hiver a été subdivisé en 6 grandes parties, elles-mêmes subdivisées en 10 sous-parties. Le logiciel commercial 3DReshaper, spécialisé dans le maillage et la production de modèles 3D, a été utilisé pour le maillage du Jardin d'Hiver. Le résultat souhaité s'obtient en affinant un maillage grossier, en le lissant et en corrigeant les défauts manuellement à l'aide des outils contenus dans 3DReshaper. A la fin, il faut bien sûr assembler toutes les grandes parties ensemble pour ne former qu'un seul bloc (Figure 4).

■ Texturage

Enfin, la dernière étape du processus consiste à texturer le modèle en appliquant les images acquises avec l'appareil photo reflex. L'opération ne s'est pas faite en un seul bloc. Les fichiers modèles des objets remar-

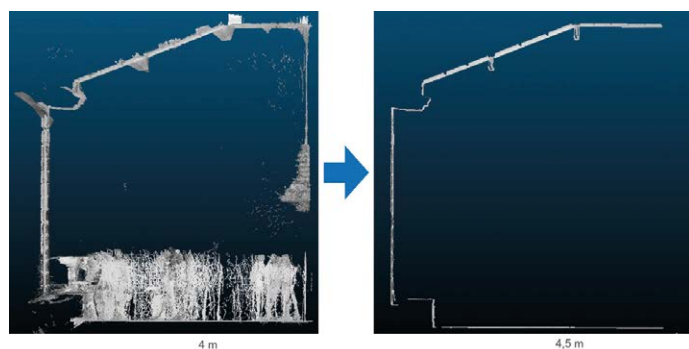


Figure 3. Nuage avant segmentation (à gauche) et après segmentation (à droite)

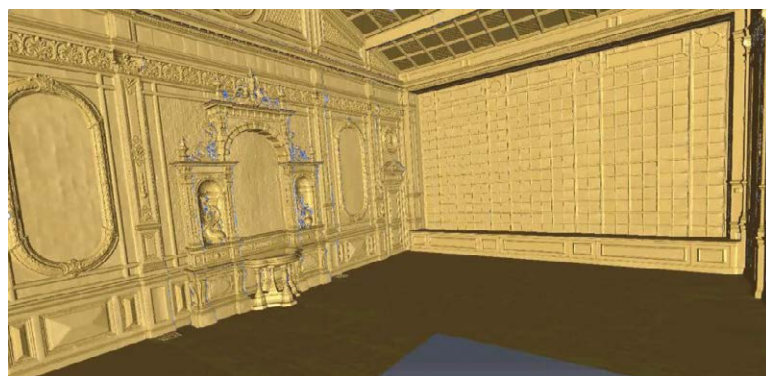


Figure 4. Modèle maillé final du Jardin d'Hiver



quables et de la volumétrie au format OBJ ont été importés séparément dans le logiciel PhotoScan. La texture géoréférencée et calculée au préalable a ensuite été appliquée. Il faut veiller à choisir une taille de texture suffisamment élevée pour conserver un maximum de détails et suffisamment basse pour ne pas alourdir inutilement les modèles. Une taille de 10 000 x 10 000 pixels a été choisie pour les objets remarquables ainsi qu'une taille de 40 000 x 40 000 pixels pour la volumétrie. Pour cette dernière, le choix n'a pas été laissé par l'ordinateur car celui-ci refusait de calculer une texture plus grande. Toutefois, le résultat est quand même satisfaisant du point de vue du détail (Figure 5).

■ Réduction des modèles

La lourdeur des fichiers est le principal inconvénient des modèles maillés texturés. Deux moyens de réduction ont alors été testés (Tableau 1). Le premier est la fonction "Réduire" de 3DReshaper reposant sur un critère de déviation. De façon empirique, celui-ci a été réglé sur 10^{-5} m afin de réduire le modèle sans affecter les formes. Une réduction de 25 % du modèle au format RSH (propre à 3DReshaper) a été obtenue contre seulement 9,5 % au format OBJ standard. Les résultats visuels montrent un maillage assez peu affecté par la réduction et une uniformisation du modèle. En revanche, la réduction est trop faible au format OBJ pour être vraiment profitable. Une autre méthode de réduction a alors été expérimentée. Il s'agit de l'outil "Quadric Edge Collapse Decimation" de MeshLab. Cette fonction avait fait ses preuves dans [Caron, 2017] et repose sur le critère du nombre de triangles à



Figure 5. Modèle texturé final du Jardin d'Hiver

conserver. Après plusieurs expérimentations, il a été déduit qu'elle ne convenait finalement pas aux attentes, car même si elle confère les mêmes avantages que la fonction "Réduire" de 3DReshaper, elle ne réduit la taille du fichier OBJ que de 11,5 % pour 50 % de triangles en moins. Ce type de réduction a en plus un fort impact sur la texture, car plus elle est forte, plus la texture est dégradée. Par conséquent, elle a été écartée.

Pour contourner un temps le problème, le format de fichier FBX, plus optimisé, a été utilisé pour les divers exports et imports.

Photogrammétrie sur les objets remarquables du Jardin d'Hiver

Dans le but d'améliorer les modèles, des expérimentations photogrammétriques ont été effectuées sur les objets remarquables.

■ Tests par smartphone

Le développement de la photogrammétrie par voie de smartphone est croissant

depuis ces dernières années grâce à l'intégration de capteurs photo et de composantes annexes de plus en plus performants.

Au cours de ce projet, des tests photogrammétriques par smartphone ont été faits en prenant des photos et des vidéos à l'aide d'un stabilisateur afin de disposer des photos les plus nettes et les vidéos les plus fluides possibles. Un test photo et un test vidéo ont été réali-

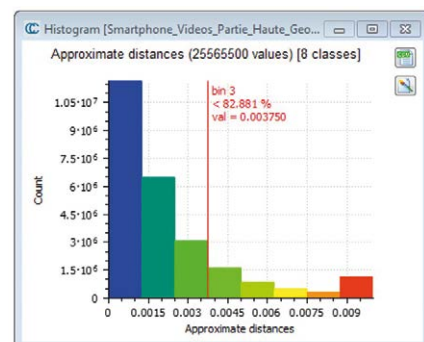
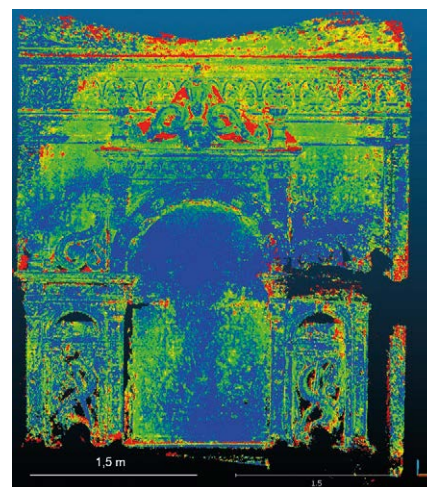


Figure 6. Histogramme du nombre de points en fonction de la distance point laser-point photo (à droite) et carte 3D associée (à gauche)

Outil	« Réduire » 3DR	« Quadric Edge Collapse Decimation » MeshLab
Paramètre	Déviation (10^{-5} m)	Nombre de triangles (50%)
Réduction	RSH : 25% (2,3 Go → 1,8 Go) OBJ : 9,5% (2,3 Go → 2,2 Go)	11,5% (521 Mo → 461 Mo)
Avantages	Maillage non affecté (visuel) Uniformisation	Maillage non affecté (visuel) Uniformisation
Inconvénients	Peu de réduction au format OBJ	Texture dégradée

Tableau 1. Méthodes de réduction de modèle

sés sur le poisson gauche ainsi qu'un test vidéo sur le haut de la fontaine. Sur ce dernier test, 172 photos ont pu être extraites de la vidéo grâce au logiciel PhotoModeler à raison d'une image par seconde. Après un processus classique de modélisation par voie photogrammétrique sur PhotoScan, le rendu obtenu est assez intéressant avec une bonne qualité de texture. La précision n'est pas non plus en reste. En effet, en comparant le nuage de points photogrammétrique ayant servi à construire le modèle avec le nuage lasergrammétrique de référence sur CloudCompare, la moyenne des écarts apparents est de 2,3 mm, l'écart-type est de 2,3 mm et plus de trois-quarts des points ont un écart inférieur à 3 mm, la précision théorique des points du nuage laser (Figure 6). Ce qui est satisfaisant pour un test par smartphone. Par conséquent, comme il y avait des carences de texture sur le haut de la fontaine du fait qu'il n'était pas possible de prendre des photos avec l'appareil reflex à cette hauteur, la texture smartphone a été exploitée pour la compléter.

■ Traitement d'images par programmation

Le traitement d'images est étudié ici dans le but de corriger la texture des modèles. Il peut se réaliser soit par programmation (sur Matlab par exemple) avec des algorithmes développés par des chercheurs ou soit avec des logiciels spécialisés, open source si possible (GIMP).

A l'aide de Matlab et de ses boîtes à outils de traitement d'images, une égalisation d'histogramme a été appliquée sur les photos RAW du bas de la fontaine prises avec le Canon pour les rendre plus claires car celles-ci étaient trop sombres (Figure 7). Le but est de supprimer les différences entre le haut texturé avec le smartphone et le bas texturé avec le Canon.

■ Traitement d'images par logiciel spécialisé

Comme la texture de la fontaine comportait encore des carences ou des défauts dus au manque de photos à certains endroits ou à des erreurs dans l'application de la texture, le traitement par logiciel spécialisé directement sur le fichier texture du modèle a été expérimenté. Avec l'outil de clonage

Figure 7. Fontaine sans prétraitement d'images (à gauche) et fontaine avec égalisation d'histogramme (à droite)

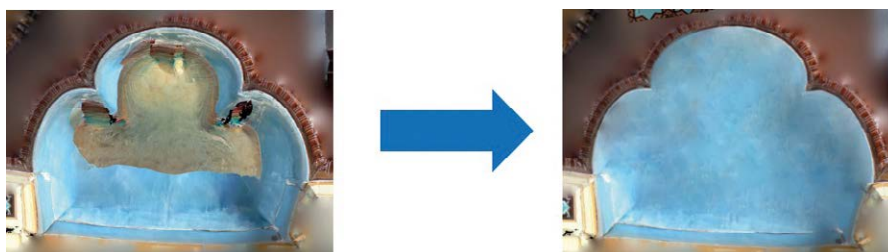


Figure 8. Vasque de la fontaine avant correction (à gauche) et après correction (à droite)

de GIMP, la texture de la vasque a pu être reconstruite (Figure 8) et avec l'outil de sélection et de copie de motif, les défauts du damier situé derrière les volutes ont pu être corrigés. Il est même possible de reconstituer la tendance lumineuse d'origine avec les réglages de luminosité et de contraste. Cette technique présente l'avantage de retoucher la texture autant de fois que l'on veut après le traitement. Elle est également pratique pour corriger les gros défauts visibles facilement. En revanche, elle ne l'est pas du tout pour les petits défauts car un fichier texture est une mosaïque de textures désordonnées. Il faut par conséquent un travail de longue haleine pour ne serait-ce que repérer où se situe chaque défaut dans la texture. Ces opérations sont fastidieuses et le résultat n'est pas toujours très esthétique.

Visualisation (réalité virtuelle)

Après avoir monté de toutes pièces les modèles lasergrammétriques texturés du Jardin d'Hiver et des objets remarquables, l'objectif est ensuite de

les mettre en valeur grâce à différents moyens de visualisation.

■ Mise en ligne de modèles sur Sketchfab

Le premier moyen trouvé est d'importer les modèles des 9 objets remarquables au format FBX sur la plate-forme en ligne Sketchfab. De cette manière, la condition des 50 Mo a pu être respectée.

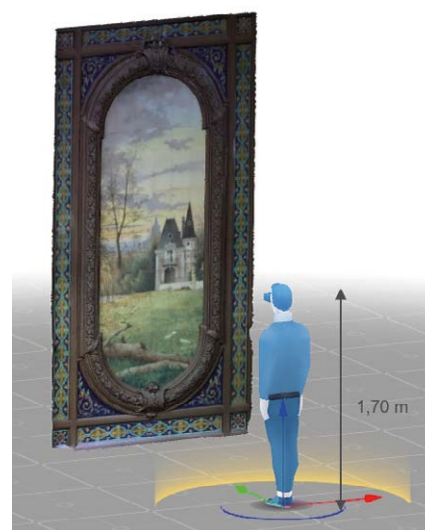


Figure 9. Paramétrage du mode réalité virtuelle pour le modèle du Pavillon de Rendez-Vous



Figure 10. Immersion dans le nuage du Jardin d'Hiver sur SCENE

Des réglages peuvent être opérés sur la lumière pour rendre le modèle fidèle à la réalité et pour qu'il soit agréable à regarder. Dans les options concernant la réalité virtuelle, l'échelle peut être ajustée sur 1 pour permettre à l'utilisateur de se rendre compte de la taille réelle de l'objet (Figure 9).

■ Immersion dans le nuage sur SCENE

La deuxième solution de visualisation est d'utiliser le nuage de points consolidé du Jardin d'Hiver et de ses abords pour créer une immersion à l'aide d'un système de réalité virtuelle. Le logiciel SCENE et le système HTC Vive ont permis de la réaliser (Figure 10). L'immersion a été mise en œuvre en consolidant les nuages entre eux avec la méthode nuage-nuage puisque aucune sphère n'avait été placée à l'intérieur du Jardin d'Hiver. Les résultats de cette consolidation offrent une moyenne des écarts de 1,3 mm avec 79 % des points ayant un écart inférieur à 4 mm, ce qui est plutôt satisfaisant compte tenu du fait que les balayages laser utilisés proviennent de différentes campagnes

d'acquisitions et que la partie extérieure avait été fixée en coordonnées.

■ Visite virtuelle interactive sur Unreal Engine

La troisième option de visualisation est de mettre en place un scénario de visite virtuelle dans le modèle texturé du Jardin d'Hiver avec un moteur de jeux vidéo capable d'outrepasser le problème du volume des fichiers. L'aspect interactivité a pris une place importante puisque des boutons ont été créés pour offrir la possibilité à l'utilisateur de consulter des informations concernant les différents objets remarquables du Jardin d'Hiver et l'histoire de ce dernier (Figure 11). Le système HTC Vive a également été réglé sur Unreal Engine afin de permettre l'interaction entre le modèle et l'utilisateur et de programmer le déplacement dans la pièce.

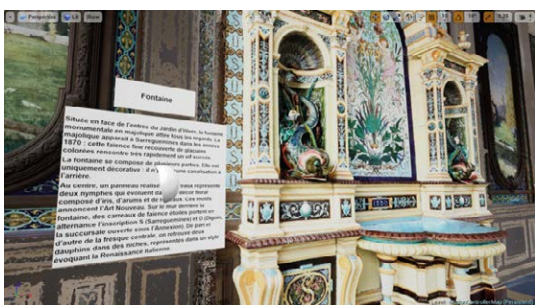


Figure 11. Disposition du bouton par rapport à la fontaine



Figure 12. Impression 3D du poisson gauche de la fontaine

■ Impressions 3D

Pour finir avec ce chapitre visualisation, la récente imprimante 3D du laboratoire d'imagerie 3D de l'INSA de Strasbourg a pu être testée. Le poisson gauche de la fontaine et la fontaine ont chacun fait l'objet d'une impression (Figure 12). Cette technologie en plein développement permettra à l'avenir de faire découvrir la culture différemment par le toucher pour les personnes aveugles ou pour les enfants par exemple.

Conclusion

Ce projet a permis de poursuivre et de terminer les travaux de modélisation et de numérisation du Jardin d'Hiver de Sarreguemines entamés durant le PRT grâce à une chaîne de traitements sollicitant un quatuor de logiciels (SCENE, CloudCompare, 3DReshaper, PhotoScan). L'obstacle que constituait la modélisation d'un matériau aussi réfléchissant que la faïence a été contourné en tirant profit des avantages de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie. Les tests photogrammétriques ont donné de bons résultats tant du point de vue du visuel que de la précision. La texture du haut de la fontaine a d'ailleurs pu être complétée grâce à ces tests. Les traitements d'images, que ce soit par programmation ou par logiciel spécialisé, ont quant à eux permis d'améliorer considérablement la qualité de la texture du modèle.

Outre la conservation du patrimoine, le PFE a également été l'occasion de tester divers moyens de mise en valeur et de visualisation de ce patrimoine pour en faire profiter le grand public. Deux visites virtuelles interactives ont pu être réalisées : une dans le nuage de points et une dans le modèle. Ces outils permettront d'alimenter le futur espace numérique qu'envisage de développer le Musée de la Faïence avec l'appui de la Ville de Sarreguemines.

Dans le futur, de plus nombreux travaux de modélisation pourraient être entrepris. En effet, d'autres monuments en rapport avec l'industrie faïencière jalonnent la ville comme le four, le Casino de la Faïencerie ou encore le Moulin de la Blies. Un circuit touristique virtuel verrait alors le jour avec comme



thématique l'histoire de la faïence à Sarreguemines. Il serait intéressant de chercher à automatiser certaines étapes du procédé de modélisation lasergrammétrique, car celui-ci est particulièrement long et fastidieux. Par ailleurs, d'autres méthodes de réduction des modèles seraient pratiquées comme la création de modèles hybrides constitués de primitives géométriques pour les parties sans détails particuliers et pour les éléments répétitifs. Pour terminer, il faudrait sans doute améliorer le déplacement de l'utilisateur avec les contrôleurs du système de réalité virtuelle sur Unreal Engine pour plus de fluidité. ●

Remerciements

L'auteur remercie chaleureusement tous les acteurs du projet. Céleste Lett (maire de Sarreguemines), Jean-Claude Cunat (adjoint à la culture), Julie Kieffer (directrice des Musées de Sarreguemines, directrice du projet), Olivier Reis (traducteur à Sarreguemines, initiateur du projet), Pierre Grussenmeyer (professeur des Universités, encadrant du projet), Samuel Guillemain (technicien de recherche, contributeur du projet), et Emmanuel Moisan (ingénieur de recherche, contributeur du projet).

Contact

Valentin GIRARDET
valentin.girardet.54@gmail.com

Bibliographie

Caron, P. (2017) *Modélisation 3D du souterrain de Naours et exploitation des données de la base de données Graffiti avec QGIS*, Mémoire de Projet de Fin d'Études, INSA Strasbourg, pp. 1-69.

Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Spinetti, A. (2009) 'Range sensors on marble surfaces: quantitative evaluation of artifacts', *Proceedings of SPIE on Videometrics, Range Imaging, and Applications X*, 7447, pp. 744703-12. doi: 10.1117/12.827251.

Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., Deggim, S., Lindstaedt, M. (2018) 'Step into Virtual Reality — Visiting Past Monuments in Video Sequences and as Immersive Experiences',

MDPI, Basel, Switzerland, pp. 192-219.

Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F. (2014) 'Photogrammetry applied to problematic artefacts', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5 (2014 ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy), pp. 451-456. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014.

Sarreguemines (2018) *Situation géographique de Sarreguemines Ville de Sarreguemines*. Available at: <http://www.sarreguemines.fr>.

Tucci, G., Bonora, V., Conti, A., Fiorini, L. (2015) 'Benchmarking Range-Based and Image-Based Techniques for Digitizing a Glazed Earthenware Frieze', *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3 (2015 25th International CIPA Symposium 2015, 31 August – 04 September 2015), pp. 315-322. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W3-315-2015.

ABSTRACT

Key words: 3D modelling, photogrammetry, lasergrammetry, cultural heritage, earthenware, RAW format, meshing, image processing, georeferencing, smartphone, virtual reality, highlights, 3D printing

In 2017, the Town and the Museums of Sarreguemines decided to model and digitize the Winter Garden of the Earthenware Museum of Sarreguemines. The objectives were to archive this cultural heritage but also to emphasize it. Topographic, photogrammetric and lasergrammetric methods allowed to realize the modelling. As for the enhancement, it is realized through the virtual reality according to different means and different forms. The challenges of this project were diverse. First of all, it was about to find the best processing chain to model the earthenware, a very reflecting material. Also, for questions of aestheticism, image processing was operated. Finally, as the models are voluminous, it was necessary to find methods to reduce them.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre,
professeur associé, ENSTA Bretagne,
Brest

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

CLÉDAT Emmanuel,
doctorant, EPFL (Suisse)

HULLO Jean-François,
Dr.-Ing., ingénieur de recherche,
EDF Energy, Royaume-Uni

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA
Strasbourg

LEQUEUX James,
astronome émérite à l'Observatoire
de Paris

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène,
ingénieur recherche, ENSTA Bretagne,
Brest

MOREL Laurent,
professeur des universités, ESGT
Le Mans

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier,
ingénieur, traducteur Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval, Québec

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

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

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

Mise en place de procédures automatisées pour les reports topographiques en milieu ferroviaire à partir de données photogrammétriques et LiDAR acquises par drones

■ Marion HINAUX

L'optimisation de la production des livrables topographiques (plans topographiques vectoriels, extraction de données métier, etc.) en milieu ferroviaire constitue aujourd'hui un enjeu important pour ALTAMETRIS, filiale de SNCF Réseau. En effet, si les méthodes de levé actuelles par LiDAR et photogrammétrie permettent d'acquérir rapidement de grandes quantités de données, leur traitement est complexe et long et nécessite des optimisations. Cette étude s'inscrit dans le cadre des recherches d'automatisation de ces procédures et plus précisément dans la phase de report des données. Les travaux réalisés ont permis d'établir un bilan de la chaîne de traitement mise en place et d'en identifier les points à améliorer. Une nouvelle méthode de report automatisée a été testée, les techniques d'extraction et de contrôle d'un logiciel de report développé en interne optimisées et le processus de traitement établi et validé.

MOTS-CLÉS

LiDAR - photogrammétrie - drones - nuage de points - emprises ferroviaires - report - automatisation

Introduction

En tant que gestionnaire du réseau ferré national français, SNCF¹ Réseau est en charge de la maintenance et de l'entretien d'environ 30 000 km de voies ferrées. Elle doit en effet garantir le bon état et si besoin le renouvellement de l'ensemble du réseau. Dans ce contexte, ALTAMETRIS, qui a pris la suite du pôle Drones SNCF Réseau, apparaît comme un pilier majeur de la surveillance des voies. En tant que filiale de SNCF Réseau, elle intervient pour répondre aux besoins des projets de topographie, de contrôle et de maintenance sur l'ensemble des infrastructures du réseau ferré national.

Mon étude s'inscrit dans le cadre des missions topographiques et plus précisément dans la phase de report

des données (Figure 1). L'amélioration des procédures de production des livrables topographiques représente un enjeu important pour ALTAMETRIS. En effet, si les méthodes de levé

par LiDAR² et photogrammétrie permettent aujourd'hui d'obtenir assez facilement des nuages de points et ortho-images, la difficulté réside principalement dans le traitement de ces données très denses visant l'extraction d'informations spécifiques propres à chaque métier (documents vectoriels simplifiés, tableaux de valeurs, etc.) et utiles pour leurs travaux d'étude (réfection de plan de voie, analyse d'ouvrage, etc.). L'amélioration de ces méthodes est donc un axe de développement prioritaire pour l'entreprise. Ses objectifs sont multiples :

- Gain de temps.
- Homogénéisation des méthodes de travail et des livrables.
- Diminution des risques d'erreurs.

² *Light Detection and Ranging* : technique de mesure de la distance basée sur l'analyse d'un faisceau lumineux



Figure 1. Orthophoto et plan topographique

¹ Société Nationale des Chemins de fer Français



Ces développements sont d'autant plus nécessaires qu'il n'existe actuellement que peu de logiciels proposant des solutions de report en environnement ferroviaire. Pour pallier à ce manque, ALTAMETRIS s'est donc dirigée vers la mise en place de ses propres logiciels et méthodes pour répondre aux attentes de SNCF. Pour cela, une solution semi-automatisée d'assistance au report des voies, *AltaTrack* est actuellement en cours de réalisation.

Cette étude s'est structurée autour de plusieurs objectifs. Il s'agira tout d'abord de dresser un bilan des méthodes de report actuellement déployées, de manière à fixer une procédure générale qui sera utilisée par l'ensemble des équipes de traitement et permettra d'homogénéiser la réalisation des livrables. À partir de cet état des lieux, nous pourrions identifier les tâches critiques, présentant un fort potentiel d'amélioration, afin de proposer et, dans la mesure du possible, de tester des alternatives plus efficaces.

Analyse des procédures de report

Avant de procéder à l'automatisation des tâches, il convient de faire un point sur la chaîne de traitement actuellement déployée, afin de mettre en lumière les étapes les plus critiques à améliorer (Figure 2).

Afin de réaliser ces traitements, de nombreux logiciels commerciaux sont utilisés. En complément, plusieurs outils ont été ou sont en cours de développement au sein d'ALTAMETRIS :

- *Rodimus Prime* : permet de générer différents types d'ortho-LiDAR utilisées pour le report des données.

- *Factotum* : application intégrée à l'environnement AutoCAD qui regroupe plusieurs outils de dessin, d'import et d'export de données permettant de faciliter le report.
- *AltaTrack* : vise l'extraction automatique d'objets en environnement ferroviaire tels que les rails ou les caténaires.

L'analyse des procédures effectuée a permis d'identifier les étapes du report des données les plus problématiques et d'orienter les développements. L'étape la plus chronophage identifiée est le report 3D. En effet, celui-ci nécessite la réalisation de multiples coupes dans le nuage afin d'en extraire les points caractéristiques. La génération du fonds de plan, la mise en page et le choix des ortho-LiDAR à utiliser pour le report constituent également des points à améliorer. Avant de réaliser ces développements, une analyse des outils existants s'est imposée.

Analyse des outils existants

■ Analyse des ortho-LiDAR

Actuellement le report des données s'effectue à l'aide des nuages de points et d'ortho-LiDAR utilisées comme fond de plan. Afin d'identifier les meilleures ortho-LiDAR à utiliser pour le report, nous allons analyser la visibilité des principaux objets à reporter sur les différentes combinaisons de filtres de points et représentations qui ont été implémentées dans *Rodimus Prime* (Tableau 1).

Cette analyse a ainsi permis de déterminer les paramètres optimaux à utiliser suivant les éléments à reporter (Figure 3). Après avoir constaté que le report du relief restait difficile avec la représentation Hillshade, plusieurs perspectives qui permettraient d'avoir une meilleure visualisation des lignes de rupture de pente ont également pu

Utilisations	Résolution pour une densité de 1 000 pts/m ²	Type de représentation	Ensemble d'application
Report du relief	6 cm	Hillshade (Ombrage de surface)	Nuage de points du MNT
Visualisation/perception	5 cm	Sky View Factor (Portion de ciel visible)	Points hauts du nuage
Report poteaux et câbles caténaires	5 cm	Dz Voisinage/ Hauteur locale	Points hauts du nuage
Report rails et mobilier ferroviaire	5 cm	Dz Voisinage	Filtre élévation 0.3 + Points hauts du nuage
Report végétation, murs et bâtiments	5 cm	Sky View Factor	Points hauts du nuage

Tableau 1. Paramètres optimaux à la création d'ortho-LiDAR suivant leur utilisation

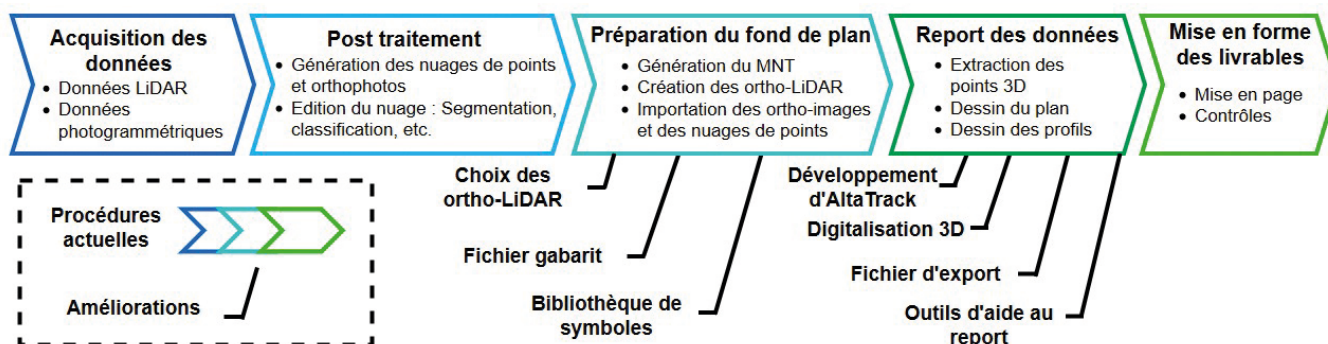


Figure 2. Étapes principales des procédures de report et améliorations envisagées

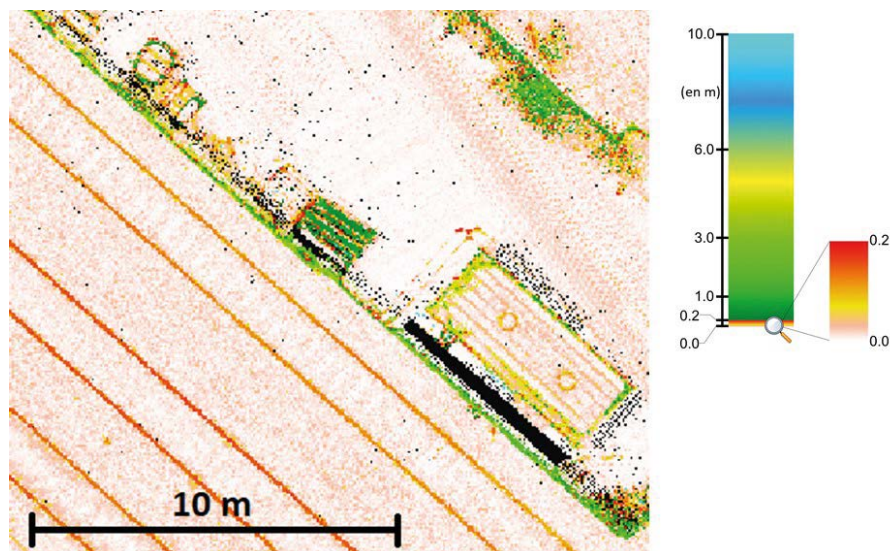


Figure 3. Ortho-LiDAR adaptée au report des rails et du mobilier ferroviaire

être identifiées. Nous pouvons noter en particulier l'utilisation de la combinaison de la représentation *Slope Shading* avec une colorisation en fonction des zones concaves et convexes [Chiba and Suzuki, 2008]

■ Validation d'AltaTrack

AltaTrack est un outil d'assistance au report des voies créé en interne chez ALTAMETRIS pour faciliter le report des données. En cours de développement, il permet aujourd'hui l'extraction automatique de rails et de câbles caténaires à partir d'un fond de plan raster et de nuages de points LiDAR. Son principe consiste à extraire les points d'intérêt à partir de boîtes de sélection disposées grâce aux indications du dessinateur (axe et sens de la voie). Afin d'insérer cet outil dans la chaîne de traitement, nous devons valider son efficacité et sa précision d'extraction. Pour cela, une comparaison a été réalisée sur une cinquantaine de profils entre des

points extraits exactement aux mêmes endroits avec la méthode automatique et manuelle (Tableau 2). Cette analyse rigoureuse point par point est venue compléter un premier contrôle qui avait été effectué sur un échantillon de plus de 300 points. Celui-ci avait donné un écart-type d'1 cm sur les points de rails en calculant les écarts entre des points manuels et la surface de roulement interpolée à partir des points automatiques.

L'écart-type d'1 cm en planimétrie obtenu pour l'extraction des points de rails est satisfaisant au regard de la largeur de 6 cm d'un champignon de rail. L'écart-type en altimétrie reste quant à lui inférieur au centimètre. Les points de caténaires extraits par AltaTrack présentent des écarts un peu plus importants, souvent liés à la présence de plusieurs câbles caténaires proches dans la boîte de sélection. L'analyse de ces écarts a pu montrer

l'impact de la densité de points et du bruit sur la qualité des extractions.

Compte tenu de la précision centimétrique attendue pour le report des rails, les résultats obtenus ont permis de valider leur extraction avec l'outil AltaTrack. Pour en améliorer encore la précision et mieux gérer les cas particuliers, les méthodes de sélection des points et les critères de validation de l'extraction pourront être affinés.

Automatisation de la procédure de report

Avant de procéder au développement de nouvelles solutions, une étude bibliographique a été effectuée permettant d'identifier les deux approches possibles pour l'amélioration des méthodes de report : la semi-automatisation et l'automatisation totale. Dans la littérature, les méthodes d'automatisation complète s'appuient en général sur une extraction des objets par classification du nuage notamment utilisée en milieu ferroviaire par [Arastounia, 2015]. Le principal inconvénient de ces méthodes entièrement automatiques est la quantité non négligeable d'erreurs qu'elles engendrent et qu'il faut corriger. Le temps passé à contrôler et corriger ces erreurs peut s'avérer long et fait relativiser l'intérêt d'une automatisation totale du report des données.

Suite à ce constat et aux choix de développements déjà effectués par ALTAMETRIS, l'étude s'est orientée vers le développement de solutions semi-automatisées. En effet, celles-ci sont plus rapides à mettre en place et permettent de conserver un meilleur contrôle des traitements. Dans le cas du report du mobilier ferroviaire, les points à extraire sont spécifiques et précis. Les méthodes d'extraction utilisées doivent pouvoir s'adapter à chaque cas.

■ Développement d'AltaTrack

L'analyse des résultats obtenus avec AltaTrack a permis de placer dès aujourd'hui le logiciel comme un composant principal des futures procédures de report. Dans le cas de l'extraction des rails et des caténaires, les développements se sont orientés dans deux directions :

	Écarts rails (en m)			Écarts caténaires (en m)		
	DZ	Di 2D	Di 3D	DZ	Di 2D	Di 3D
Moyenne	0.004	0.012	0.014	-0.009	0.016	0.025
Moyenne (Abs)	0.005			0.015		
Max (Abs)	0.047	0.043	0.059	0.037	0.054	0.055
Écart-type	0.007	0.010	0.012	0.018	0.014	0.022

Tableau 2. Écarts obtenus pour l'extraction de rails et de caténaires avec l'outil AltaTrack

- améliorer les méthodes d'extraction des points ;
- affiner les critères qui doivent être respectés pour qu'un profil soit validé (écartement, dévers, rayon de courbure, rampes, etc.).

Extraction de points

Les sources d'erreurs actuelles dans l'extraction des points de rails sont principalement liées à la présence de points faux à proximité du rail ou à une mauvaise répartition des points sur la surface du champignon. Nous avons pu proposer plusieurs améliorations pour limiter ces erreurs.

La première solution envisagée réside en un contrôle de la densité de points autour du point extrait. Celle-ci consiste à calculer son nombre de points voisins contenus dans un cercle de rayon R dans le plan de la coupe. Si ce nombre est inférieur à un seuil fixé, le point est considéré comme faux et l'algorithme passe au point le plus haut suivant (Figure 4). Cette étape a pour objectif d'éviter l'extraction d'un point faux. Dans notre cas, en raison des variations importantes de la densité de points suivant les nuages et au sein d'un même nuage, nous pouvons difficilement fixer une valeur seuil. Une autre solution de contrôle a ainsi été envisagée.

Le contrôle de la répartition des points a ainsi pu être mis en place. Le champignon de rail a une largeur constante comprise entre 6 et 7 cm suivant le type de rail. Si la distance entre les deux points extrêmes du champignon est



Figure 5. Extraction de groupes de points par composantes connexes

comprise entre 45 et 85 mm, la valeur médiane de ces points sera conservée. Dans le cas contraire, le barycentre des points hauts du champignon est calculé. Nous évitons ainsi qu'une mauvaise répartition des points sur le champignon impacte l'extraction du rail.

L'extraction des câbles caténaïres présente actuellement plus d'erreurs que celle des rails. En effet, leur détection est plus complexe. Les zones de sélection actuellement utilisées peuvent comporter des éléments variés : fil porteur, fil de contact, poteaux caténaïres, etc.

Une première possibilité testée a été d'utiliser un algorithme d'extraction des composantes connexes. Cette fonction définie dans [CloudCompare, 2012] permet de décomposer un nuage de points en plusieurs sous-nuages. Pour cela, elle identifie les groupes de points suffisamment éloignés entre eux pour les associer à des objets distincts. Cette identification s'appuie sur l'utilisation de deux paramètres :

- le niveau d'octree fixe le seuil de distance à partir duquel les points seront considérés comme appartenant au groupe ou non ;
- le nombre minimal de points pour

qu'un ensemble soit considéré comme un groupe.

Plusieurs tests ont été effectués en faisant varier les deux paramètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en conservant les valeurs par défaut du logiciel (Niveau d'octree de 7 et un nombre de points minimal par groupe de 10). En effet, un niveau d'octree plus important ou plus faible donne lieu à un nombre trop important de sous-groupe ou au contraire attribue tous les points à un même ensemble. Comme l'illustre la figure 5, sur laquelle chaque groupe de point extrait a été associé à une couleur, nous avons pu constater que les résultats restent entachés d'erreurs au niveau des porteurs et des poteaux caténaïres.

Une autre solution envisagée a été d'identifier les câbles en les modélisant par des cylindres. CloudCompare propose une solution utilisant le paradigme de RANSAC³. Cet algorithme détaillé par [Schnabel et al., 2007] est une méthode itérative permettant d'estimer les paramètres d'un modèle représentant une forme dans un ensemble de points 3D contenant des données aberrantes. Nous avons pu constater des résultats assez hétérogènes dans chaque combinaison de paramètres testée. Les câbles caténaïres étant relativement fins, il pourra être envisagé, comme autre solution, une modélisation des câbles par des lignes.

En plus des solutions testées précédemment, d'autres méthodes d'automatisation d'extraction pourront être envisagées. Nous pouvons notamment citer le *machine learning*⁴. Il s'agit d'une méthode de reconnaissance d'objets basée sur l'apprentissage. Elle fonctionne grâce à une base de données de références associant

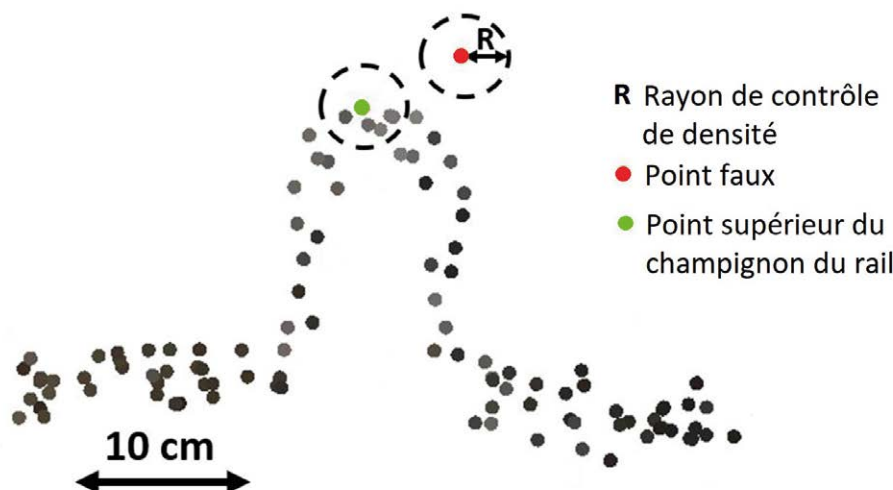


Figure 4. Test de densité sur un champignon de rail

³ RANdom SAMple Consensus

⁴ Méthode de reconnaissance d'objets basée sur l'apprentissage.



ensemble différentes versions d'un même objet. Cette banque de données permet à l'algorithme de détecter par la suite les objets similaires dans des nuages de points.

De plus, l'extraction des rails donnant déjà aujourd'hui de bons résultats, ils pourront être utilisés comme référence pour l'extraction des autres éléments composant le mobilier ferroviaire. En effet, comme dans cet environnement tous les éléments sont positionnés par rapport aux rails et sont très normés, nous pouvons envisager l'automatisation de leur extraction. Les rails formeront ainsi une zone de recherche restreinte dans laquelle pourront être détectés tous les éléments du mobilier ferroviaire qui s'y situent habituellement.

Validation de l'extraction

Une fois les points extraits, plusieurs contrôles sont effectués sur chaque profil de la voie. Les contrôles d'écartement des rails et de pente avaient déjà pu être mis en place. Mon étude s'est concentrée sur la mise en place du contrôle de dévers. Le dévers correspond à la différence d'altitude entre les deux rails d'une même voie. Sa valeur est directement liée à la vitesse maximale autorisée sur la voie et à son rayon de courbure. Sa valeur théorique est fixée par la formule issue des référentiels de SNCF [1]. A partir de celle-ci

j'ai pu fixer une tolérance de ± 1 cm qui permettra de détecter d'éventuelles erreurs d'extraction.

Pour confirmer le choix de cette tolérance, les valeurs de dévers théoriques ont été comparées à des valeurs calculées à partir de points extraits par AltaTrack (Figure 6). Nous constatons que la plupart des valeurs de dévers calculées respectent la tolérance déterminée précédemment.

Les valeurs calculées supérieures à la tolérance, situées vers le centre du graphique, correspondent à l'emplacement de pont ou de passage à niveau où l'extraction des points de rails est plus hasardeuse. Ces zones présentent, en raison de la configuration (présence de masques liés à l'ouvrage, etc.), des densités de points plus faibles ou un bruit plus important qui influencent négativement l'extraction de rails.

Si la connaissance automatique des vitesses maximales des voies traitées reste encore à établir, le contrôle de dévers permettra, une fois mis en place, de garantir une qualité de contrôle des points extraits encore meilleure.

■ Digitalisation 3D

Afin de réduire les temps de traitement pour le report des données 3D, une nouvelle méthode de report semi-automatisée a été testée au travers d'un outil proposé par le module TerraScan et décrite par [Forrler, 2017]. Les rails et

les caténaires pouvant être traités avec AltaTrack, les tests se sont concentrés sur les éléments nécessitant encore aujourd'hui un report avec la méthode manuelle. Suivant l'environnement d'extraction et les points à extraire, trois catégories d'objets ont pu être identifiées :

- les points de niveau situés sur de la voirie, des zones en terre, de la végétation basse ;
- le point au sol des objets verticaux : bâtiments, poteaux ;
- les points supérieurs des caniveaux à câbles.

Ces objets nécessitent une précision de 2 à 5 cm en planimétrie et de 5 à 10 cm en altimétrie. La méthode proposée par TerraScan se base sur l'utilisation combinée d'une ortho-image et du nuage de points de la zone à reporter. Elle consiste, pour chaque point digitalisé sur l'ortho-image, à extraire l'altitude de son point correspondant dans le nuage suivant la zone de recherche et la méthode d'extraction choisies par l'utilisateur. Afin d'évaluer la précision de cette nouvelle méthode, celle-ci a été comparée à l'extraction manuelle, définie en tant que référence. La différence entre ces deux méthodes étant uniquement la détermination de l'altitude des points, seule celle-ci sera étudiée. Les écarts du Tableau 3 page suivante ont été calculés sur des échantillons de plus d'une

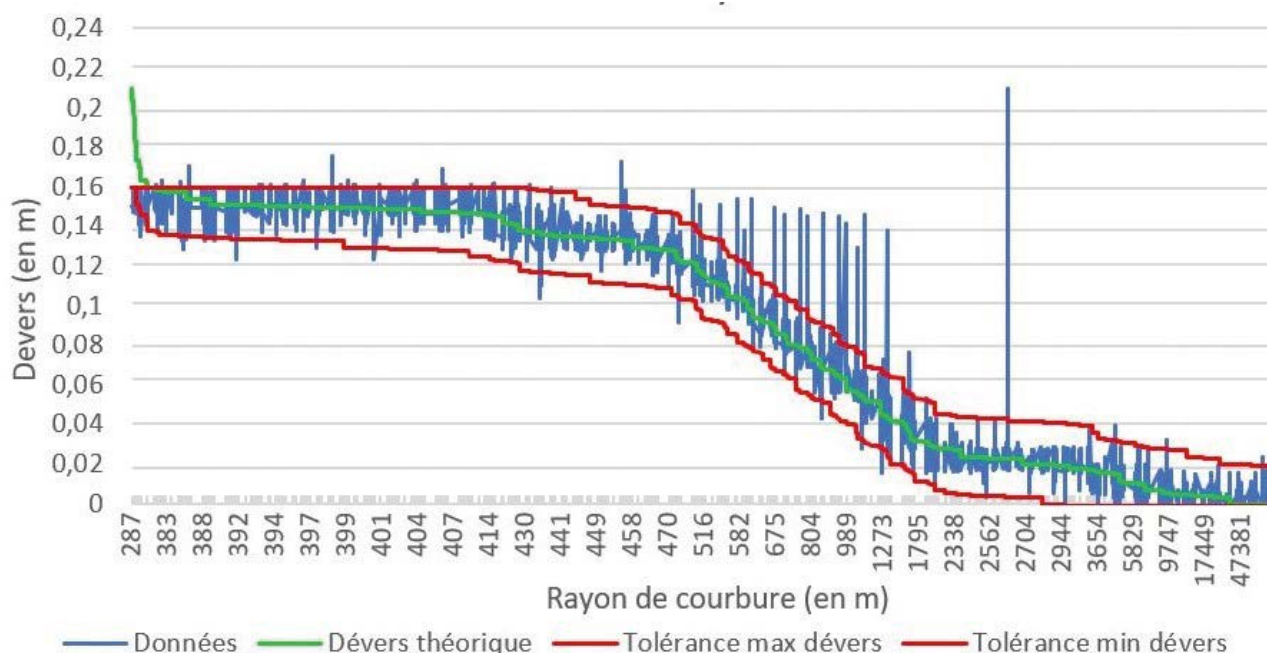


Figure 6. Dévers en fonction du rayon de courbure sur une voie limitée à 160 km/h



Types d'objets	Méthode d'extraction	Voisinage (en m)		Points extraits correctement		Origines des fautes	Écarts DZ sur les points correctement extraits (en m)					
							Moyenne		Moyenne (Abs)		Écart-type	
Points de niveau	Point le plus bas	0.05		97%		Egouts dans la zone de recherche, végétation	-0.01		0.02		0.02	
Objets verticaux	Point le plus bas	0.05	0.1	72%	87%	Végétation, faible densité de points	0	-0.01	0.03	0.03	0.04	0.04
Caniveaux à câbles	Point le plus haut	0.05		91%		Câbles ou poteaux dans la zone de recherche	0.01		0.01		0.03	

Tableau 3. Paramètres et résultats des tests effectués

centaine de valeurs pour chaque type d'élément. Afin de déterminer les paramètres les plus adaptés pour l'extraction de chaque type d'objet, plusieurs tests ont été réalisés (Tableau 3). Les points faux extraits conduisant à des écarts de plusieurs dizaines de centimètres pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres ont été supprimés avant de réaliser l'analyse de précision.

Les écarts obtenus sur les points correctement extraits étant inférieurs aux tolérances, les méthodes pourront être validées sous condition de supprimer les fautes lors des extractions. Pour cela, différentes méthodes pourront être mises en place. Une classification des points du sol pourra être réalisée pour limiter le risque d'extraction de points n'appartenant pas au sol, mais le résultat dépendrait cependant de la qualité de la classification et rajouterait une étape supplémentaire. Ensuite, l'utilisation d'un diagramme de répartition des altitudes des points dans chaque zone de recherche pourra permettre d'identifier les pics correspondants aux altitudes du sol ou des toits de bâtiments par exemple et d'extraire le point désiré. Enfin, dans le cas des caniveaux à câbles, avant d'extraire le point le plus haut, un filtre ne conservant que les points sous une certaine altitude par rapport au point le plus bas de la zone pourra être utilisé.

Aide à la génération des plans

En complément des recherches précédentes, mon étude s'est également concentrée sur la mise en place et l'intégration de différents outils pour faciliter et contrôler la génération de livrables.

■ Outils d'extraction de données

A partir des polygones 3D extraites d'AltaTrack, les dessinateurs doivent

dessiner des profils altimétriques indiquant les altitudes des rails. Ce travail auparavant réalisé manuellement a pu être remplacé par l'utilisation d'un nouvel outil. L'algorithme choisi permet d'insérer des points 3D aux intersections entre une polygone 2D et toutes les polygones 3D qu'elle croise. Les altitudes des nouveaux points sont interpolées à partir des sommets de ces polygones 3D. L'outil a été adapté afin de correspondre le mieux possible aux besoins des dessinateurs. Une extension d'un outil d'insertion d'ortho-image a également pu être mise en place afin de pouvoir gérer les calques d'insertion des données.

Le logiciel AltaTrack permet d'obtenir pour chaque voie ferrée extraite l'emplacement des rails et du câble caténaire. Plusieurs grandeurs géométriques régulièrement demandées par les clients, peuvent être déduites de ces données telles que :

- l'écartement des rails ;
- le dévers ;
- la hauteur du caténaire ;
- le désaxement du caténaire.

Le fichier initial d'export renvoyait uniquement les coordonnées 3D des points de rails et caténaires sous la forme d'un tableur. Celui-ci a été complété avec les formules de ces différentes grandeurs géométriques, afin de les obtenir automatiquement à chaque exportation de données.

Automatisation de la mise en forme

Le logiciel de dessin utilisé par ALTAMETRIS n'est pas orienté spécifiquement vers le domaine du ferroviaire. Il n'est donc pas toujours bien adapté

aux besoins des dessinateurs. Le développement d'outils spécifiques supplémentaires permet de répondre à des besoins ciblés afin de gagner en temps et en cohérence sur la réalisation des livrables.

Dans cette optique, un fichier gabarit et une bibliothèque de symboles dynamiques ont été mis en place. Cette dernière permet tout d'abord d'avoir une bibliothèque de symbole unique pour l'ensemble des dessinateurs. De plus, les symboles dynamiques permettent d'avoir plusieurs versions d'un symbole sous un même bloc permettant ainsi de faciliter ses modifications une fois qu'il est inséré et d'alléger la bibliothèque (Figure 7) page suivante.

Conclusion

Les travaux réalisés ont tout d'abord permis d'établir un schéma précis des procédures de report actuellement utilisées au sein d'ALTAMETRIS et de faire un bilan des outils disponibles. Les recherches réalisées par la suite ont permis d'identifier les points d'optimisation. A partir de cette étude, une nouvelle méthode de report automatisée a été testée et au vu des résultats obtenus, nous pouvons affirmer que l'utilisation des méthodes proposées présente, pour certains types d'objets, un gain de temps pour le report sans en diminuer la précision. Les techniques d'extraction et de contrôle du logiciel de report développé en interne ont été optimisées.

Par la suite, l'ensemble des méthodes d'extraction validées dans le cadre du projet devront être industrialisées. Afin d'éviter l'utilisation d'un nouveau logiciel dans la chaîne de traitement,



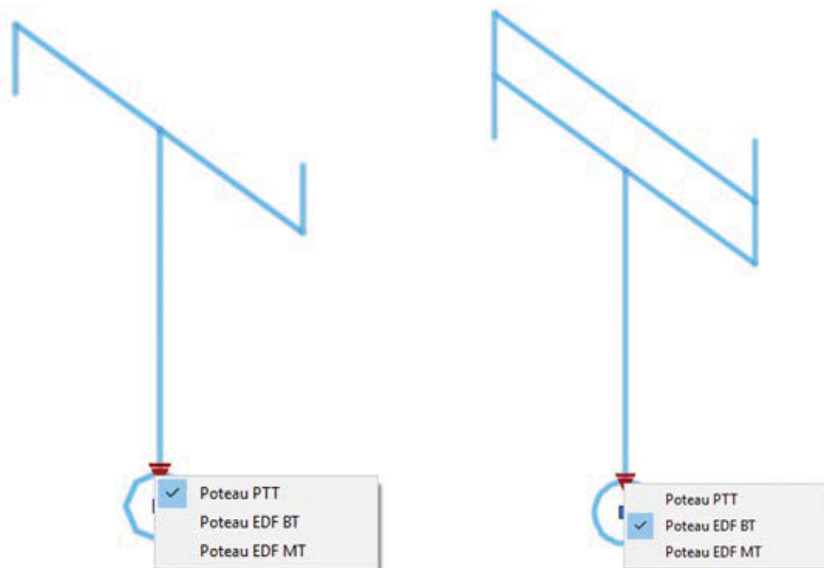


Figure 7. Symbole dynamique d'un poteau électrique non ferroviaire

les techniques d'extraction pourront être intégrées à AltaTrack. En effet, la souplesse de développement de celui-ci pourra permettre leur implémentation et leur optimisation.

Le développement de nouveaux outils automatisés et l'amélioration des outils existants constitue un enjeu qu'il convient de poursuivre constamment, afin de pouvoir continuer à améliorer les procédures de report des données. Les recherches d'automatisation devront donc persévérer pour mettre en place de nouveaux outils d'extraction grâce à l'utilisation de nouvelles méthodes telles que le machine *learning*. ●

Contact

Marion HINAUX
marion_hinaux@orange.fr

Bibliographie

[Arastounia, 2015] Arastounia, M. (2015). *Automated Recognition of Railroad Infrastructure in Rural Areas from LIDAR Data*. Remote Sensing.

[Chiba and Suzuki, 2008] Chiba, T., Kaneta, S. and Suzuki, Y. (2008). *Red relief image map: new visualization method for three dimensional data*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

[CloudCompare, 2012] CloudCompare (2012). *Manuel d'utilisateur de la version 2.4*. URL : <https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC>, consulté le 22-08-2018

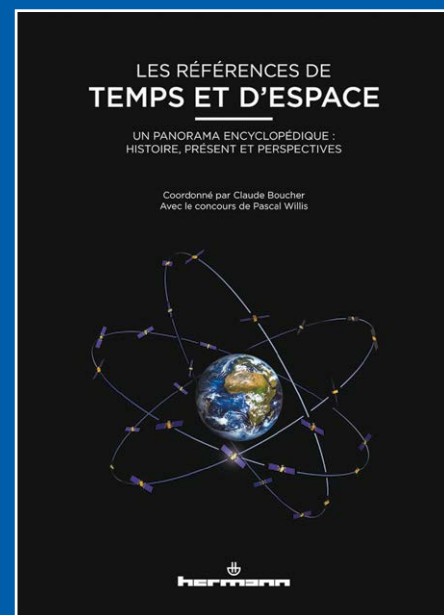
[Forrler, 2017] Forrler, M. (2017).

Développement d'un processus de traitement de données « Mobile Mapping » pour la production d'un livrable type PCRS (Plan de corps de Rue Simplifié). Mémoire de master, INSA de Strasbourg - Futurmap.
[Schnabel et al., 2007] Schnabel, R., Wahl, R., and Klein, R. (2007) Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. Computer Graphics Forum, 26(2) :214-226.

ABSTRACT

Key words: LiDAR - photogrammetry - drones - points cloud - railway environment - report - automation

The optimization of topographic deliverables production (topographical maps, specific data extraction, etc.) in railway environment is today an important issue for ALTAMETRIS, a subsidiary of SNCF Réseau. Indeed, while current LiDAR survey and photogrammetry methods can quickly acquire large amounts of data, their processing is complex and long and requires optimizations. This study is part of the research automation of these procedures and more specifically in the data transfer phase. The work carried out made it possible to establish a balance sheet of the treatment chain set up and to identify the points to be improved. A new automated reporting method has been tested, a home-made software for extraction and control optimized and the process of data analysis established and validated.



**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

Utilisation d'infrastructures géodésiques mondiales pour la réalisation nationale

■ Raphaël LEGOUGE - Gaël ANDRÉ - Adélaïde MISSAULT - Julian LE DEUNF - Samuel BRANCHU

1. Cadre d'emploi de ce document

Ce document vient expliciter les méthodes à employer pour réaliser la transformation de coordonnées exprimées dans un repère de référence géodésique dérivé d'une réalisation de l'ITRS vers un autre repère de référence géodésique dérivé également d'une réalisation de l'ITRS. Ainsi des positions déterminées en PPP, bien souvent exprimées dans le repère des orbites et horloges, ou lors de traitements différentiels utilisant des stations dont les coordonnées sont connues dans une réalisation de l'ITRS, peuvent être transformées dans les repères de références légaux.

2. Description

■ 2.1 Contexte

Les systèmes de référence internationaux considérés dans ce document sont :

- le système international *International Terrestrial Reference System* (ITRS)
- le système européen *European Terrestrial Reference System* (ETRS89). Ce système est issu de l'ITRS par ancrage de la plaque tectonique eurasiennne à l'époque 1989.0. Son utilisation est actuellement préconisée par la directive européenne INSPIRE.

Leurs réalisations sont des repères de référence (*Terrestrial Reference Frames* - TRF). Les repères géodésiques utilisés actuellement sont ITRF2014 (Altamimi et al., 2016, JGR) et ETRF2000, (Boucher, C. and Altamimi, Z., 2011. *Memo: specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GNSS campaign.*). La France a adopté une réalisation de l'ETRS89 (en Métropole) ou de l'ITRS (en dehors de la métropole) comme repères de référence nationale. Il s'agit de réalisations au "deuxième degré", puisque s'appuyant sur un ITRF_{yyyy} (repère cinématique) ou un ETRF_{yyyy} en fixant une époque et en éliminant les vitesses en faisant bouger le repère de référence national avec la plaque tectonique associée (repère statique).

■ MOTS-CLÉS

ITRS, ITRF, référence, époque, réalisation, transformation

Ce document va décrire les calculs à mettre en place afin de pouvoir exprimer des coordonnées dans les systèmes légaux.

■ 2.2 Notations

Lors d'un changement de repère de référence géodésique, il y a un repère de départ F_1 et un repère d'arrivée F_2 . Les paramètres permettant de passer d'un repère à un autre sont exprimés à une époque de référence t_0 .

La transformation permettant de changer la date à laquelle les coordonnées sont exprimées dans un repère est appelée un changement d'époque, notée $T_{F_i}(t_1, t_2)$ avec t_1 l'époque de départ et t_2 l'époque d'arrivée.

La transformation permettant de changer d'ITRF est appelée changement de réalisation. Ce type de transformation ne peut être réalisé qu'à une époque commune entre les deux réalisations, notée t . Cette transformation permet donc de passer d'un repère de référence F_1 appuyé sur l'ITRF₁ considéré à l'époque t à un repère de référence F_2 appuyé sur l'ITRF₂ considéré à la même époque t . Cette transformation sera notée $T(ITRF_1, ITRF_2, t)$.

■ 2.3 Conventions

Dans ce document, un certain nombre de conventions seront utilisées :

- Toutes les coordonnées utilisées seront des coordonnées ECEF (*Earth-Centered, Earth-Fixed*) géocentriques, exprimées en mètres.
- Toutes les vitesses utilisées seront des vitesses ECEF, exprimées en m/an.
- Toutes les époques seront exprimées en années décimales.
- Les vecteurs de rotation de plaques sont exprimés en mas/an¹.
- Les vecteurs ORB (*Origin Rate Bias*, Cf. 3.2.2) sont exprimés en mm/an.
- Les réalisations de l'ITRS sont notées ITRFyyyy@eeee.eee, où yyyy est le millésime de l'ITRF et eeee.eee son époque de référence en année décimale.

■ 2.4 Méthode générale

Afin de passer d'un repère de référence géodésique F_1 appuyé sur l'ITRF₁ considéré à l'époque t_1 à un autre repère géodésique F_2 appuyé sur l'ITRF₂ considéré à l'époque t_2 , il faut réaliser un changement d'époque dans le repère de départ ($T_{F_1}(t_1, t_0)$), puis réaliser un changement de réalisation ($T_{F_2}(ITRF_1, ITRF_2, t_0)$), et enfin réaliser un changement d'époque dans le repère d'arrivée ($T_{F_2}(t_0, t_2)$) (Cf. Figure 1).

En connaissant les dérivées des paramètres de changement de réalisation, il est possible de les exprimer à une autre époque que t_0 . Il est alors possible d'éviter un changement d'époque en exprimant les paramètres de changement de réalisation en t_1 ou t_2 .

De manière rigoureuse aucune solution n'est meilleure qu'une autre. Cependant, les plus anciennes réalisations de repère ne bénéficiaient pas d'autant d'observations que les réalisations récentes. Cela a peu d'impact sur les changements de réalisation, mais pour les changements d'époque, l'incertitude sur la vitesse des

¹ 1 mas = milliseconde d'arc

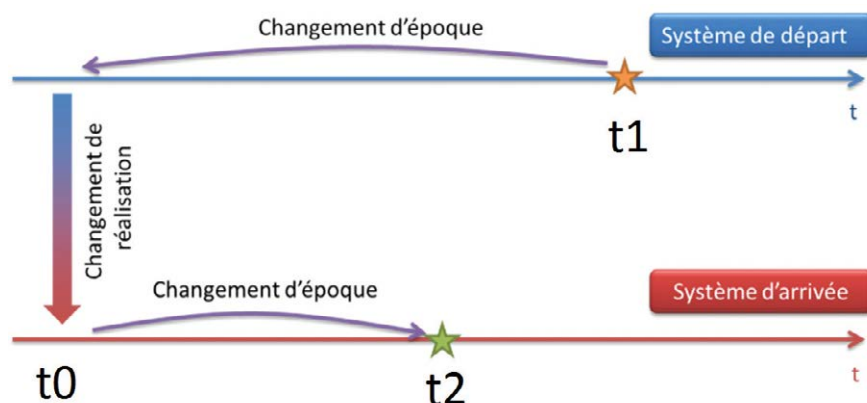


Figure 1. Schéma représentant la transformation de coordonnées d'un repère de référence géodésique à un autre



stations est bien meilleure dans les réalisations les plus récentes. Il sera donc préférable de réaliser les changements d'époque uniquement dans la réalisation de repère la plus récente.

A l'issue de toutes ces transformations, le repère dans lequel on se trouve n'est pas exactement le repère auquel avaient abouti les calculs lors de la création du repère de référence. Il existe une différence nommée "biais de mise en référence" qu'il est nécessaire d'appliquer si l'on souhaite atteindre la meilleure incertitude.

3. Changement d'époque

Lors d'un changement d'époque, on ne change pas de repère géodésique, on vient seulement considérer ce repère à une autre date. Les changements d'époque sont donc reliés aux déplacements subis par les stations. Le déplacement des stations doit être modélisé afin de pouvoir exprimer les coordonnées à la date voulue.

■ 3.1 Station dont la vitesse est connue

3.1.1 Station n'ayant pas subi de discontinuités

Si la vitesse de la station est connue et constante, afin de réaliser le changement d'époque il faut utiliser la formule suivante permettant le changement d'époque.

$$\begin{bmatrix} X(t_2) \\ Y(t_2) \\ Z(t_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(t_1) \\ Y(t_1) \\ Z(t_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} * (t_2 - t_1)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} X(t_1) \\ Y(t_1) \\ Z(t_1) \end{bmatrix} \text{ les coordonnées de la station à l'époque } t_1$$

$$\begin{bmatrix} X(t_2) \\ Y(t_2) \\ Z(t_2) \end{bmatrix} \text{ les coordonnées de la station à l'époque } t_2$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \text{ le vecteur vitesse de la station}$$

Le calcul de l'incertitude associée est décrit dans le 3.3.1.

3.1.2 Station ayant subi des discontinuités

Si la station a subi des événements sismiques ou environnementaux (changement de matériel d'observation, mouvement du support), alors il existe probablement des discontinuités dans la série temporelle de position associée à cette station. Il existe alors une liste de dates pour chaque événement (informations disponibles sur le site web de l'ITRF) ; pour chaque événement, une nouvelle position et une nouvelle paramétrisation de la vitesse peuvent être données.

Ci-dessous les liens pour trouver les différents fichiers contenant les discontinuités des stations ITRF pour les quatre ITRF les plus récents :

Réalisation de l'ITRS associée	Source
ITRF2014	http://itrf.engsg.ign.fr/ITRF_solutions/2014/computation_strategy.php?page=2
ITRF2008	http://itrf.engsg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/computation_strategy.php?page=2
ITRF2005	http://itrf.engsg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/computation_strategy.php?page=2
ITRF2000	https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote 31/tn31.pdf?__blob=publicationFile&v=1

3.1.2.1 Station sans PSD

Si la station ne comporte pas de PSD (*Post Seismic Deformation* (EN) Déformations post-sismique (FR)), alors seule la paramétrisation linéaire est à utiliser. Pour se ramener au cas du 3.1.1, il faut choisir le couple vitesse et position correspondant.

En revanche, si sur la période $[t_1 ; t_2]$ la station a subi au moins une discontinuité il faudra choisir comme point de départ le couple position et vitesse qui précède t_2 .

Le calcul de l'incertitude associée est décrit dans le 3.3.1.

3.1.2.2 Station avec des PSD

S'il existe des PSD, alors la vitesse est paramétrisée à l'aide d'une relation linéaire (Cf. 3.1.2.1) ainsi que d'un ou plusieurs termes à ajouter (dépendances en log, exp, cos, sin).

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

Pour plus d'information sur les PSD et leur calcul : http://itrf.engsg.ign.fr/ITRF_solutions/2014/psd.php. La quasi-totalité des stations comportant des PSD se trouvent très proche ($< \sim 100\text{km}$) d'un bord de plaque tectonique. Les réalisations antérieures à l'ITRF2014 ne comportent pas de PSD.

Le calcul de l'incertitude associée est décrit dans le 3.3.2

■ 3.2 Station dont la vitesse est inconnue

3.2.1 Station proche d'une station dont la vitesse est connue

Il est tout à fait possible d'utiliser la vitesse d'une station proche, la seule condition à remplir est que les deux stations considérées doivent se déplacer de la même manière (la vitesse relative entre les deux stations doit être nulle).



Le calcul de l'incertitude associée est décrit dans le 3.3.1

3.2.2 Modélisation de la vitesse d'une station en utilisant un vecteur de rotation

Si une station est suffisamment loin des bords de la plaque tectonique sur laquelle elle se trouve, alors son déplacement peut être considéré similaire à celui de la plaque rigide sur laquelle elle est localisée.

Dans ce cas, la formule permettant de déterminer la vitesse de la station est la suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \omega \wedge \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + ORB$$

Avec :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} \text{ le vecteur vitesse de la station}$$

ω le vecteur de rotation de la plaque tectonique²

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \text{ la position de la station}$$

ORB le vecteur "Origin Rate Bias"

Si le modèle donne des incertitudes sur les vitesses des stations obtenues, alors le calcul de l'incertitude associée est décrit dans le 3.3.1.

Si le modèle donne des incertitudes sur le vecteur de rotation et l'ORB, alors le calcul de l'incertitude associée est décrit dans le 3.3.3.

Remarque :

Les auteurs des modèles ITRF08 PMM (Plate Motion Model) et ITRF14 PMM recommandent de ne pas appliquer les vecteurs ORB pour les raisons suivantes :

- Les incertitudes sur les valeurs estimées sont grandes comparées aux valeurs estimées. Il est probable donc que les valeurs estimées ne soient pas représentatives.
- La sélection des sites avec lesquels l'estimation est menée à un impact fort sur le résultat obtenu.

3.2.3 Autres cas

Lorsque la station se trouve proche d'un bord de plaque, son déplacement peut ne pas être considéré comme identique au vecteur de rotation de la plaque tectonique, il n'est alors pas

² La liste des vecteurs de rotation des plaques est disponible au § 7.3

possible d'utiliser une modélisation de la vitesse en utilisant un vecteur de rotation associé à la plaque sur laquelle se trouve la station.

Dans ce cas, soit la station permet de dégager une série temporelle d'une durée importante permettant de déterminer son modèle de déplacement (soit en déterminant sa vitesse dans le repère soit en déterminant sa vitesse par rapport à la plaque sur laquelle elle se trouve), soit il n'est pas possible de réaliser de changement d'époque.

3.3 Propagation de l'incertitude

3.3.1 Cas linéaire

D'après l'équation du 3.1.1, l'incertitude sur la position de la station liée à un changement d'époque se propage d'une époque à une autre avec la formule suivante :

$$\sigma_{ChEpoque}^2 = \sigma_{Vitesse}^2 * (t_1 - t_2)^2$$

Avec :

$\sigma_{ChEpoque}^2$ la variance liée au changement d'époque

$\sigma_{Vitesse}^2$ la variance sur la vitesse

$(t_1 - t_2)^2$ le carré de l'amplitude du changement d'époque

3.3.2 Cas linéaire avec PSD

D'après l'équation du 3.1.2.2, l'incertitude sur la position de la station liée à un changement d'époque se propage d'une époque à une autre avec la formule suivante :

$$\sigma_{ChEpoque}^2 = \sigma_{Vitesse}^2 * (t_1 - t_2)^2 + \sigma_{PSD}^2$$

Avec :

$\sigma_{ChEpoque}^2$ la variance liée au changement d'époque

$\sigma_{Vitesse}^2$ la variance sur la vitesse

$(t_1 - t_2)^2$ le carré de l'amplitude du changement d'époque

σ_{PSD}^2 la variance sur les PSD

$\sigma_{Vitesse}^2$ est déterminée de la même manière que dans le 3.3.1.

σ_{PSD}^2 est à calculer à partir des équations données dans le document disponible à l'adresse suivante : http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2014/doc/ITRF2014-PSD-model-eqs-IGN.pdf

Remarque :

Dans le document expliquant le calcul des PSD, σ_{PSD}^2 est le vecteur composé des éléments diagonaux de la matrice de covariance $var(\delta L)$ et la matrice R permettant de réaliser le changement de repère (ENU -> ECEF géocentrique)

est disponible à l'adresse suivante : http://www.navipedia.net/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates.

$$\begin{pmatrix} \delta_X \\ \delta_Y \\ \delta_Z \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} \delta_E \\ \delta_N \\ \delta_U \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \delta_X \\ \delta_Y \\ \delta_Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\cos \lambda \sin \varphi & \cos \lambda \cos \varphi \\ \cos \lambda & -\sin \lambda \sin \varphi & \sin \lambda \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta_E \\ \delta_N \\ \delta_U \end{pmatrix}$$

Avec :

$\begin{pmatrix} \delta_X \\ \delta_Y \\ \delta_Z \end{pmatrix}$ un vecteur exprimé dans le repère ECEF géocentrique

$\begin{pmatrix} \delta_E \\ \delta_N \\ \delta_U \end{pmatrix}$ un vecteur exprimé dans le repère local (East, North, Up)

λ, φ La longitude et la latitude de la station (la latitude et la longitude de la station peuvent être calculées à partir des coordonnées ECEF géocentriques, la méthode à appliquer est sur le site web de l'IGN (<https://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/pedagogiques/TransformationCoordonneesGeodesiques.pdf>)).

3.3.3 Cas d'un vecteur de rotation

D'après l'équation du 3.2.2, l'incertitude sur la position de la station liée à un changement d'époque se propage d'une époque à une autre avec la formule suivante :

$$\sigma_{ChEpoque}^2 = \sigma_{Vitesse}^2 * (t_1 - t_2)^2$$

Avec

$$\sigma_{Vitesse}^2 = Var \left(\omega \wedge \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + ORB \right)$$

D'où :

$$\sigma_{Vitesse}^2 = Var \left(\omega \wedge \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \right) + Var(ORB)$$

Et donc, l'incertitude sur la position de la station étant négligée (hypothèse étayée par le fait que deux stations très proches possèdent des vitesses très similaires) :

$$\sigma_{Vitesse}^2 = \begin{bmatrix} Z^2 \cdot Var(\omega_Y) + Y^2 \cdot Var(\omega_Z) \\ Z^2 \cdot Var(\omega_X) + X^2 \cdot Var(\omega_Z) + Var(ORB) \\ Y^2 \cdot Var(\omega_X) + X^2 \cdot Var(\omega_Y) \end{bmatrix}$$

Avec :

$\sigma_{ChEpoque}^2$ la variance liée au changement d'époque

$\sigma_{Vitesse}^2$ la variance sur la vitesse

$(t_1 - t_2)^2$ le carré de l'amplitude du changement d'époque

$Var(\omega_i)$ la variance des composantes





du vecteur de rotation, données par le modèle

X le vecteur position de la station
Y
Z

$Var(ORB)$ la variance du vecteur ORB, donnée par le modèle

4. Changement de réalisation

Cette transformation est effectuée par le développement limité d'une transformation de Helmert.

Cette transformation s'appuie sur les sept paramètres $T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z$ avec :

- T_x, T_y et T_z les paramètres de translation ;
- D le paramètre de changement d'échelle en ppm (homothétie par rapport à l'origine) ;
- R_x, R_y et R_z les paramètres de rotation³.

Ces paramètres sont systématiquement publiés à chaque réalisation d'un nouvel ITRF, entre la nouvelle réalisation et au moins la réalisation précédente, ils sont exprimés à l'époque de référence t_0 .

La transformation de Helmert s'écrit de la façon suivante, considérant le vecteur en entrée (X_A, Y_A, Z_A) et le vecteur en sortie (X_B, Y_B, Z_B) :

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -R_z & R_y \\ R_z & 0 & -R_x \\ -R_y & R_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$$

4.1 Changement d'époque des paramètres de Helmert

Les paramètres de transformation de Helmert⁴ sont exprimés à une certaine époque de référence t_0 , traduisant le fait que l'on connaît le passage d'une réalisation à une autre seulement à une époque donnée. Cependant, les dérivées de ces paramètres sont également connues, ce qui permet de déterminer la valeur des paramètres à n'importe quelle autre époque t_0' . Il faut alors calculer les paramètres de transformation pour l'époque à

3 La convention de signe utilisée dans ce document est celle utilisée par l'IERS. Cf. Technical note n°36 §4.1.1 <https://www.iers.org/SharedDocs/Publicationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.html>

4 Disponibles au §7.4

laquelle le changement de réalisation est désiré. On obtient les paramètres à une autre époque et réalisant l'opération suivante sur chaque paramètre : $\forall P_i \in \{T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z\} P_i(t_0') = P_i(t_0) + P_i'(t_0' - t_0)$

A partir des sept paramètres calculés à l'époque désirée, le changement de réalisation s'effectue en appliquant la transformation de Helmert aux coordonnées que l'on souhaite transformer. Le résultat de la transformation sera alors les coordonnées dans la réalisation d'arrivée à l'époque t_0' .

4.2 Propagation de l'incertitude

Comme les valeurs des paramètres de Helmert sont souvent très petites et les sigmas associés très faibles, il n'est pas rare de dire que

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_B}^2 \\ \sigma_{Y_B}^2 \\ \sigma_{Z_B}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_A}^2 \\ \sigma_{Y_A}^2 \\ \sigma_{Z_A}^2 \end{bmatrix}$$

Pour plus de détails sur la propagation complète de l'incertitude lors du changement de réalisation : Comme

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -R_z & R_y \\ R_z & 0 & -R_x \\ -R_y & R_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$$

En utilisant les formules suivantes sur les variances :

$$Var(A + B) = Var(A) + Var(B) + 2 * cov(A, B)$$

$$Var(A * B) = Cov(A^2, B^2) + (Var(A) + E(A)^2) * (Var(B) + E(B)^2) - (Cov(A, B) + E(A) * E(B))^2$$

On obtient, en supposant que tous les paramètres sont indépendants :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_B}^2 \\ \sigma_{Y_B}^2 \\ \sigma_{Z_B}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{T_x}^2 \\ \sigma_{T_y}^2 \\ \sigma_{T_z}^2 \end{bmatrix} + Var \left(\begin{bmatrix} (1+D) & -R_z & R_y \\ R_z & (1+D) & -R_x \\ -R_y & R_x & (1+D) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_B}^2 \\ \sigma_{Y_B}^2 \\ \sigma_{Z_B}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{T_x}^2 \\ \sigma_{T_y}^2 \\ \sigma_{T_z}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{X_A}^2 \\ \sigma_{Y_A}^2 \\ \sigma_{Z_A}^2 \end{bmatrix} + \sigma_D^2 * \left(\begin{bmatrix} \sigma_{X_A}^2 \\ \sigma_{Y_A}^2 \\ \sigma_{Z_A}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_A^2 \\ Y_A^2 \\ Z_A^2 \end{bmatrix} \right) + D^2 * \begin{bmatrix} \sigma_{X_A}^2 \\ \sigma_{Y_A}^2 \\ \sigma_{Z_A}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{Y_A}^2 * \sigma_{R_z}^2 + \sigma_{Y_A}^2 * R_z^2 + \sigma_{R_z}^2 * Y_A^2 + \sigma_{Z_A}^2 * \sigma_{R_y}^2 + \sigma_{Z_A}^2 * R_y^2 + \sigma_{R_y}^2 * Z_A^2 \\ \sigma_{X_A}^2 * \sigma_{R_z}^2 + \sigma_{X_A}^2 * R_z^2 + \sigma_{R_z}^2 * X_A^2 + \sigma_{Z_A}^2 * \sigma_{R_x}^2 + \sigma_{Z_A}^2 * R_x^2 + \sigma_{R_x}^2 * Z_A^2 \\ \sigma_{X_A}^2 * \sigma_{R_y}^2 + \sigma_{X_A}^2 * R_y^2 + \sigma_{R_y}^2 * X_A^2 + \sigma_{Y_A}^2 * \sigma_{R_x}^2 + \sigma_{Y_A}^2 * R_x^2 + \sigma_{R_x}^2 * Y_A^2 \end{bmatrix}$$

5 Biais de mise en référence

En France, chaque repère de référence légal n'est pas rigoureusement confondu avec le repère de référence géodésique sur lequel il est basé. Cette différence est appelée biais de mise en référence.

Les biais de mise en référence constatés sur les stations de références dus à diverses sources :

- La détermination initiale du repère de référence légal,
- L'incertitude de la vitesse de plaque,
- L'incertitude des déterminations des stations de référence,

La complexité des biais de mise en référence implique que les transformations soient recalculées régulièrement. Ce processus évolutif nécessite le calcul de solutions GNSS cumulées sur les stations permanentes de chaque entité territoriale.

Dans l'attente d'une application en ligne, on se reportera au § 6.5 pour un tableau estimatif des biais valide à la date du 01/11/2016. Pour plus d'information contacter le Service de Géodésie et de Nivellement de l'IGN : sgn@ign.fr.

Si l'incertitude recherchée lors du changement de repère est plus faible que l'amplitude des biais de mise en référence associé au repère de référence (Cf. 6.5) il faut corriger la position de la station de ces biais. Dans le cas contraire, la transformation peut s'arrêter ici et ainsi ignorer les biais de mise en référence.

■ 5.1 Application des biais de mise en référence

Dans le cas d'une application des biais de mise en référence⁵, les valeurs correspondantes sont à ajouter à la solution, l'incertitude sera alors recalculée :

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{Biais} \\ Y_{Biais} \\ Z_{Biais} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}$ La solution modifiée des biais de mise en référence

$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix}$ La solution sur laquelle il faut appliquer les biais de mise en référence

$\begin{bmatrix} X_{Biais} \\ Y_{Biais} \\ Z_{Biais} \end{bmatrix}$ Le vecteur biais de mise en référence

L'incertitude de la solution est calculée de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_S}^2 \\ \sigma_{Y_S}^2 \\ \sigma_{Z_S}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_E}^2 \\ \sigma_{Y_E}^2 \\ \sigma_{Z_E}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{X_{Biais}}^2 \\ \sigma_{Y_{Biais}}^2 \\ \sigma_{Z_{Biais}}^2 \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} \sigma_{X_S}^2 \\ \sigma_{Y_S}^2 \\ \sigma_{Z_S}^2 \end{bmatrix}$ L'incertitude sur la solution prenant en compte les biais

$\begin{bmatrix} \sigma_{X_E}^2 \\ \sigma_{Y_E}^2 \\ \sigma_{Z_E}^2 \end{bmatrix}$ L'incertitude de la solution avant application des biais

$\begin{bmatrix} \sigma_{X_{Biais}}^2 \\ \sigma_{Y_{Biais}}^2 \\ \sigma_{Z_{Biais}}^2 \end{bmatrix}$ L'incertitude associée aux biais

■ 5.2 Non-application des biais de mise en référence

Dans le cas d'une non-application des biais de mise en référence, la solution ne sera pas transformée. Cependant, l'incertitude associée à cette solution est à dégrader de l'amplitude du biais non corrigé :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_S}^2 \\ \sigma_{Y_S}^2 \\ \sigma_{Z_S}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_E}^2 \\ \sigma_{Y_E}^2 \\ \sigma_{Z_E}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{Biais}^2 \\ Y_{Biais}^2 \\ Z_{Biais}^2 \end{bmatrix}$$

avec

$\begin{bmatrix} \sigma_{X_S}^2 \\ \sigma_{Y_S}^2 \\ \sigma_{Z_S}^2 \end{bmatrix}$ L'incertitude de la solution dégradée

$\begin{bmatrix} \sigma_{X_E}^2 \\ \sigma_{Y_E}^2 \\ \sigma_{Z_E}^2 \end{bmatrix}$ L'incertitude de la solution à dégrader

$\begin{bmatrix} X_{Biais}^2 \\ Y_{Biais}^2 \\ Z_{Biais}^2 \end{bmatrix}$ L'amplitude du biais de mise en référence

6. Données sources

Afin de pouvoir effectuer toutes les transformations décrites précédem-

⁵ Ordre de grandeur des biais de mise en référence disponibles au 6.5

ment, il est indispensable d'avoir accès à certaines données :

■ 6.1 Définition des réalisations existantes

Ci-dessous la liste des différents repères de référence géodésiques rencontrés sur les territoires Français :

■ 6.2 Positions et vitesses de stations dans les réalisations de l'ITRS

Les positions et vitesses des stations de l'IGS calculées dans les différentes réalisations de l'ITRS sont accessibles sur le site de l'ITRF (<http://itrf.ensg.ign.fr/rubrique/GetITRFcoord>).

Nom	Emprise	Réalisation de l'ITRS associée	Source
RGF93	France métropolitaine	ETRF2000@2009	http://geodesie.ign.fr/index.php?page=rgf93
RGFG95	Guyane	ITRF1993@1995	https://geodesie.ign.fr/contenu/fichier/s/documentation/SRCfrance.pdf
RGTAAF	Ile Amsterdam Iles Crozet Ile Europa Iles Kerguelen Ile Saint Paul Ile Péterles Terre Adélie	ITRF2005@2007.270	http://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/srtom/SystemeCOM.pdf
RGSPM06	Saint-Pierre-et-Miquelon	ITRF2000@2006	http://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/srtom/SystemeCOM.pdf
RGM04	Mayotte	ITRF2000@2004	http://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/srtom/SystemeCOM.pdf
RGR92	Réunion	ITRF1991@1993	http://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/srtom/systemeReunion.pdf
RGAF09	Antilles Françaises	ITRF2005@2009	https://geodesie.ign.fr/contenu/fichier/s/documentation/srtom/Antilles-Geodesie-2017-v2-1.pdf
RGWF	Wallis-et-Futuna	ITRF1994@1993	https://dittt.gouv.nc/geodesie-et-nivellement/les-referentiels-de-nouvelle-caledonie
RGPF92	Polynésie Française	ITRF1992@1993	http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/reseau-geodesique-de-polynesie-francaise-rgpf/le-rgpf/
RGNC91-93	Nouvelle-Calédonie	ITRF1990@1989	https://dittt.gouv.nc/geodesie-et-nivellement/les-referentiels-de-nouvelle-caledonie

6.3 Vecteurs de rotation des plaques tectoniques

Ci-dessous une liste des différents modèles de vitesse des plaques tectoniques :

Nom du modèle	Réalisation de l'ITRS associée	Source
ITRF2014 PMM	ITRF2014	Altamimi, Z. ; Métivier, L. & Collilieux, X. ITRF2008 plate motion model Journal of Geophysical Research, 2012, 117, B07402
ITRF2008 PMM	ITRF2008	Altamimi, Z. ; Métivier, L. ; Rebischung, P.; Rouby, H. & Collilieux, X. ITRF2014 plate motion model Geophysical Journal International, 2017, 209, 1906-1912

6.4 Paramètres de transformation

Ci-dessous une liste des différents paramètres de transformation de Helmert :

Réalisation de départ	Réalisations(s) d'arrivée	Source
ITRF2014	ITRFs précédents	http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt
ITRF2008	ITRFs précédents	http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt
ITRF2005	ITRF2000	http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php
ITRF2000	ITRFs précédents	ftp://itrf.ensg.ign.fr/pub/itrf/ITRF2000
ITRF2014 et précédents	ETRF2014	http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf
ITRF2008 et précédents	ETRF2000	http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf

6.5 Biais de mise en référence

Ci-dessous la liste des biais de mise en référence pour les repères de référence géodésiques rencontrés sur le territoire Français à la date du 01/11/2016 :

Nom	Emprise	Ordre de grandeur du biais 3D
RGF93	France métropolitaine	≈0
RGFG95	Guyane	~4 cm
RGTAAF	Ile Amsterdam Iles Crozet Ile Europa Iles Kerguelen Ile Saint-Paul Ile Péterls Terre Adélie	Non déterminé
RGSPM06	Saint-Pierre-et-Miquelon	~4 cm
RGM04	Mayotte	< 1 cm
RGR92	Réunion	~7 cm
RGAF09	Antilles Françaises	< 1 cm
RGWF	Wallis-et-Futuna	Non déterminé
RGPF92	Polynésie Française	~30 cm
RGNC91-93	Nouvelle-Calédonie	~60 cm

7. Exemples numériques

7.1 Changement d'époque sans changement de réalisation

Dans cet exemple, l'objectif est de transformer les coordonnées

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2005} \\ Y_{I08@2005} \\ Z_{I08@2005} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5246415.521 \\ -3077260.014 \\ -1913842.208 \end{pmatrix}$$

de la station THTI, exprimées dans l'ITRF2008@2005, dans l'ITRF2008@2010.

7.1.1 Raisonnement

Les époques du repère d'arrivée et du repère de départ ne sont pas les mêmes, il va donc falloir réaliser un changement d'époque. Cependant, les réalisations associées aux repères de départ et d'arrivée sont identiques, donc aucun changement de réalisation n'est à effectuer.

Pour réaliser un changement d'époque il faut déterminer la vitesse de la station. La vitesse n'est pas donnée, donc elle va être supposée inconnue.

La vitesse de cette station dans l'ITRF2008 est connue. Mais nous allons la considérer inconnue pour cet exemple.

Cette station se trouve en Polynésie Française, sur la plaque tectonique Pacifique (PCFC). Elle se trouve suffisamment loin des bords de cette plaque pour que son mouvement soit cohérent avec la plaque rigide associée.

Nous allons donc modéliser la vitesse de la station en utilisant le vecteur de rotation associé à cette plaque.

Dans le modèle ITRF08 PMM, on peut trouver les composantes du vecteur de rotation de la plaque PCCF, ainsi que l'ORB :

$$\omega_{PCCF} = \begin{pmatrix} -0.411 \\ 1.036 \\ -2.166 \end{pmatrix} \text{ (en mas/an) et}$$

$$ORB = \begin{pmatrix} 0.41 \\ 0.22 \\ 0.41 \end{pmatrix} \text{ (en mm/an)}$$

7.1.2 Application

En appliquant la formule du 3.2.2, on obtient alors le vecteur vitesse suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \omega \wedge \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + ORB$$

Le vecteur ORB sera négligé. (Cf. remarque dans le 3.2.2)



$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \frac{2 * \pi}{1000 * 3600 * 360} * \begin{pmatrix} -0.411 \\ 1.036 \\ -2.166 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -5246415.5210 \\ -3077260.0140 \\ -1913842.2080 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0419 \\ 0.0513 \\ 0.0325 \end{pmatrix}$$

En appliquant la formule du 3.1.1, on obtient les coordonnées suivantes :

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2010} \\ Y_{I08@2010} \\ Z_{I08@2010} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5246415.521 \\ -3077260.014 + (2010 - 2005) * (-0.0419) \\ -1913842.208 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0513 \\ 0.0325 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2010} \\ Y_{I08@2010} \\ Z_{I08@2010} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5246415.7305 \\ -3077259.7575 \\ -1913842.0455 \end{pmatrix}$$

L'incertitude donnée par le modèle de vitesse est la suivante :

$$\begin{pmatrix} Var(\omega_X) \\ Var(\omega_Y) \\ Var(\omega_Z) \end{pmatrix} = \left(\frac{2 * \pi}{1000 * 3600 * 360} \right)^2 * \begin{pmatrix} 0.007^2 \\ 0.007^2 \\ 0.009^2 \end{pmatrix}$$

D'après le 3.3.3, l'incertitude associée au changement est donc (le vecteur ORB est négligé) :

$$\sigma_{Ch\acute{e}poque}^2 = (t_1 - t_2)^2 * \begin{pmatrix} Z^2 * Var(\omega_Y) + Y^2 * Var(\omega_Z) \\ Z^2 * Var(\omega_X) + X^2 * Var(\omega_Z) \\ Y^2 * Var(\omega_X) + X^2 * Var(\omega_Y) \end{pmatrix}$$

Donc

$$\sigma_{Ch\acute{e}poque}^2 = \frac{2 * \pi * (2010 - 2005)^2}{1000 * 3600 * 360} * \begin{pmatrix} (-1913842.0455)^2 * 0.007^2 + (-3077259.7575)^2 * 0.009^2 \\ (-1913842.0455)^2 * 0.007^2 + (-5246415.7305)^2 * 0.009^2 \\ (-3077259.7575)^2 * 0.007^2 + (-5246415.7305)^2 * 0.007^2 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{Ch\acute{e}poque}^2 = \begin{pmatrix} 0.00000056 \\ 0.00000142 \\ 0.00000107 \end{pmatrix}$$

L'incertitude sur la position de la station dans l'ITRF08@2010 est de :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{X_{I08@2010}}^2 \\ \sigma_{Y_{I08@2010}}^2 \\ \sigma_{Z_{I08@2010}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{X_{I08@2005}}^2 \\ \sigma_{Y_{I08@2005}}^2 \\ \sigma_{Z_{I08@2005}}^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.00000056 \\ 0.00000142 \\ 0.00000107 \end{pmatrix}$$

7.2 Changement de réalisation sans changement d'époque

Dans cet exemple, l'objectif est de transformer les coordonnées

$$\begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4870283.7460 \\ -3864605.3170 \\ -1418872.4970 \end{pmatrix}$$

exprimées dans l'ITRF2014 @ 2015, dans l'ITRF2008 @ 2015.

7.2.1 Raisonnement

Les époques du repère d'arrivée et du repère de départ sont les mêmes, donc aucun changement d'époque n'est à effectuer. Cependant, les réalisations associées aux repères de départ et d'arrivée ne sont pas les mêmes, il va donc falloir réaliser un changement de réalisation.

Pour réaliser un changement de réalisation, il faut effectuer une transformation de Helmert à 7 paramètres sur les coordonnées fournies.

Sur le site de l'ITRF on trouve les valeurs suivantes pour les paramètres de la transformation ITRF2014 -> ITRF2008 à l'époque 2010.0 :

$$\begin{cases} T_X(2010) = 1.6 \text{ mm} \\ T_Y(2010) = 1.9 \text{ mm} \\ T_Z(2010) = 2.4 \text{ mm} \\ D(2010) = -0.02 \text{ ppb} \\ R_X(2010) = 0.00 \text{ mas} \\ R_Y(2010) = 0.00 \text{ mas} \\ R_Z(2010) = 0.00 \text{ mas} \\ \dot{T}_X = 0.0 \text{ mm/an} \\ \dot{T}_Y = 0.0 \text{ mm/an} \\ \dot{T}_Z = -0.1 \text{ mm/an} \\ \dot{D} = 0.03 \text{ ppb/an} \\ \dot{R}_X = 0.00 \text{ mas/an} \\ \dot{R}_Y = 0.00 \text{ mas/an} \\ \dot{R}_Z = 0.00 \text{ mas/an} \end{cases}$$

Les paramètres de transfert étant connus à une époque différente de la transformation que l'on souhaite réaliser (2010 ≠ 2015), il faut passer tous les paramètres de transformation depuis l'époque 2010 vers l'époque 2015. On obtient alors :

$$\begin{cases} T_X(2015) = T_X(2010) + \dot{T}_X * (2015 - 2010) \\ T_Y(2015) = T_Y(2010) + \dot{T}_Y * (2015 - 2010) \\ T_Z(2015) = T_Z(2010) + \dot{T}_Z * (2015 - 2010) \\ D(2015) = D(2010) + \dot{D} * (2015 - 2010) \\ R_X(2015) = R_X(2010) + \dot{R}_X * (2015 - 2010) \\ R_Y(2015) = R_Y(2010) + \dot{R}_Y * (2015 - 2010) \\ R_Z(2015) = R_Z(2010) + \dot{R}_Z * (2015 - 2010) \end{cases}$$

7.2.2 Application

En réalisant l'application numérique, on obtient les 7 paramètres de la transformation de Helmert :

$$\begin{cases} T_X(2015) = 1.6 + 0.0 * (2015 - 2010) = 1.6 \text{ mm} = 0.0016 \text{ m} \\ T_Y(2015) = 1.9 + 0.0 * (2015 - 2010) = 1.9 \text{ mm} = 0.0019 \text{ m} \\ T_Z(2015) = 2.4 - 0.1 * (2015 - 2010) = 1.9 \text{ mm} = 0.0019 \text{ m} \\ D(2015) = -0.02 + 0.03 * (2015 - 2010) = 0.13 \text{ ppb} = 0.13 * 10^{-9} \\ R_X(2015) = 0.00 + 0.00 * (2015 - 2010) = 0.00 \text{ mas} = 0.00 \text{ rad} \\ R_Y(2015) = 0.00 + 0.00 * (2015 - 2010) = 0.00 \text{ mas} = 0.00 \text{ rad} \\ R_Z(2015) = 0.00 + 0.00 * (2015 - 2010) = 0.00 \text{ mas} = 0.00 \text{ rad} \end{cases}$$

En appliquant la formule du 4, on obtient :

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2015} \\ Y_{I08@2015} \\ Z_{I08@2015} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + D * \begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -R_Z & R_Y \\ R_Z & 0 & -R_X \\ -R_Y & R_X & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2015} \\ Y_{I08@2015} \\ Z_{I08@2015} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.0016 \\ 0.0019 + 0.13 * 10^{-9} \\ 0.0019 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_{I14@2015} \\ Y_{I14@2015} \\ Z_{I14@2015} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2015} \\ Y_{I08@2015} \\ Z_{I08@2015} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4870283.7460 \\ -3864605.3170 \\ -1418872.4970 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.0016 \\ 0.0019 + 0.13 * 10^{-9} \\ 0.0019 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 4870283.7460 \\ -3864605.3170 \\ -1418872.4970 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_{I08@2015} \\ Y_{I08@2015} \\ Z_{I08@2015} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4870283.7482 \\ -3864605.3156 \\ -1418872.4953 \end{pmatrix}$$

Propagation de l'incertitude : les variances sur les paramètres $T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y$ et R_z sont faibles. Leur prise en compte dans la propagation de l'incertitude en utilisant la formule du 4.2 amènerait à considérer des termes en (10^{-8}) n'affectant l'incertitude qu'en dessous du dixième de mm.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{X_{I08@2015}}^2 \\ \sigma_{Y_{I08@2015}}^2 \\ \sigma_{Z_{I08@2015}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{X_{I14@2015}}^2 \\ \sigma_{Y_{I14@2015}}^2 \\ \sigma_{Z_{I14@2015}}^2 \end{pmatrix} + O(10^{-8})$$

Donc l'incertitude sur la position de la station dans l'ITRF2008 @ 2015 est de :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{X_{I08@2015}}^2 \\ \sigma_{Y_{I08@2015}}^2 \\ \sigma_{Z_{I08@2015}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_{I14@2015}}^2 \\ \sigma_{Y_{I14@2015}}^2 \\ \sigma_{Z_{I14@2015}}^2 \end{bmatrix}$$

7.3 Changement de réalisation et changement d'époque

Dans cet exemple, l'objectif est de transformer les coordonnées de la station "MASB"

$$\begin{bmatrix} X_{I08@2000} \\ Y_{I08@2000} \\ Z_{I08@2000} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4232503.4410 \\ -334538.1600 \\ 4743816.7480 \end{bmatrix}$$

exprimées dans l'ITRF2008 @ 2000, dans le RGF93.

7.3.1 Raisonnement

D'après le 6.1, le RGF93 correspond à l'ETRF2000@2009. Les époques du repère d'arrivée et du repère de départ ne sont pas les mêmes. Il va donc falloir réaliser un changement d'époque. La vitesse n'étant pas donnée dans l'énoncé, on la suppose inconnue.

La position dont les coordonnées sont à transformer se trouve en France métropolitaine, on peut utiliser la station BRST se trouvant très proche et supposer que les deux stations ont une vitesse identique. Nous allons utiliser la vitesse de la station BRST dans l'ITRF08 pour modéliser la vitesse de notre station. La vitesse de la station BRST est disponible sur le site de l'ITRF.

La station BRST a subi des discontinuités, mais sa vitesse n'a pas été modifiée (ses coordonnées ont été modifiées de moins de 2 cm). Les réalisations associées aux repères d'arrivée et de départ ne sont pas les mêmes. Il va donc falloir réaliser un changement de réalisation à l'aide d'une transformation de Helmert à 7 paramètres sur les coordonnées fournies.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{BRST} \\ \dot{Y}_{BRST} \\ \dot{Z}_{BRST} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0115 \text{ m/an} \\ 0.0172 \text{ m/an} \\ 0.0115 \text{ m/an} \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \sigma_{\dot{X}_{BRST}} \\ \sigma_{\dot{Y}_{BRST}} \\ \sigma_{\dot{Z}_{BRST}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0001 \text{ m/an} \\ 0.0001 \text{ m/an} \\ 0.0001 \text{ m/an} \end{bmatrix}$$

Sur le site de l'ETRS89 (<http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>) on trouve les valeurs suivantes pour les paramètres de la transformation ITRF2008 -> ETRF2000 à l'époque 2000.

$$\begin{cases} T_X(2000) = 52.1 \text{ mm} \\ T_Y(2000) = 49.3 \text{ mm} \\ T_Z(2000) = -58.5 \text{ mm} \\ D(2000) = 1.34 \text{ ppb} \\ R_X(2000) = 0.891 \text{ mas} \\ R_Y(2000) = 5.390 \text{ mas} \\ R_Z(2000) = -8.712 \text{ mas} \\ \dot{T}_X = 0.1 \text{ mm/an} \\ \dot{T}_Y = 0.1 \text{ mm/an} \\ \dot{T}_Z = -1.8 \text{ mm/an} \\ \dot{D} = 0.08 \text{ ppb/an} \\ \dot{R}_X = 0.081 \text{ mas/an} \\ \dot{R}_Y = 0.490 \text{ mas/an} \\ \dot{R}_Z = -0.792 \text{ mas/an} \end{cases}$$

Les paramètres de transfert étant connus à une époque différente de la transformation que l'on souhaite réaliser (2000 ≠ 2009), il faut passer tous les paramètres de transformation depuis l'époque 2000 vers l'époque 2009. On obtient alors :

$$\begin{cases} T_X(2009) = T_X(2000) + \dot{T}_X * (2009 - 2000) \\ T_Y(2009) = T_Y(2000) + \dot{T}_Y * (2009 - 2000) \\ T_Z(2009) = T_Z(2000) + \dot{T}_Z * (2009 - 2000) \\ D(2009) = D(2000) + \dot{D} * (2009 - 2000) \\ R_X(2009) = R_X(2000) + \dot{R}_X * (2009 - 2000) \\ R_Y(2009) = R_Y(2000) + \dot{R}_Y * (2009 - 2000) \\ R_Z(2009) = R_Z(2000) + \dot{R}_Z * (2009 - 2000) \end{cases}$$

Pour cet exemple, le tableau du §6.5 indique que la dernière réalisation du RGF93 présente un biais nul par rapport à la réalisation associée de l'ETRS89 pour le RGF93. Aucun biais ne sera à ajouter pour obtenir la solution finale.

7.3.2 Application

Dans un premier temps, on change d'époque, sans changer de réalisation en passant de l'ITRF2008@2000 à l'ITRF2008@2009.

En appliquant la formule du 3.2.2, on obtient les coordonnées suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{I08@2000} \\ Y_{I08@2000} \\ Z_{I08@2000} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{X}_{BRST} \\ \dot{Y}_{BRST} \\ \dot{Z}_{BRST} \end{bmatrix} * (2009 - 2000)$$

$$\begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4232503.441 \\ -334538.160 \\ 4743816.748 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.15 * 10^{-2} \\ 1.72 * 10^{-2} \\ 1.15 * 10^{-2} \end{bmatrix} * (2009 - 2000)$$

$$\begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4232503.3375 \\ -334538.0052 \\ 4743816.8515 \end{bmatrix}$$

En réalisant l'application numérique du § 7.3.1, on obtient les 7 paramètres de la transformation de Helmert permettant le changement de réalisation :

$$\begin{cases} T_X(2009) = 52.1 + 0.1 * (2009 - 2000) = 53 \text{ mm} = 0.053 \text{ m} \\ T_Y(2009) = 49.3 + 0.1 * (2009 - 2000) = 50.2 \text{ mm} = 0.0502 \text{ m} \\ T_Z(2009) = -58.5 - 1.8 * (2009 - 2000) = -74.7 \text{ mm} = -0.0747 \text{ m} \\ D(2009) = 1.34 + 0.08 * (2009 - 2000) = 2.06 \text{ ppb} = 2.06 * 10^{-9} \\ R_X(2009) = 0.891 + 0.081 * (2009 - 2000) = 1.62 \text{ mas} = 8 * 10^{-9} \text{ rad} \\ R_Y(2009) = 5.390 + 0.490 * (2009 - 2000) = 9.80 \text{ mas} = 48 * 10^{-9} \text{ rad} \\ R_Z(2009) = -8.71 - 0.792 * (2009 - 2000) = -15.84 \text{ mas} = -77 * 10^{-9} \text{ rad} \end{cases}$$

En appliquant la formule du 3.3.14, on obtient :

$$\begin{bmatrix} X_{RGF93} \\ Y_{RGF93} \\ Z_{RGF93} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + D * \begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -R_Z & R_Y \\ R_Z & 0 & -R_X \\ -R_Y & R_X & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{RGF93} \\ Y_{RGF93} \\ Z_{RGF93} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.053 \\ 0.0502 \\ -0.0747 \end{bmatrix} + 2.06 * 10^{-9} * \begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 77 & 48 \\ -77 & 0 & -8 \\ -48 & 8 & 0 \end{bmatrix} * 10^{-9} * \begin{bmatrix} X_{I08@2009} \\ Y_{I08@2009} \\ Z_{I08@2009} \end{bmatrix}$$

Les coordonnées de la station "MASB" dans le RGF93 sont donc :

$$\begin{pmatrix} X_{RGF93} \\ Y_{RGF93} \\ Z_{RGF93} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4232503.6012 \\ -334538.3195 \\ 4743816.5807 \end{pmatrix}$$

L'incertitude sur la position de la station "MASB" peut être calculée de la manière suivante (on suppose que le changement d'époque et le changement de réalisation sont indépendants) :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{X_{RGF93}}^2 \\ \sigma_{Y_{RGF93}}^2 \\ \sigma_{Z_{RGF93}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{X_{ChEpoque}}^2 \\ \sigma_{Y_{ChEpoque}}^2 \\ \sigma_{Z_{ChEpoque}}^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{X_{ChRéal}}^2 \\ \sigma_{Y_{ChRéal}}^2 \\ \sigma_{Z_{ChRéal}}^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{X_{I08@2000}}^2 \\ \sigma_{Y_{I08@2000}}^2 \\ \sigma_{Z_{I08@2000}}^2 \end{pmatrix}$$

Avec :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{X_{ChEpoque}}^2 \\ \sigma_{Y_{ChEpoque}}^2 \\ \sigma_{Z_{ChEpoque}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0001^2 \\ 0.0001^2 * (2009 - 2000)^2 \\ 0.0001^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.00000081 \\ 0.00000081 \\ 0.00000081 \end{pmatrix}$$

La vitesse utilisée dans le changement d'époque est celle de la station BRST, on utilise également les données de la station BRST pour calculer l'incertitude sur la vitesse du point MASB.

Aucune variance n'est fournie sur les paramètres de transferts entre l'ITRF08 et l'ETRF2000. Comme les paramètres d'Helmert sont relativement faibles, alors l'incertitude associée au changement de réalisation est supposée nulle :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{X_{ChRéal}}^2 \\ \sigma_{Y_{ChRéal}}^2 \\ \sigma_{Z_{ChRéal}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Donc l'incertitude sur la position de la station "MASB" vaut :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{X_{RGF93}}^2 \\ \sigma_{Y_{RGF93}}^2 \\ \sigma_{Z_{RGF93}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.00000081 \\ 0.00000081 \\ 0.00000081 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{X_{I08@2000}}^2 \\ \sigma_{Y_{I08@2000}}^2 \\ \sigma_{Z_{I08@2000}}^2 \end{pmatrix}$$

Contact

Raphaël LEGOUGE, Shom raphael.legouge@shom.fr

Gaël ANDRÉ, Shom

Adélaïde MISSAULT, Shom

Julian LE DEUNÉ, Shom

Samuel BRANCHU, IGN

ABSTRACT

This document explains the methods to be used to carry out the transformation of coordinates expressed in a geodetic reference frame derived from an implementation of ITRS to another geodetic reference frame also derived from an implementation of ITRS. Thus positions determined in PPP, often expressed in both orbit and clock references, or during differential processing using stations whose coordinates are known in a realisation of ITRS, can be transformed into the legal reference system.

■ NDLR : Attention à la convention des rotations

Traduit du site IOGP (*International Association of Oil & Gas Producers, Geomatics section*)

<https://www.iogp.org/geomatics/>

[http://www.epsg.org/Portals/0/373-07-2.](http://www.epsg.org/Portals/0/373-07-2.pdf?ver=2018-10-12-153840-577)

[pdf?ver=2018-10-12-153840-577](http://www.epsg.org/Portals/0/373-07-2.pdf?ver=2018-10-12-153840-577)

Deux conventions opposées sont utilisées pour les rotations : elles peuvent être appliquées au vecteur de position dans le système de coordonnées de référence source ou aux axes du système de coordonnées de référence source.

a) La convention de rotation des axes du système de coordonnées ou *The Coordinate Frame rotation convention*.

Les rotations sont appliquées à l'ensemble des axes de coordonnées. La convention de signe est telle qu'une rotation positive du système autour d'un axe est définie comme une rotation du système de coordonnées dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'elle est vue depuis l'origine du système de coordonnées cartésien dans la direction positive de cet axe. Une rotation positive autour de l'axe Z uniquement d'un système source à un système cible aura pour résultat une valeur de longitude plus petite pour le point dans le système de référence de coordonnées cible.

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 1 & r_z & -r_y \\ -r_z & 1 & r_x \\ r_y & -r_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$

$$K = 1 + D$$

b) La convention de rotation du vecteur de position ou *The Position Vector rotation convention*.

Les rotations sont appliquées au vecteur de position. La convention de signe est telle qu'une rotation positive autour d'un axe est définie comme une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre du vecteur de position vu depuis l'origine du système cartésien dans la direction positive de cet axe ; par exemple, une rotation positive autour de l'axe Z uniquement du système source au système cible aura pour résultat une valeur de longitude plus grande pour le point du système cible.

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 1 & -r_z & r_y \\ +r_z & 1 & -r_x \\ -r_y & +r_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$

$$K = 1 + D$$

Dans certaines publications, telles que celle de l'*International Earth Rotation Service* (IERS), cette convention de rotation est décrite comme une rotation du cadre de coordonnées dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. C'est l'opposé de la convention des axes du système de coordonnées en (a).

La convention IERS utilisée dans cet article est donc bien la convention de rotation du vecteur de position ou *The Position Vector rotation convention*.

Quoique les logiciels actuels tiennent souvent compte des 2 conventions, dans le passé la convention (a) était utilisée par les USA et l'Australie tandis que la convention (b) l'était par l'Europe. Il est donc crucial que la convention sous-jacente à la définition des paramètres de rotations soit bien comprise et communiquée lors de l'échange de valeurs de paramètres de transformation, afin que les valeurs de paramètres puissent être associées à la méthode de transformation de coordonnées correcte (algorithme) implémentée dans le logiciel.

Développer l'Afrique, grâce au recensement des stations GNSS permanentes

■ Derrick KOOME – Clement OGAJA – Eldar RUBINOV – Version française Bernard FLACELIÈRE

Cet article présente un projet de carte des stations GNSS permanentes (CORS: Continuously Operating Reference Stations) en Afrique, une carte en ligne sur Internet contenant des informations sur les stations permanentes GNSS situées sur le continent africain. Le projet vise à compiler et à maintenir une base de données complète de toutes les installations GNSS permanentes en Afrique dans le but de connecter les fournisseurs de services aux utilisateurs finaux de la technologie. Ce document décrit l'état actuel du projet et les projets futurs.

MOTS-CLÉS

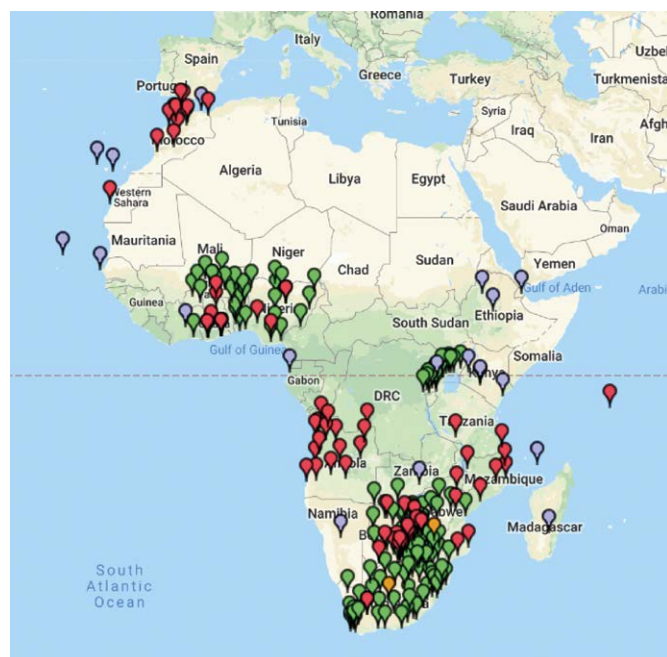
GNSS, CORS, Corsmap, Web, AFREF, IGS, RCMRD

Introduction

Une station GNSS permanente est une station GNSS qui observe en continu. Ces stations sont généralement regroupées en réseaux qui peuvent être locaux en couvrant un petit territoire, comme une municipalité ou un département d'un pays, aux réseaux régionaux, nationaux et mondiaux. Ces réseaux constituent des infrastructures géodésiques permettant de réaliser et d'accéder à des systèmes de références terrestres (ITRF, AFREF, national...) tout en surveillant les mouvements tectoniques. Ces réseaux permanents diffusent en temps réel ou différé les observations ou des corrections différentielles, soit gratuitement soit à titre payant. Une station permanente peut appartenir à plusieurs réseaux.

Dans la plupart des régions du monde, les stations permanentes GNSS s'appuient sur une technologie mûre et bien établie qui existe depuis plus de deux décennies. La plupart des pays ont mis en place leurs propres réseaux permanents. Dans certains pays comme les États-Unis ou l'Europe, il existe des réseaux permanents constitués de plusieurs centaines de

Figure 1.
L'état actuel
de Corsmap au
21 janvier 2019.



stations au service de professionnels de tous types : géomètres, agriculteurs, géographes, chercheurs, etc.

En Afrique, l'histoire est différente. Il existe un grand nombre de stations GNSS permanentes, mais très peu d'informations à leur sujet, ce qui rend la vie difficile pour un nombre croissant d'utilisateurs qui pourraient tirer parti de l'utilisation de cette technologie. Les utilisateurs sont des chercheurs, des scientifiques ou de grandes sociétés multinationales de topographie effectuant des levés terrestres, hydrographiques et aériens, mais aussi des géomètres topographes locaux qui peuvent recevoir des corrections RTK d'une station de référence locale.

Il nous était très difficile de localiser les différents sites GNSS permanents en Afrique et nous ne disposons que de très peu de métadonnées les concernant, jusqu'à ce que trois professionnels des techniques géospaciales constatent ce

manque et décident de remédier à cette situation. Clement Ogaja (États-Unis), Eldar Rubinov (Australie) et Derrick Koome (Kenya) ont fondé Corsmap, une initiative visant à inventorier tous les sites GNSS permanents en Afrique et à enrichir leurs métadonnées. Cela a abouti à une carte Web simplement appelée Corsmap et qui peut être consultée sur www.corsmap.com. La figure 1 montre la capture d'écran de la carte Web Corsmap. Les stations sont actuellement codées par couleur selon quatre catégories – celles qui transmettent en continu des données en temps réel, celles qui collectent uniquement des données statiques (par exemple pour des applications géophysiques), celles qui contribuent à l'infrastructure géodésique de référence africain (AFREF) et celles faisant partie du réseau IGS. Bien sûr, comme certaines stations remplissent plus d'un de ces critères, un système d'information plus complet sera nécessaire à l'avenir.

Voici quelques fonctionnalités de Corsmap :

- il y a plusieurs façons de découvrir rapidement les informations sur les stations, telles que la recherche par mots-clés,
- les moyens sont simples et faciles pour ajouter ou modifier des informations par les utilisateurs sur une station,
- une fois qu'une station a été identifiée, on peut s'assurer de l'affichage des métadonnées,
- on accède à une page d'introduction d'une station particulière donnant des détails sur cette station de base,
- on peut zoomer sur une station jusqu'au niveau de la rue,
- un forum est accessible à la communauté, permettant aux utilisateurs d'enregistrer et d'ajouter des informations sur les stations.

Le référentiel géodésique africain, African Geodetic Reference Frame (AFREF)

Il est intéressant de noter qu'il existe déjà une initiative visant à encourager et à faire pression sur les États africains pour qu'ils installent ces stations sous les auspices de l'AFREF. AFREF est un

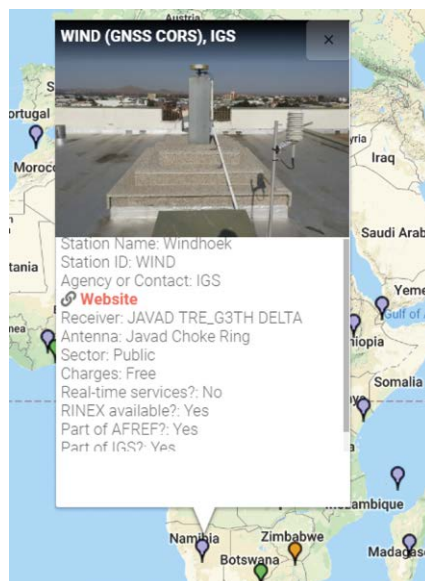


Figure 3. Un exemple de menu contextuel d'une station permanente GNSS sélectionnée.

projet visant à unifier les nombreux référentiels géodésiques africains en utilisant entre autres les observations des stations GNSS permanentes pour un référentiel géodésique unifié. Il incite les états africains à le faire par le biais des agences nationales de cartographie. Leurs progrès sont mis à jour par une autre organisation basée à Nairobi, le *Regional Center for Mapping of*



Figure 4. Chaque station RGP possède sa propre page comprenant toutes les métadonnées.

Resources for Development (RCMRD) ou Centre régional de cartographie des ressources pour le développement. Leur dernière mise à jour date de juin 2016. La figure 2 montre la carte AFREF.

Les données de ces stations sont disponibles sur le site Web de l'AFREF, mais quelquefois peu d'informations sont disponibles concernant les stations elles-mêmes. C'est là que le projet Corsmap peut aider des organisations telles que RCMRD à effectuer le suivi des stations AFREF par la synthèse des informations.

À titre d'exemple, les figures 3 et 4 illustrent la station IGS Windhoek en Namibie, qui fait également partie d'AFREF. La figure 3 montre le menu contextuel qui apparaît lorsqu'on clique sur la station, et la figure 4 montre la page actuelle de cette station, y compris une photo à grande échelle, ainsi que toutes les informations utiles sur la station, par exemple le gestionnaire, le contact, les modèles de récepteur et d'antenne. Ces informations peuvent bien sûr être accessibles sur le site IGS.

Progrès en cours

Au moment de la rédaction de cet article (janvier 2019), 253 stations de 27 pays étaient incluses dans la Corsmap. La collecte d'informations s'avère être un processus laborieux

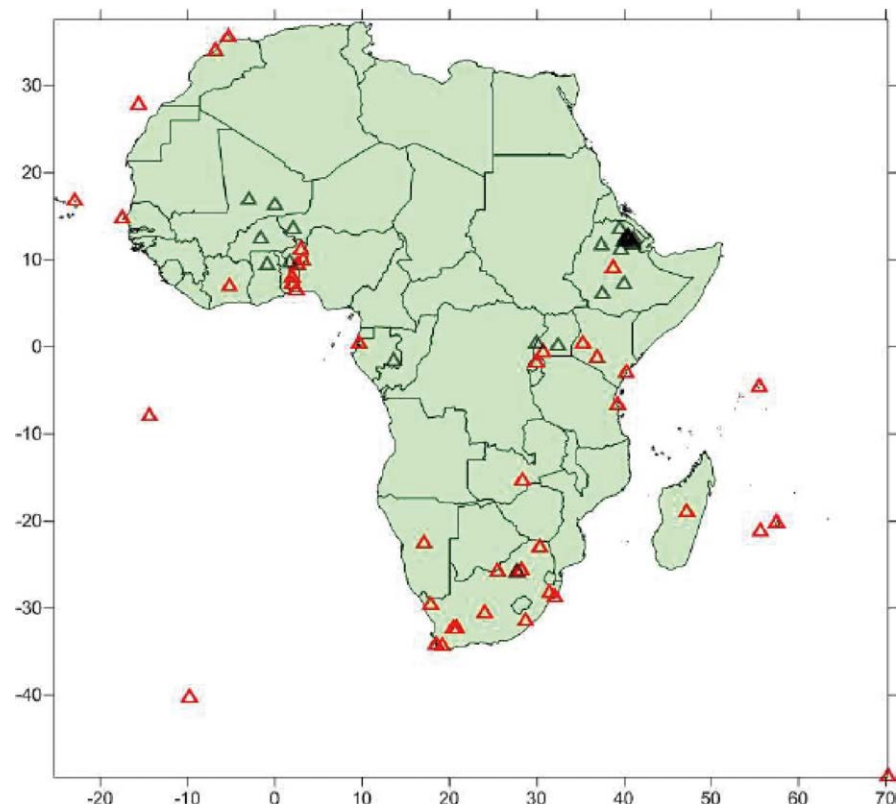


Figure 2. Carte des stations AFREF. © <http://www.afrefdata.org>.

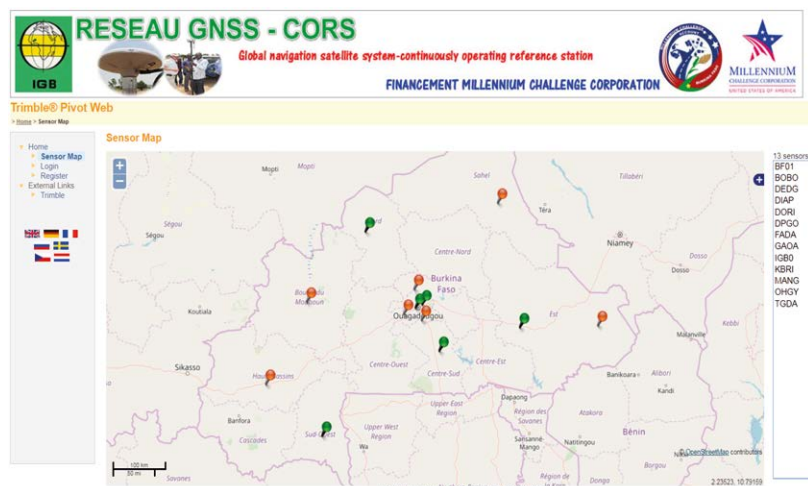


Figure 5. La page Web Trimble Pivot du réseau permanent au Burkina Faso.

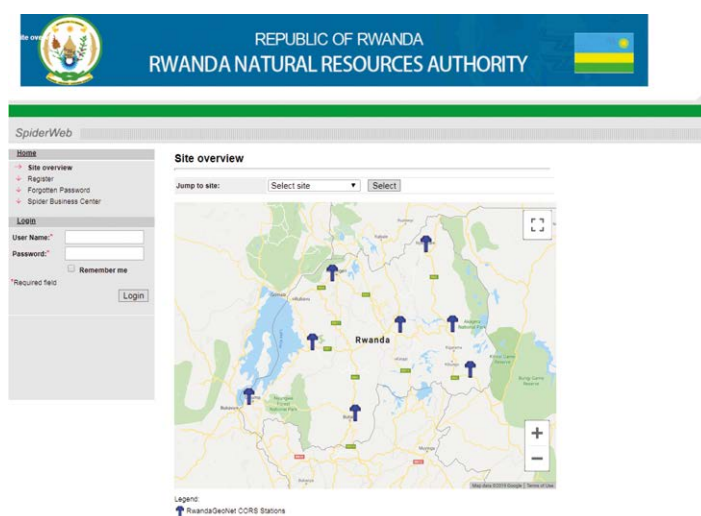


Figure 6. La page Leica Spiderweb du RNRA par réseau permanent au Rwanda.

Afrique) qui a été publié sur LinkedIn¹. Clement et Eldar ont lu l'article et ont contacté Derrick au sujet du contenu de son article. Ensemble, ils ont échangé des idées sur Skype et ont mis au point l'idée originale de Corsmap. Depuis lors, d'autres articles sur LinkedIn ont été publiés dans ce but.

En janvier 2019, le site Web Corsmap comptait 61 utilisateurs enregistrés, et 19 comptes utilisateurs supplémentaires ont été créés par l'équipe Corsmap pour les stations ajoutées à partir de sources publiques.

Les pays pour lesquels le contact a été établi et les informations vérifiées sont l'Afrique du Sud, le Mozambique, le Zimbabwe, l'Ouganda et le Ghana. Les pays pour lesquels des informations ont été recueillies auprès de sources publiques sont le Botswana, l'Angola, le Rwanda, le Nigeria, le Burkina Faso et le Bénin. Enfin, parmi les pays dotés de réseaux GNSS, mais qui doivent encore figurer sur la carte, figurent entre autres la Namibie, l'Éthiopie, la Côte d'Ivoire, le Maroc, la Tunisie, l'Algérie et l'Égypte. Bien que de nombreux pays soient toujours absents, Corsmap est en train de mettre en place une base de données centralisée couvrant toutes les installations GNSS en Afrique ainsi que les métadonnées, avec l'aide de nombreux professionnels du domaine géospatial dans toute l'Afrique. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un produit fini, le site Web Corsmap génère un trafic d'environ mille visiteurs par mois, 60 % d'entre eux ayant des sessions actives. Les figures 7 et 8 montrent respectivement le nombre de pages visitées et le nombre d'utilisateurs du site depuis sa mise en ligne.

Il convient de noter que Corsmap ne fournit ni coordonnées, ni accès aux données des stations, mais fournit plutôt un lien vers le fournisseur des données de la station, afin que ces informations ne puissent être obtenues que par le gestionnaire de la station. De cette manière, il n'y a pas violation de droit d'auteur et les gestionnaires des stations possèdent toujours le contrôle. Corsmap est simplement une liaison entre les fournisseurs et les utilisateurs de stations GNSS permanentes.

¹ <https://www.linkedin.com/pulse/cors-network-conversation-continent-africa-derrick-koome/>



et lent, elle est complétée en utilisant diverses méthodes. L'approche privilégiée consiste à contacter le dépositaire du réseau et à lui demander de fournir les informations relatives à Corsmap. Cela peut se faire de deux manières : les utilisateurs peuvent soit remplir un questionnaire et le renvoyer à l'équipe Corsmap, soit s'inscrire sur le site Web et saisir toutes les données eux-mêmes. Cette dernière méthode est préférable et sera à l'avenir la seule méthode. Elle présente de nombreux avantages, le principal étant que ce soit le dépositaire qui gère les données sur son réseau. Si davantage de stations sont ajoutées ou que certaines stations tombent en panne, il incombera au dépositaire de maintenir les informations à jour.

Le deuxième moyen est le *crowdsourcing*, c'est-à-dire la collecte de données à partir de sources publiques. Cette approche n'est pas privilégiée, car la plupart du temps, les informations ne sont pas complètes et rien ne garan-

tit qu'elles soient à jour. Toutefois, en l'absence de contact direct avec les dépositaires des stations GNSS permanentes, il s'agit d'une étape transitoire avant qu'un tel contact soit établi. Les sources publiques les plus courantes comprennent les sites Web de réseaux permanents, tels que Trimble Pivot ou Leica Spiderweb, illustrés aux figures 5 et 6, respectivement. Les autres sources publiques comprennent des documents de recherche et des présentations de conférences contenant des informations sur diverses installations GNSS permanentes.

Outre le *crowdsourcing*, l'équipe utilise d'autres moyens pour diffuser son appel à l'action. Le réseau social professionnel LinkedIn s'est révélé être un outil précieux, c'est d'ailleurs la plate-forme qui a réuni les fondateurs de Corsmap, suite à l'article de Derrick intitulé "*The CORS network conversation in the continent of Africa*" (Discussion sur le réseau des stations GNSS permanentes en

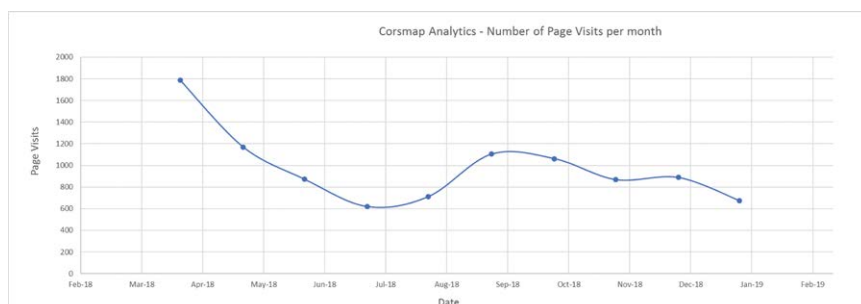


Figure 7. Graphique montrant le nombre de pages visitées depuis la mise en ligne de Corsmap.

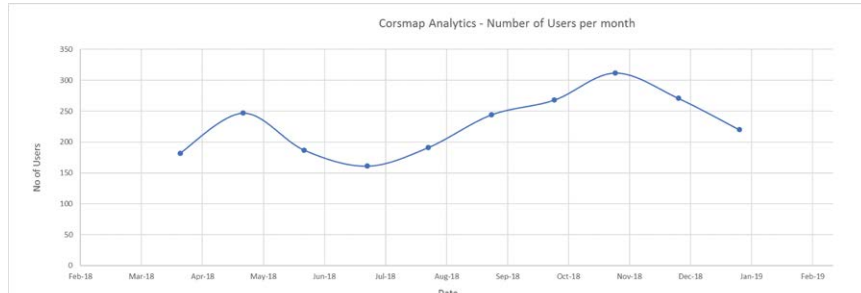


Figure 8. Graphique illustrant le nombre d'utilisateurs par mois depuis la mise en ligne de Corsmap.

Récits de réussites

Bien que Corsmap soit encore jeune, il a déjà eu plusieurs succès à son actif. Un grand nombre d'utilisateurs ont pu localiser des stations GNSS permanentes à proximité de leurs zones de travail via le site Web Corsmap, puis prendre contact avec le fournisseur et obtenir un accès aux données.

C'est le cas de la Côte d'Ivoire, où un fournisseur commercial a enregistré et mis une station sur la carte Corsmap et, une semaine plus tard, a été interrogé par un utilisateur qui était sur le point de commencer un relevé bathymétrique et qui souhaitait disposer de données de correction en temps réel ainsi que les données Rinex pour le post-traitement.

Cet exemple montre qu'il est bénéfique pour les fournisseurs de stations GNSS permanentes de disposer d'informations à jour sur leurs stations sur Corsmap, car cela peut créer diverses opportunités pour les entreprises commerciales ainsi que pour les travaux de recherche collaborative.

Travaux à venir

Le prochain test pour l'équipe Corsmap consiste à contacter les pays dotés de réseaux, mais qui ne les ont pas encore inclus sur le site Web Corsmap. L'un des principaux défis de ce travail est

la barrière de la langue, car il existe un certain nombre de pays de langue française, portugaise et arabe sur le continent africain et aucun des auteurs ne maîtrise ces langues.

Outre la langue, il existe également des difficultés administratives, car certains pays traitent ces informations comme confidentielles, même si Corsmap ne publie pas les coordonnées des stations, et qu'il ne fait que servir de lien dans une chaîne entre fournisseurs et utilisateurs de données GNSS. Néanmoins, de nombreux courriels ne reçoivent pas de réponse et de nombreuses promesses de retour ne sont pas tenues. C'est un projet qui nécessite beaucoup de recherches de données et de coopération de la part de professionnels du monde géospatial de toute l'Afrique.

Cet article dans ce magazine francophone aidera à mettre l'information en circulation dans les pays francophones dans l'espoir qu'une telle prise de conscience puisse déclencher un mouvement. Et si le mouvement est assez fort, les buts et objectifs seront atteints. Une révolution qui apportera d'immenses avantages au contenu africain et aidera par contre-coup AFREF à atteindre son objectif de réalisation d'un système de référence géodésique africain et de son accès avec une infrastructure GNSS permanente bien répartie sur le continent.

Conclusion

On peut se demander quel est le but ultime de tous ces efforts pour réunir toutes les stations de base sous un même toit. La réponse est simple : créer un mouvement parmi les professionnels géospatiaux en Afrique, en créant un symbole d'unité auquel tous les professionnels des régions les plus reculées d'Afrique se sentiront impliqués. C'est une façon grandiose de dire que Corsmap sera une initiative géospatiale lancée par les professionnels géospatiaux.

L'équipe de Corsmap souhaite réunir toutes les bonnes volontés. Toutes les organisations qui ont un lien avec les réseaux et les stations permanentes sont dans leur ligne de mire. Toutes les personnes qui créent leur propre réseau privé sont également invitées. En effet, l'équipe souhaite que ces organisations et ces personnes gardent les données sur le site Web et s'assurent que celles-ci sont exactes et à jour et qu'elles puissent être échangées par-delà les frontières des pays voisins. Au final, les gagnants ne seront pas des fondateurs de Corsmap, mais tous ceux qui ont répondu à l'appel lancé pour créer cette base de données centralisée qui apportera de profonds avantages au continent africain. ●

Contacts

Derrick KOOME, Cheswick Consulting, Nairobi, Kenya, derrick@corsmap.com
 Clement OGAJA, National Geodetic Survey, Boulder, USA, clement@corsmap.com
 Eldar RUBINOV, FrontierSI, Melbourne, Australia, eldar@corsmap.com

ABSTRACT

This paper presents the African CORS Map project, a webmap that contains information about CORS sites (Continuously Operating Reference Stations) in the African continent. The project aims to compile and maintain a comprehensive database of all the CORS installations in Africa with the aim of connecting CORS service providers to the end-users of the technology. This paper describes the current state of the project and the future plans.

En quête de justesse

■ Bernard CATALA-COTTINI

Veiller à l'exactitude des données mesurées, en particulier des profondeurs, doit être une des préoccupations majeures de l'hydrographe. Si la fidélité des mesures dépend essentiellement des qualités intrinsèques des différents équipements qui composent un système bathymétrique, leur justesse est très fortement liée à la connaissance de la géométrie de ce système et à la méthodologie mise en œuvre lors des sondages. Les incertitudes de mesure, en position et en profondeur, peuvent être estimées par des calculs théoriques, mais seuls des moyens de contrôle purement pratiques peuvent permettre de qualifier réellement une chaîne de mesure bathymétrique. Le présent article relate les différentes opérations effectuées dans cette optique, par une des équipes en charge de la bathymétrie au sein de Voies Navigables de France (VNF).

MOTS-CLÉS

Bathymétrie, dragage, sondeur multifaisceaux, justesse, surface de référence, barre de contrôle

du Midi, qui le prolonge au-delà de l'étang de Thau, accueille également de nombreux bateaux de tourisme, en saison.

Le Canal du Rhône à Sète, dans sa partie Ouest, est au cœur d'un système hydrologique complexe, formé par des étangs littoraux et des fleuves côtiers (Lez, Vidourle). De ce fait, il est soumis à une forte sédimentation et le maintien de son mouillage théorique de 3 m nécessite des opérations de dragage régulières. De 2013 à 2017, le volume moyen dragué annuellement a été de l'ordre de 80 000 m³, dont 58 % en régie et 42 % par entreprise, avec 59 % par dragage hydraulique et 41 % par dragage mécanique.

Présentation de la Cellule Bathymétrie de Palavas

Le terrain d'action de la Cellule Bathymétrie de Palavas s'étend sur 180 km de voies d'eau (figure 1) :

- Le Canal du Rhône à Sète : sa branche principale, de l'écluse de Saint-Gilles au port de Sète, et ses branches secondaires.

Introduction

Voies Navigables de France (VNF) est un établissement public à caractère administratif, chargé de gérer la majeure partie du réseau des voies navigables de France, soit 6 700 km de fleuves, rivières et canaux. VNF, dont le siège est à Béthune (Pas-de-Calais), est organisé en sept directions territoriales, regroupant 4 300 agents.

La Direction Territoriale Rhône Saône (DTRS), dont le siège est à Lyon, dispose de deux cellules en charge de la bathymétrie, dont l'une, au Sud du service, au sein de la Subdivision de Frontignan (Hérault). Opérationnelle

depuis 2006, elle est basée au Centre d'Exploitation de Palavas-les-Flots, dont l'activité principale est le dragage du Canal du Rhône à Sète, réalisé en régie, à l'aide d'une drague aspiratrice (dragage hydraulique) et d'une pelle sur ponton (dragage mécanique), couplé à un chaland à clapets.

Comme son nom l'indique, le Canal du Rhône à Sète relie le port de Sète à l'hinterland rhodanien. Il est emprunté par une flotte de bateaux de commerce d'une douzaine d'unités, chargeant en moyenne 1 100 tonnes. Le trafic annuel de marchandises est de l'ordre de 300 000 tonnes. Le Canal du Rhône à Sète, à ne pas confondre avec le Canal



Figure 1. Terrain d'action de la Cellule Bathymétrie



Photo 1. Le Bourgidou



Photo 2. Le Corobathe



- Le Petit Rhône : du Grand Rhône (défluent d'Arles) à son embouchure en mer.
- Le Grand Rhône : des quais, notamment à Avignon, Arles et Port-Saint-Louis-du-Rhône.

La Cellule Bathymétrie dispose de 2 moyens nautiques :

- Le "Bourgidou" (photo 1) : moyen nautique principal.
- Le "Corobathe" (photo 2) : moyen nautique complémentaire, transportable sur remorque, pour interventions lointaines et/ou en faibles profondeurs.

L'équipement hydrographique spécifique, à poste fixe, du Bourgidou comprend :

- Un sondeur multifaisceaux R2sonic 2020 (depuis 2014).
- Un célérimètre de coque Valeport miniSVS.
- Une centrale d'attitude SMC IMU-108.
- Un gyrocompas VTSS SG Brown Meridian.

Le Corobathe est lui équipé d'un sondeur monofaisceau Marine Electronics 11001, sur perche.

Les équipements communs aux deux bateaux sont les suivants :

- Un système de positionnement GNSS NRTK Spectra Precision SP90m (depuis 2018, en remplacement d'un Leica GX1230GG), avec abonnement au réseau Orphéon.
- Un profileur de célérité Valeport miniSVP.
- Un limnimètre enregistreur mobile OTT Orpheus Mini.
- Un PC portable durci GETAC X500G2.
- Le logiciel d'acquisition et de traitement Hypack-Hysweep.
- Un sonar latéral Starfish 990F, mis en œuvre ponctuellement.

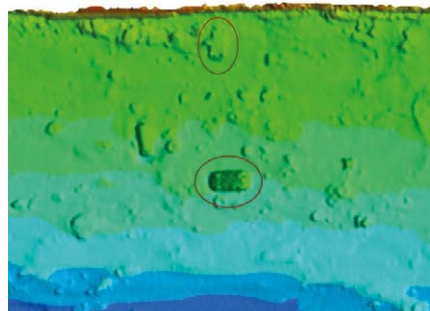


Figure 2. Épaves de voiture détectées au sondeur multifaisceaux

Les travaux bathymétriques dont la Cellule bathymétrie a la charge sont :

- Des bathymétries générales, qui permettent de suivre l'évolution des fonds et d'établir le programme des dragages.
- Les contrôles bathymétriques des chantiers de dragage, qu'ils soient effectués en régie ou par entreprise, et des travaux de modernisation du Canal du Rhône à Sète.
- La détection d'obstructions : épaves de voiture (figure 2), de bateau, ou autres objets, au sondeur multifaisceaux et au sonar latéral.

La Cellule Bathymétrie réalise également des travaux topographiques, en lien avec la bathymétrie, le dragage et les travaux de modernisation du Canal du Rhône à Sète.

Petit rappel de métrologie

La **fidélité** (*precision* en anglais) correspond à l'écart entre les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées (définition issue du vocabu-

laire international de métrologie / réf. [1]). Évaluation possible par l'écart-type (σ), relatif à la moyenne des valeurs mesurées.

La **justesse** (*trueness* en anglais) qualifie l'écart entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence (définition VIM / réf. [1]). C'est l'aptitude d'un instrument à fournir des indications exemptes d'erreurs systématiques. Évaluation possible par l'écart moyen, ou biais.

L'**exactitude** (*accuracy* en anglais) définit l'écart entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande (définition VIM / réf. [1]). Elle traduit à la fois la justesse et la fidélité. Évaluation possible par l'écart moyen quadratique (EMQ), relatif à la valeur vraie.

Ces notions, évoquées dans cet article, peuvent être représentées graphiquement comme sur la figure 3.

A l'origine de l'enquête

La Cellule Bathymétrie dispose d'une surface de référence qui correspond à un tronçon du radier de l'écluse de Saint-Gilles, long de 69 m et large de 12 m, levé, en interne, à l'occasion d'un chômage de l'écluse, en 2013, et dont la détermination est détaillée plus loin. La comparaison des levés bathymétriques successifs de cette surface de référence, au sondeur multifaisceaux, avec son levé topographique, met en évidence que **les bathymétries multifaisceaux sont systématiquement plus profondes que la référence, d'un écart moyen de 3 cm (tableau 1).**

Les différences altimétriques entre un de ces levés bathymétriques de la surface de référence (7 juin 2017), au sondeur multifaisceaux, et son levé topographique, sont visualisées sur la figure 4. Par ailleurs, la comparaison de levés de secteurs sondés à la fois au multifaisceaux et au monofaisceau, bien que partiellement pertinente, montre que les premiers sont systématiquement plus profonds que les seconds, d'un écart moyen de 4 cm (tableau 2), alors même que le levé de la surface de référence, au sondeur monofaisceau, ne présente pas de biais (tableau 3).

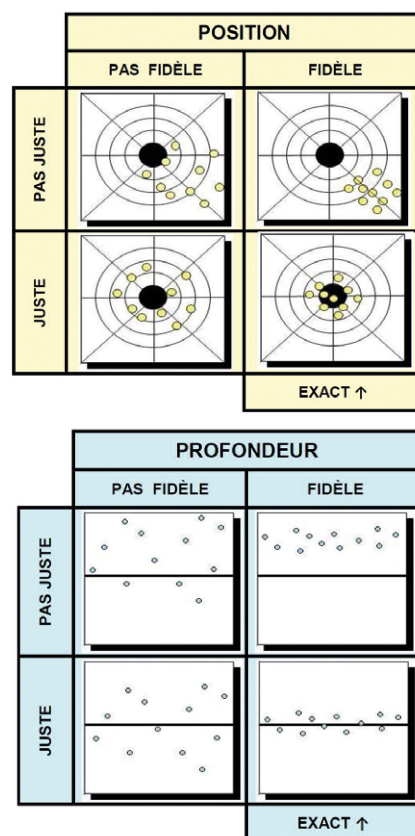


Figure 3. Justesse, fidélité et exactitude

Bathymétrie multifaisceaux du radier (en 4 passes)						Justesse		Fidélité		Exactitude	
Date	Sas		Immersion sondeur m	Points		Écart Z SMF – Z topo. cm			Écart type cm	%	EMQ cm
	Etat	Niveau d'eau m / 0 NGF-IGN69		Type	Nombre	min.	max.	moyen			
10/06/2015	vide	0,22	0,64	points moyens / matrice 0.50 m	3781	-5	11	-2,3	1,5	87%	2,8
02/08/2016	plein	0,45	0,64	points moyens (500 points ~ / m²) / matrice 1 m	1040	-6	8	-4,2	1,2	95%	4,3
07/12/2016	plein	0,48	0,64		971	-7	6	-3,1	1,1	72%	3,3
07/06/2017	vide	0,18	0,65		1019	-6	-1	-3,7	0,8	83%	3,8
05/09/2017	vide	0,23	0,64		1027	-4	1	-2,1	0,8	52%	2,2
							Écart moyen	-3,1			

Tableau 1. Levés bathymétriques multifaisceaux de la surface de référence

Tableau 1. Levés bathymétriques multifaisceaux de la surface de référence

Site	Bathymétrie SMF		Bathymétrie monofaisceau		Nombre points	Écart Z SMF – Z mono. cm			Écart type cm	%
	Date	Données	Date	Données		min.	max.	moyen		
Fosse de Frontignan	18/02/2016	points moyens / matrice 0.50 m	19/02/2016	points non interpolés / profils espacés de 2 m	53496	-58	29	-5,3	6,7	74%
Carrefour de Caramus	06/10 → 25/11/2016		28/11/2016	points interpolés à 1 m / tin / profils espacés de 10 m	15558	-54	33	-4,5	8,3	78%
Carnon	06/01/2017		09/01/2017	points interpolés à 0.50 m / tin / profils espacés de 5 m	12404	-34	10	-3,0	4,4	74%
Fosse de Frontignan	31/01/2017		30/01/2017	points non interpolés / profils espacés de 2 m	44479	-42	27	-4,9	5,0	75%
							Écart moyen	-4,4		

Tableau 2. Comparaison de levés bathymétriques multifaisceaux et monofaisceau

Tableau 2. Comparaison de levés bathymétriques multifaisceaux et monofaisceau

Bathymétrie monofaisceau du radier (en 10 profils en long)								Justesse	Fidélité		Exactitude
Date	Sas		Immersion sondeur m	Points		Écart Z mono. – Z topo. cm			Écart type cm	%	EMQ cm
	Etat	Niveau d'eau m / 0 NGF-IGN69		Type	Nombre	min.	max.	moyen			
08/08/2014	plein	0,78	0,12	points non interpolés / profils espacés de 1 m	2262	-9	3	-0,4	1,0	71%	1,1

Tableau 3. Levé bathymétrique monofaisceau de la surface de référence

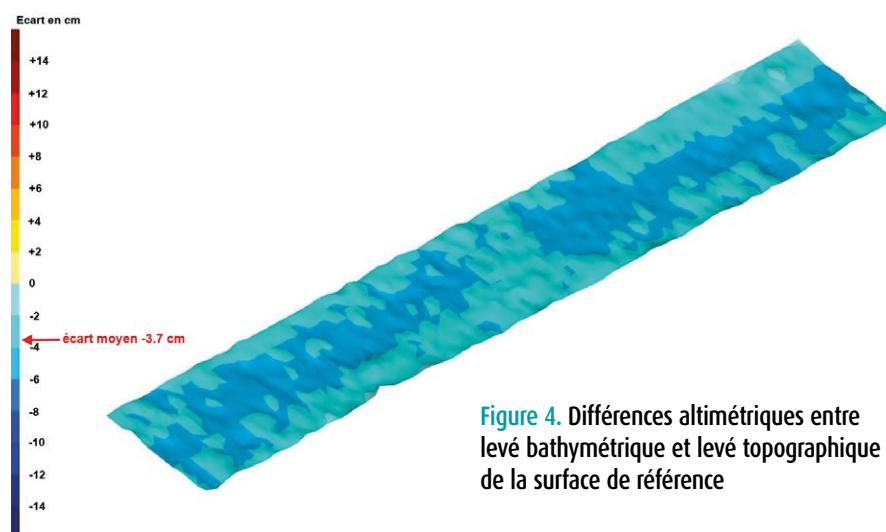


Figure 4. Différences altimétriques entre levé bathymétrique et levé topographique de la surface de référence

ceux du Bourgidou, de 3 cm environ.

Un tel défaut de justesse n'est pas anodin, au regard des volumes de dragage induits et des montants financiers en jeu.

Même si ce décalage s'annule dans un différentiel brut entre 2 bathymétries réalisées par la Cellule Bathymétrie, typiquement avant et après les travaux, il n'en va pas de même pour une comparaison faite avec une bathymétrie qui serait réalisée par un intervenant extérieur et/ou faisant intervenir un chenal théorique.

Prenons l'exemple concret du dragage par une entreprise, au ponton-pelle, d'une portion du canal, longue de 1850 m, ayant pour objectif de reconstituer le chenal théorique, composé d'un plafond large de 12 m, à la profondeur de -3.20 m, et de 2 talus latéraux de pente 3/1. Le volume dragué facturable correspond à la différence des levés avant et après

En outre, lors d'une comparaison entre vedettes bathymétriques organisée par la CNR (Compagnie Nationale du Rhône), en 2015, les résultats obtenus avec le système de mesure monofais-

ceau du Corobathe ont été tout à fait comparables aux résultats CNR.

Ces différents constats tendent à confirmer un défaut de justesse en profondeur du système bathymétrique multifais-

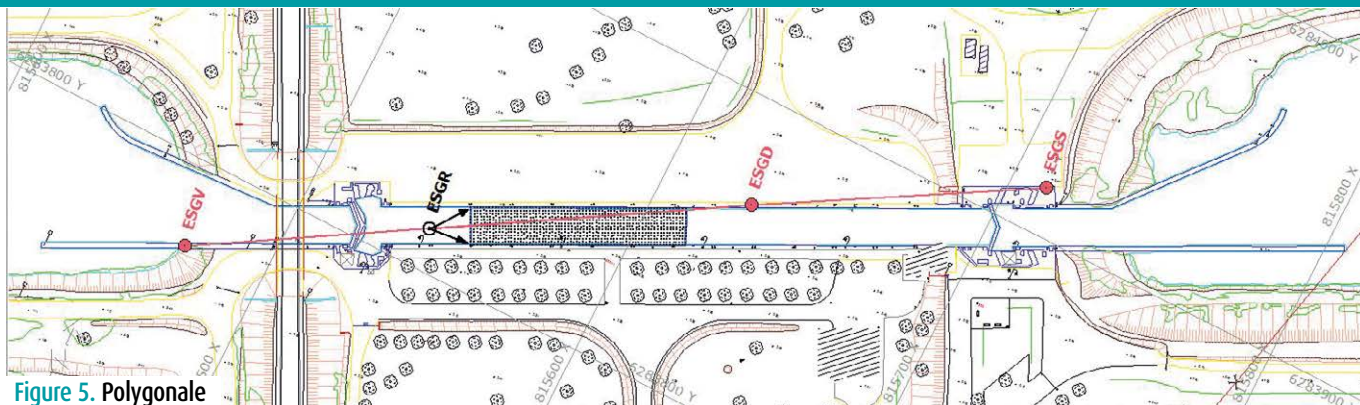


Figure 5. Polygone

travaux, mais limité au chenal théorique. Ce volume dragué est de 11 540 m³. Une diminution de 3 cm des profondeurs des 2 sondages avant et après travaux, corrigeant ce défaut de justesse, induit une augmentation du volume dragué facturable de 460 m³, soit 4 % du volume total. Sachant que le coût moyen d'un m³ dragué au ponton-pelle, par entreprise, est de 25 € environ, la différence comptable est de 11 500 €.

Quoi qu'il en soit, il importe de respecter la référence altimétrique associée aux données et annoncée sur les plans bathymétriques, en s'affranchissant de tout systématisme dans les mesures. C'est un des rôles primordiaux de l'hydrographe.

Reste à trouver la, ou les, cause(s) de ce défaut de justesse !

En premier lieu, il convient de :

- Détailler les travaux topographiques de détermination de la surface de référence.
- Préciser certains paramètres de la mesure de la profondeur.

Détermination topographique de la surface de référence

Comme indiqué auparavant, cette surface de référence correspond à un tronçon du radier de l'écluse de Saint-Gilles, longue de 200 m et large de 12 m, qui a été construite en 1973 pour assurer le passage entre le Petit Rhône et le Canal du Rhône à Sète proprement dit. Les travaux topographiques ont été conduits en mars 2013 lors d'un chômage de l'écluse, période de maintenance de l'ouvrage nécessitant la vidange du sas et induisant la mise à sec du radier. L'objectif de ces travaux était de disposer d'un semis de points régulièrement répartis sur un tronçon du radier, en l'occurrence long de 69 m,



Photo 3. Détermination du point de station ESGD par GNSS NRTK moyenné parfaitement connus en planimétrie, en projection Lambert 93, et en altimétrie, en altitudes NGF-IGN69.

Pour atteindre cet objectif, une polygone composée de quatre points de station a été mise en place (figure 5). Pour déterminer cette polygone en planimétrie :

- Les points de station ESGS, ESGD et ESGV ont été déterminés par GNSS NRTK moyenné (photo 3), et contrôlés au tachéomètre électronique (Leica TCR403). Pour information, sur les mesures faites sur le point de station ESGD, les écarts-types ont été de 5 mm en X(E) et 8 mm en Y(N).

- Le point de station ESGR, placé sur le radier de l'écluse, a été déterminé depuis le point de station ESGD, au tachéomètre électronique.

Et pour la déterminer en altimétrie :

- Un contrôle de stabilité des 4 repères de nivellement de l'IGN les plus proches de l'écluse avait été effectué par nivellement direct, en 2009 et 2011 (figure 6). Les fermetures mesurées ont été de :

- 2 mm sur la boucle 5-8-4-5, longue de 6.2 km.
- 2 mm sur le cheminement 3-8, long de 3.5 km.

- Ces contrôles ont mis en évidence des affaissements sur les 2 repères placés sur des ponts :



Photo 4. Nivellement du point de station ESGR

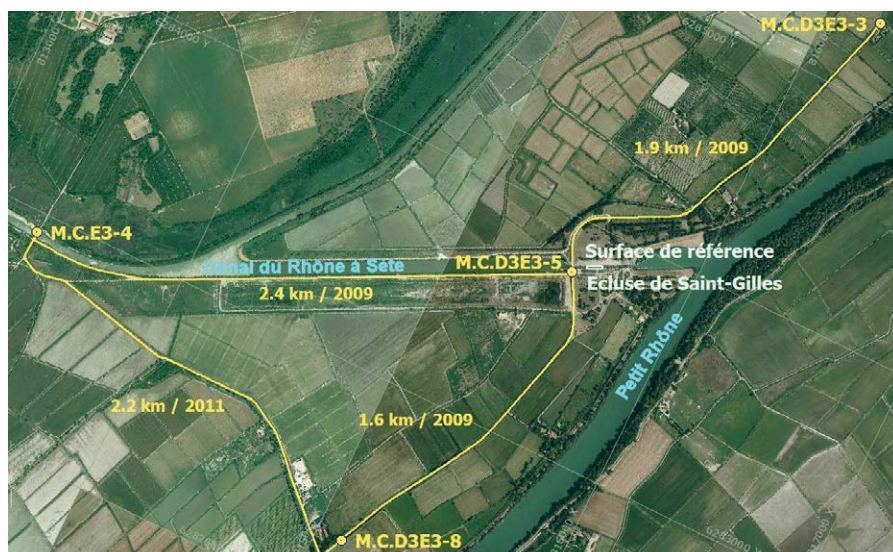


Figure 6. Contrôle de stabilité des repères de nivellement

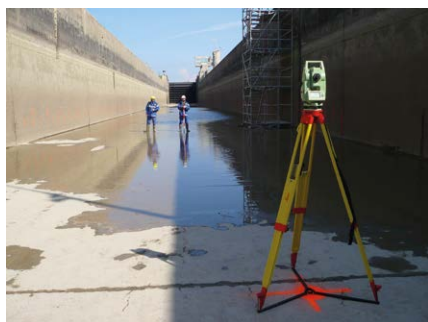


Photo 5. Levé tachéométrique du semis de points



- 50 mm sur le repère M.C.D3E3-5 du pont de l'écluse de Saint-Gilles.
- 25 mm sur le repère M.C.E3-4 du pont d'Espeyran.

Les altitudes de ces deux repères ont été modifiées par l'IGN en 2012, sur la foi des mesures de la Cellule Bathymétrie.

- Le point de station ESGR, sur le radier, a été nivelé depuis le repère M.C.D3E3-5 (photo 4), en cheminement aller-retour (fermeture de 1 mm). Le nivellement a été "descendu" au fond du sas via l'échelle limnimétrique fixée, en amont du sas, contre le bajoyer rive droite, haut d'environ 7.50 m.

Les points du semis ont ensuite été levés par rayonnement depuis le point de station ESGR, au tachéomètre électronique (photo 5). Un levé au scanner laser, qui serait positionné en hauteur, au bord du sas, n'a pas été envisagé, du fait de la présence résiduelle d'eau sur le radier. C'est un maillage quasi régulier de 910 points, espacés d'environ 1 m, qui a été levé, par rangées de 13 points (70 rangées au total). Les positions des rangées ont été repérées à la peinture sur les bajoyers, en s'appuyant sur les limites des dalles de 13 m. Sur chaque rangée, les points à lever ont été placés au fur et à mesure, tous les

mètres, à l'aide d'un outil spécifique fabriqué en interne.

Il ressort de ce levé que le radier de l'écluse n'est pas plan : sur le tronçon levé, la variation d'altitude est d'une dizaine de centimètres (figure 7).

Les incertitudes de mesure sur les points du semis sont estimées à :

- ± 2 à 3 cm en planimétrie,
- Meilleure que ± 1 cm en altimétrie.

Mesure de la profondeur : immersion du sondeur

Le sondeur multifaisceaux R2sonic 2020 du Bourgidou est fixé dans un puits, sur une plaque coulissante. Son ouverture angulaire maximale étant de 130° , il est incliné de 20° vers tribord (photo 6), afin de permettre l'insonification des berges immergées. Son immersion est la somme de la lecture sur l'échelle du puits (tirant d'eau), normalement 0.515 m à quai, et de la distance entre le zéro de cette échelle et le centre acoustique du sondeur, soit 0.125 m, mesurée par nivellement direct, le bateau étant à terre, posé sur des tréteaux.

La position du centre acoustique du sondeur est indiquée par R2sonic sur



Photo 6. Montage du sondeur 2020 à bord du Bourgidou. Vue prise sous la coque, vers le haut et l'arrière du bateau

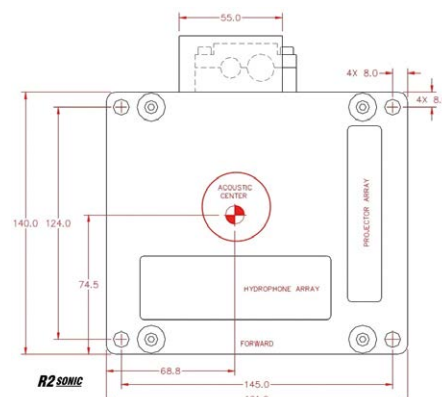


Figure 8. Centre acoustique du sondeur 2020

un schéma (figure 8). En profondeur, il se situe au niveau des membranes, soit 2.5 mm plus haut que la base du sondeur.

Mesure de la profondeur : réduction des sondes

Sur le canal, les profondeurs acquises sont rapportées au niveau de référence ("réduites") de façon conventionnelle, à l'aide de mesures directes du niveau de l'eau, qui sont :

- Enregistrées en continu par un limnimètre mobile à capteur de pression (OTT Orpheus Mini), le temps du sondage.
- Recalées à l'aide de mesures ponctuelles faites sur des échelles limnimétriques ou des points surplombant la surface de l'eau, dûment déterminés en altimétrie.

La méthode de réduction des sondes par mesure RTK, qui permet de passer directement de l'altitude de l'antenne GNSS à celle du fond, en s'affranchissant de la surface de l'eau, n'est employée par la Cellule Bathymétrie qu'en présence d'une pente hydraulique conséquente, sur le Rhône. La méthode de réduction des sondes par mesure directe du

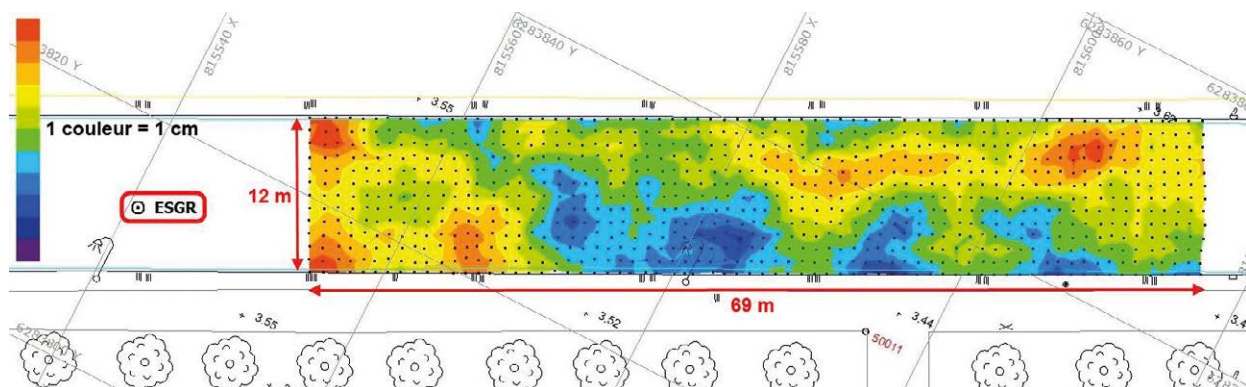


Figure 7. Variation altimétrique de la surface de référence

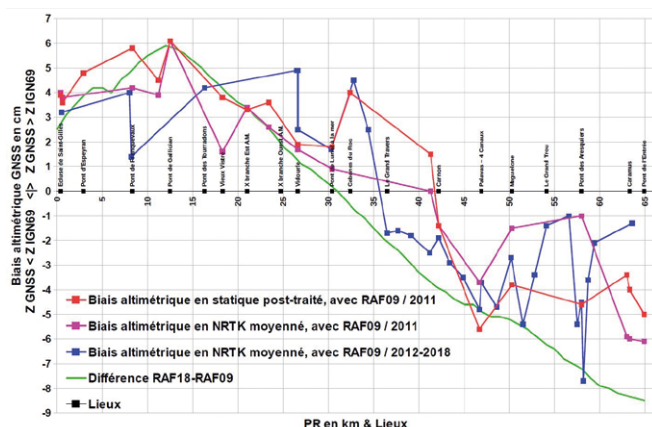


Figure 9. Biais altimétrique de la grille RAF09 & Différence RAF18-RAF09

niveau de l'eau présente l'intérêt d'éviter les défauts inhérents à la méthode par mesure RTK :

- Les dérives temporelles du Z, observées avec le système GNSS NRTK-Orphéon dans la zone de travail de la Cellule Bathymétrie. Il a été constaté, en station sur un point fixe, que l'amplitude de ces dérives pouvait atteindre 10 cm sur une période d'observation d'une heure.
- Le biais variable de la grille de conversion RAF09 : entre +6 cm et -6 cm environ, observé sur la branche principale du Canal du Rhône à Sète (figure 9). Ce biais a été mis en évidence en 2011 (réf. [2]) et confirmé par la suite, sachant qu'il apparaît que cette situation s'améliorera avec l'utilisation de la grille RAF18.

Mesure de la profondeur : gestion dynamique du tirant d'eau

La réduction conventionnelle des sondes implique de connaître la variation du tirant d'eau du bateau, et donc de l'immersion du sondeur, en fonction de sa vitesse. En l'occurrence, le Bourgidou s'enfonce avec la vitesse. Une courbe d'enfoncement a été déterminée en 2011, à l'aide de mesures GNSS NRTK, et confirmée en 2017 (figure 10). Ainsi, à la vitesse moyenne de sondage, autour de 7 km/h, l'immersion du sondeur augmente de 4 à 5 cm.

Les investigations

Un ingénieur de la société CADDEN, fournisseur de la majeure partie du système bathymétrique du Bourgidou,

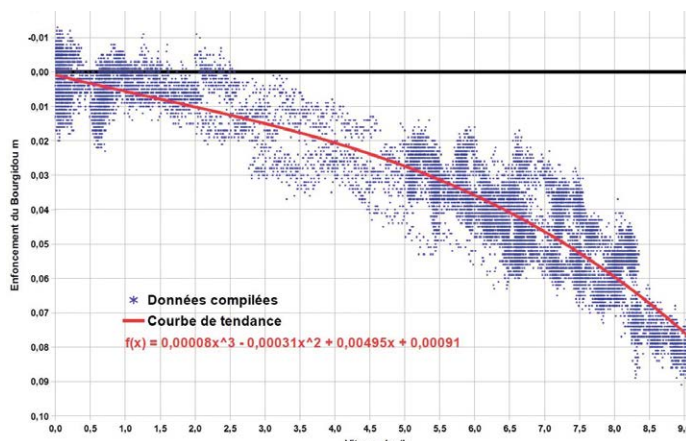


Figure 10. Enfoncement dynamique du Bourgidou

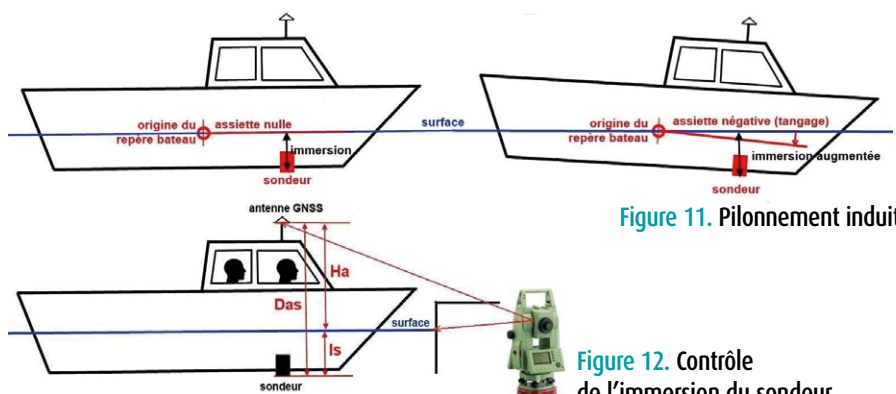


Figure 11. Pilonnement induit

a émis l'hypothèse que si le bateau "piquait du nez" en prenant de la vitesse, l'enfoncement du sondeur calculé par le logiciel, en appliquant cette assiette négative au bras de levier depuis le centre de rotation du bateau (ce qu'on appelle le "pilonnement induit"), se cumulerait avec son pur enfoncement vertical, issu de la table de gestion dynamique du tirant d'eau (Figure 11).

A priori, cette hypothèse, judicieuse, ne tient pas pour le Bourgidou : les bras de levier étant très faibles, le pilonnement induit est quasi nul, et l'enfoncement dynamique, mesuré au niveau de l'antenne GNSS, correspond effectivement à celui du sondeur.

Effectivement, ne connaissant pas le centre de rotation réel du bateau, l'origine du repère du Bourgidou a été définie de la façon suivante :

- Latéralement : dans l'axe du bateau.
- Longitudinalement : à l'antenne du système de positionnement GNSS.
- Verticalement : à la surface de l'eau.

Par rapport à cette origine (mesures effectuées au tachéomètre électronique, bateau à terre) :

- L'antenne GNSS est située 2.8 cm à tribord.

- Le centre acoustique du sondeur est situé 0.7 cm à l'arrière et 4.2 cm à tribord, soit quasiment à l'aplomb de l'antenne GNSS.

Néanmoins, des vérifications et des tests, au nombre de 4, ont été effectués :

1. Le contrôle de l'immersion du sondeur (figure 12), le bateau étant à quai avec 2 personnes à bord, à leur poste de travail, et le réservoir de carburant à moitié plein. L'immersion : I_s , est le résultat de la soustraction de la distance du point de référence de l'antenne GNSS (ARP) à la surface de l'eau : H_a , mesurée au tachéomètre électronique, à la distance de cette antenne au sondeur : D_{as} , parfaitement connue (mesurée à l'installation du système, bateau à terre).

⇒ La différence entre l'immersion mesurée et celle qui est saisie dans le logiciel Hypack-Hysweep (0.64 m) n'est que de 1 mm.

2. Le basculement, pendant le sondage, de la valeur de l'inclinaison du sondeur dans le logiciel de R2sonic, de -20° à 0° , et vice versa.

⇒ En toute logique, l'inclinaison du

Bathymétrie 1		Bathymétrie 2		Nombre points	Écart Z1 - Z2 cm			Écart type cm	%
Vitesse	Réduction Z	Vitesse	Réduction Z		min.	max.	moyen		
7 à 9 km/h	Conventionnelle	1 à 4 km/h	Conventionnelle	19572	-7	8	1,4	1,2	65,2%
7 à 9 km/h	RTK	1 à 4 km/h	RTK	19573	-7	6	0,0	1,4	74,3%
7 à 9 km/h	RTK	7 à 9 km/h	Conventionnelle	22508	0	5	2,8	0,9	67,3%
1 à 4 km/h	RTK	1 à 4 km/h	Conventionnelle	20121	2	6	4,2	0,6	59,3%

Tableau 4. Écarts en profondeur selon différentes vitesses et méthodes de réduction des sondes



fond change sur l'affichage du logiciel de R2sonic, mais rien ne change dans Hypack-Hysweep.

3. Le traitement d'un petit sondage (de 52 000 points) en le corrigeant ou non du pilonnage induit.

⇒ Le fond "sans correction" est plus profond que le fond "avec correction", mais d'un écart moyen qui n'est pas significatif (1 mm).

4. Ensuite, la réalisation de sondages d'une petite zone du canal à des vitesses différentes et traités selon les deux méthodes de réduction des sondes : conventionnelle et par "marée (niveau) RTK" (tableau 4).

⇒ Pour une réduction des sondes conventionnelle, la bathymétrie à vitesse rapide est plus profonde que la bathymétrie à vitesse lente, mais d'un écart qui n'est que légèrement supérieur à 1 cm, vraisemblablement dû à l'imprécision, toute relative, de la table d'enfoncement dynamique, mais surtout à la présence de courant dans le canal.
⇒ Pour une réduction des sondes à l'aide du NRTK, l'écart moyen entre

les bathymétries à vitesse rapide et à vitesse lente est nul.

⇒ Les bathymétries réduites à l'aide du NRTK sont plus profondes que les bathymétries réduites de façon conventionnelle, d'environ 3 à 4 cm, écart qui correspond au biais de la grille RAF09 à cet endroit (PR57.6 du canal, cf. figure 9).

Ces opérations ne permettent pas d'expliquer l'existence du défaut de justesse.

Enfin, l'opération suivante a consisté à contrôler la profondeur à la barre.

Barre de contrôle de la profondeur : caractéristiques et mise en œuvre

Cette barre a été conçue et fabriquée en interne, au Centre d'Exploitation de Palavas. Elle est constituée (photos 7 et 8) :

- D'une plaque en aluminium de 2.70 m de long (2.40 m utile), de 19 cm de large et 5 mm d'épaisseur, rigidifiée par 2 cornières soudées en dessous.
- De 2 rondins de maintien, hauts de 3.50 m, en 2 parties, de 4 cm de diamètre, amovibles et vissables sur la plaque. Des marques de profondeur ont été gravées sur ces rondins à 2.00 m, 2.50 m et 2.70 m.

Son poids total est de 35 kg.

Étant donné son poids et son encombre-



Photo 9. Mise en œuvre de la barre de contrôle de la profondeur



Photo 10. Dispositif de maintien de la barre de contrôle de la profondeur

ment, la mise à l'eau et la récupération de la barre nécessitent 3 personnes (photo 9).

La barre est maintenue à la profondeur désirée et sous le sondeur, à l'aide d'un dispositif mécanique placé de chaque côté du bateau (photo 10).

Contrôle de la profondeur à la barre : méthodologie

Deux opérations de contrôle de la profondeur à la barre ont été effectuées, à l'intérieur du sas de l'écluse de Saint-Gilles (photo 11), fermé pour l'occasion, et donc sur un plan d'eau parfaitement calme, en septembre puis en décembre 2017.

A chaque opération :

- Le contrôle est effectué sur la barre immergée à 2.00 m et à 2.50 m.
- La profondeur de la barre, réglée de chaque côté du bateau, est contrôlée en son milieu, à travers le puits du sondeur, à l'aide d'une pige rigide, afin de vérifier que la barre ne présente pas une forme de chaînette.
- L'immersion du (centre acoustique du) sondeur est égale à la lecture sur l'échelle du puits à laquelle on ajoute 0.125 m (cf. photo 6). Cette immersion est légèrement supérieure à la normale du fait de la présence de 2 personnes à l'avant du bateau.
- L'ouverture du sondeur est réglée à 50° et son inclinaison paramétrée à



Photo 7. Barre de contrôle de la profondeur



Photo 8. Détails de la barre de contrôle de la profondeur



Photo 11. Contrôle de la profondeur à la barre

20°, éclairant ainsi 1.70 m de barre à 2.50 m et 1.25 m à 2.00 m (en tenant compte de l'immersion du sondeur).
– Pour chaque profondeur de contrôle, un profil de célérité du son dans l'eau (figure 13) est mesuré et intégré dans le logiciel d'acquisition Hypack-Hysweep, juste avant les enregistrements de données "barcheck". Dans ces conditions, on peut estimer

que la profondeur de la barre, d'une part, et l'immersion du sondeur, d'autre part, sont connues à ± 0.5 cm.

Contrôle de profondeur à la barre du 5 septembre 2017

La moyenne des enregistrements "barcheck" effectués à l'aide du logiciel Hypack-Hysweep est de :

- 2.032 m sur la barre immergée à 2.00 m, soit un écart de 3.2 cm, avec un écart-type de 2.9 cm sur 2 333 mesures (figure 14).
- 2.537 m sur la barre immergée à 2.50 m, soit un écart de 3.7 cm, avec un écart-type de 2.5 cm sur 2 443 mesures (figure 15).

Ces valeurs d'écart-type, qui peuvent paraître élevées aux yeux d'un topographe, correspondent au bruit des mesures effectuées par le sondeur multifaisceaux, issues de signaux acoustiques qui traversent l'eau. En sachant que le traitement d'un sondage bathymétrique a pour finalité première

l'élaboration d'un maillage de points, en général moyens (c'est le cas en dragage), dont le nombre est considérablement réduit par rapport à celui des données brutes, qui se présentent sous la forme d'un "matelas" de sondes.

Conséquence des investigations

Le contrôle à la barre du 5 septembre 2017 confirme le défaut de justesse en profondeur du système, de 3 cm environ. En conséquence, décision est prise de réduire, dans le logiciel d'acquisition, la valeur d'immersion du sondeur de 3 cm. Suite à cette réduction, les 2 nouveaux levés bathymétriques de la surface de référence coïncident avec son levé topographique (tableau 5). Faisant suite à une mise à jour des logiciels internes du boîtier et de la tête du sondeur, une seconde opération de contrôle à la barre a été effectuée le 14 décembre 2017.

Contrôle de profondeur à la barre du 14 décembre 2017

La moyenne des enregistrements "barcheck" effectués à l'aide du logiciel Hypack-Hysweep est de :

- 2.000 m sur la barre immergée à 2.00 m, soit un écart nul, avec un écart-type de 2.4 cm sur 2 307 mesures (figure 16).
- 2.496 m sur la barre immergée à 2.50 m, soit un écart de -0.4 cm, avec un écart-type de 3.6 cm sur 2 157 mesures (figure 17).

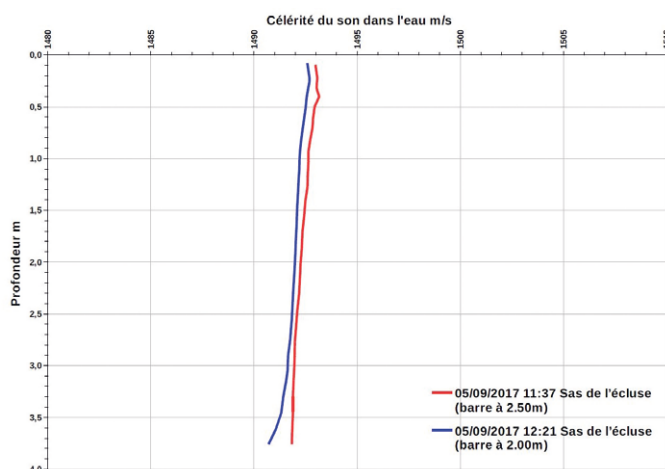


Figure 13. Profils de célérité du son dans l'eau du 5 septembre 2017

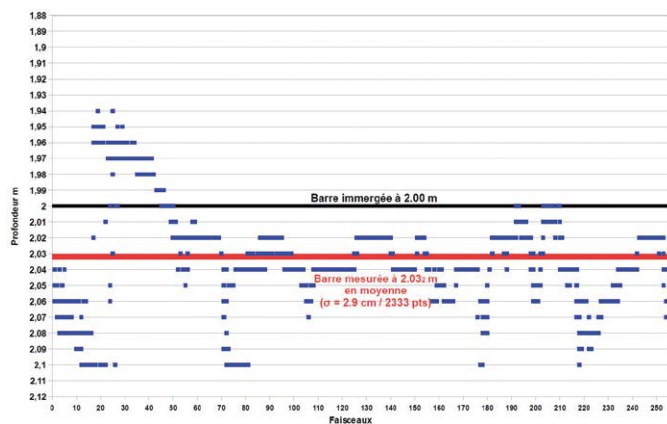


Figure 14. 5 septembre 2017 – Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.00 m

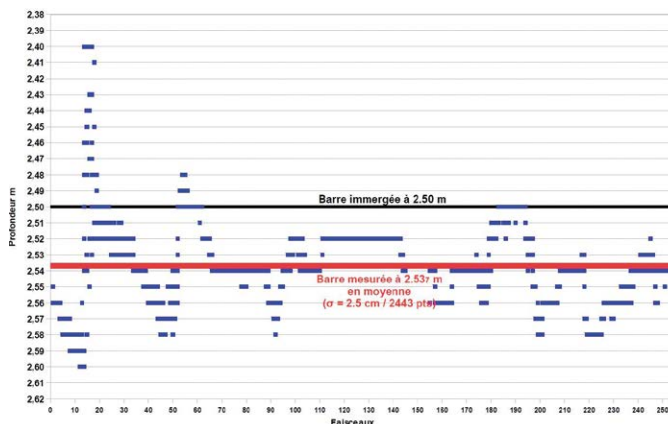


Figure 15. 5 septembre 2017 – Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.50 m

Bathymétrie multifaisceaux du radier (en 4 passes)						Justesse			Fidélité		Exactitude
Date	Sas	Niveau d'eau m / 0 NGF-IGN69	Immersion sondeur m	Points Type	Nombre	Ecart Z SMF - Z topo. cm			Ecart type cm	%	EMQ cm
	Etat					min.	max.	moyen			
12/12/2017	plein	1,60	0,61	points moyens (500 points ~ / m²) / matrice 1 m	1040	-3	4	-0,7	1,1	58%	1,3
14/12/2017	vide	0,24	0,61		1040	-1	6	1,3	1,0	70%	1,7
						Écart moyen			0,3		

Tableau 5. Levés bathymétriques multifaisceaux de la surface de référence après réduction de la valeur de l'immersion du sondeur



En attendant de pouvoir expliquer les causes du défaut de justesse initial, les résultats de ce deuxième contrôle valident la réduction de la valeur d'immersion du sondeur.

Conclusion et perspectives

Le système bathymétrique multifaisceaux du Bourgidou présente un défaut de justesse en profondeur, de 3 cm environ. Ce défaut a été confirmé par plusieurs levés d'une surface de référence et 2 contrôles de la profondeur à la barre.

En étant pragmatique, cet écart systématique a été corrigé, mais, à ce jour, les causes de ce défaut de justesse sont inconnues.

Le problème peut-il venir du sondeur ? Le sondeur a été révisé chez le constructeur R2sonic en septembre 2018, sans retour significatif de leur part à ce sujet, sachant qu'ils mènent actuellement des investigations sur le positionnement du centre acoustique.

Un ingénieur de la société CADDEN, a suggéré de réaliser un contrôle à la barre après avoir fait pivoter le sondeur de 180° sur son support, ce qui permettrait de s'assurer que le centre acoustique n'est pas décalé par rapport à sa position théorique. Si, par exemple, il était situé au niveau de l'émetteur, il

serait 2.4 cm plus haut, pour 20° d'inclinaison du sondeur.

Le problème peut-il venir du logiciel ? L'inclinaison du sondeur (offset de roulis) est-elle correctement prise en compte dans les calculs géométriques effectués par le logiciel Hypack-Hysweep ?

Réaliser un levé de la surface de référence, ou un contrôle à la barre, en utilisant un autre logiciel d'acquisition, tel Qinsy, permettrait de lever le doute. Bien que plus difficiles à mettre en œuvre en pratique, la Cellule Bathymétrie de Palavas envisage de procéder à ces nouvelles investigations dans le futur. L'enquête se poursuit. ●

Contact

Bernard CATALA-COTTINI

Hydrographe - Voies Navigables de France - Direction Territoriale Rhône Saône
bernard.catala@vnf.fr

Références

- [1] *Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) 3^e édition - Version 2008 avec corrections mineures - Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) / 2012.*
- [2] *Evaluation du nivellement par GNSS NRTK-ORPHEON avec RAF09 et impact sur*

la bathymétrie du Canal du Rhône à Sète - Mémoire de travail de fin d'études - Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - Arnaud KRIPPES / 2011.

Liens utiles

Lexique Voies Navigables de France (VNF) : <http://www.vnf.fr/vnf/lexique.vnf?action=welcome>

Association Francophone d'Hydrographie (AFHY) : <http://www.afhy.fr/>

ABSTRACT

One of the main responsibilities of a surveyor is to ensure the measured data is accurate, especially depth data. How precise the measurements are, mainly depends on the intrinsic qualities of the various equipments that form a bathymetric system. As for their trueness, it is strongly related to how much is known about the geometry of the system and what methodology is used during a survey. Measurement uncertainties - both in position and depth - can be estimated by theoretical calculations, although only purely practical means of control can help qualifying a bathymetric measurement system. This article outlines various such operations that were conducted to investigate measurement uncertainties by a bathymetry team within Voies Navigables de France (VNF).

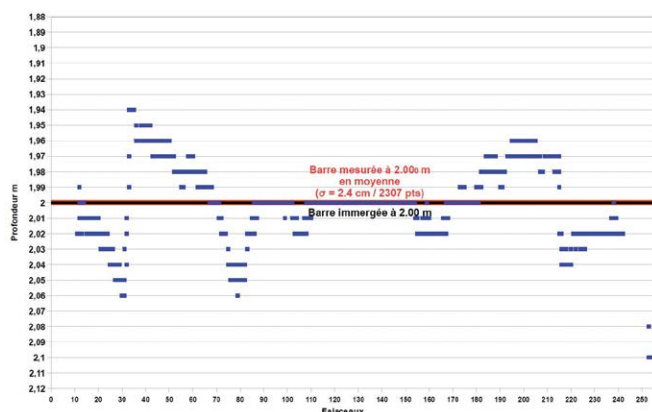


Figure 16. 14 décembre 2017 - Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.00 m

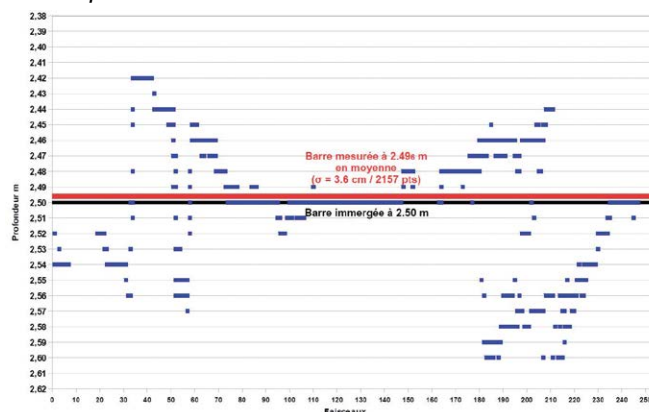


Figure 17. 14 décembre 2017 - Contrôle de la profondeur sur la barre immergée à 2.50 m

N'ayez pas peur du coefficient de réfraction !

Première partie sur les enjeux de réfraction en nivellement trigonométrique

■ Thomas TOUZÉ - Matthieu HANSEN

Tout géomètre sait que ses visées optiques sont déviées du fait de la réfraction et qu'un modèle est utilisable pour le nivellement trigonométrique. Ce modèle est issu de la loi de Snell-Descartes à laquelle sont ajoutées quelques hypothèses qui sont tout à fait raisonnables lorsque les effets thermiques du sol sont négligeables. Ainsi, on introduit le coefficient de réfraction k qui pour des visées hautes au-dessus du sol, doit tendre vers 0.13. La validité de ce modèle pour des visées proches du sol est en revanche mal connue, de même que l'ordre de grandeur du coefficient de réfraction k . Pourtant, c'est proche du sol que nous mesurons. Dans ce premier article d'une série de deux, nous allons nous baser sur la littérature et des expériences pour tenter de répondre à ces deux questions. Les visées réciproques simultanées, en plus d'une manière d'obtenir des dénivelées justes, seront vues comme un moyen d'estimer k . Nous proposerons une méthode pour compenser un réseau d'auscultation en estimant au mieux les paramètres de réfraction. Pour ce faire, il sera nécessaire de considérer les effets de scintillement dus à la réfraction dans le modèle stochastique des angles zénithaux.

MOTS-CLÉS

Coefficient de réfraction, nivellement trigonométrique, visées réciproques simultanées, techniques terrestres de la géodésie, ajustement par la méthode des moindres carrés.

tant d'adapter les modèles fonctionnels et stochastiques aux conditions réelles de réfraction rencontrées lors des mesures. Pire, des discussions avec plusieurs ingénieurs géomètres français et suisses laissent à penser que les professionnels, par manque de maîtrise des ordres de grandeur de k , hésitent à en modifier le paramétrage par défaut (d'où le titre de l'article).

Enfin, il est également connu que les mesures tachéométriques peuvent souffrir de cas de réfraction latérale – typiquement en topométrie souterraine dans des tunnels – ou que la réfraction peut ne pas être symétrique. Toutefois, la littérature est peu fournie pour aider les géomètres à traiter des données affectées de ces cas.

Cet article est le premier d'une série de deux dans laquelle nous allons exposer nos travaux et expériences sur la réfraction en tachéométrie. Cette première partie va se focaliser sur le modèle usuel dans le plan vertical de la visée. Après un rapide état de l'art, dont le but est d'en mettre en lumière les hypothèses simplificatrices, nous discuterons de l'ordre de grandeur des variations possibles de k . Ensuite nous traiterons deux cas réels dans le but de proposer une méthodologie que nous espérons utile aux géomètres.

État de l'art de la réfraction

Dans cette partie, nous allons reconstruire, en partant de la loi de Snell-Descartes, la modélisation classique en topométrie de la réfraction via le coefficient de réfraction k . Les objectifs sont ici, d'une part, de mettre en avant les hypothèses sous-jacentes à ce modèle

Notations

Dans cet article, nous respectons les conventions suisses de notation des mesures tachéométriques. Dans les formules, les longueurs seront exprimées par défaut en mètres et les angles en radians. Nous désignerons par les lettres suivantes :

- r : les directions horizontales ;
- ζ : les angles zénithaux ;
- d & D : les distances respectivement horizontales et inclinées ;
- I & S : les hauteurs respectivement d'instrument et de prisme ;
- h' : la dénivelée brute ;
- h : la dénivelée corrigée du niveau apparent ;
- R : le rayon de la Terre ;
- n : l'indice de réfraction ;
- k : le coefficient de réfraction.

Introduction

La réfraction est le phénomène physique qui, du fait des variations de pression et de température le long de nos visées, dévie ces dernières de la droite euclidienne. Cet effet est bien connu des géomètres d'autant qu'un modèle simple, faisant appel au coefficient de réfraction k , existe pour le traitement du nivellement trigonométrique ; la difficulté, cependant, réside dans le fait d'en connaître la valeur. S'il existe une valeur de référence de k , son domaine de validité est bien moins connu, de même que ses ordres de grandeur pour des visées proches du sol.

De plus, lorsqu'il s'agit de compenser des données tachéométriques, dans un contexte d'auscultation par exemple, il n'existe pas de méthodologie permet-



et, d'autre part, de discuter des ordres de grandeurs et de la variabilité de ce coefficient. Nous terminerons par un rapide état des lieux des méthodes susceptibles de déterminer la valeur de k .

Loi de Snell-Descartes

Si un rayon lumineux passe au travers d'un dioptre séparant deux milieux de réfringences différentes, dont les indices de réfraction sont respectivement n_1 et n_2 , alors les angles i_1 et i_2 définissant les faisceaux incidents et émergents par rapport à la normale au dioptre sont liés par la loi de Snell-Descartes, selon la relation 1. Cette loi peut être illustrée par la figure 1.



Figure 1. Représentation de la loi de Snell-Descartes dans le cas discret. Le chemin optique est dévié par la traversée de trois milieux - l'air, le verre et l'eau - dont les réfringences sont nettement différentes. [<https://fr.wikipedia.org/wiki/Réfraction>]

$$\begin{aligned} n_1 \sin i_1 &= n_2 \sin i_2 \\ \iff \\ n \sin i &= \text{cste} \end{aligned} \quad (1)$$

Cette formulation est valable dans le cas d'un brusque changement de milieu. Lorsque le changement d'indice de réfraction n se fait de manière continue, il est possible, par la différentielle totale de la formule 1, d'exprimer la variation élémentaire δi de l'angle en fonction de celle de l'indice de réfraction, notée δn . On obtient ainsi la loi de Snell-Descartes dans le cas continu (cf. figure 2 et équation 2).

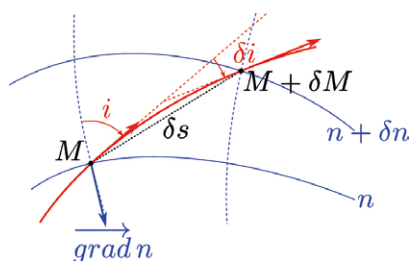


Figure 2. Vue schématique de la loi de Snell-Descartes dans le cas continu.

$$\delta i = -\frac{\tan i}{n} \delta n \quad (2)$$

Or la variation δn de l'indice de réfraction est liée au gradient de n le long de la section δM du chemin optique, de longueur δs . On a ainsi la relation 3.

$$\delta n = \langle \text{grad } n | \delta \vec{M} \rangle = \|\text{grad } n\| \cos i \delta s \quad (3)$$

En introduisant ce dernier résultat dans la formulation continue de la loi de Snell-Descartes, on peut faire apparaître, en formule 4, le rayon de courbure ρ de notre chemin optique tel que défini dans [Torge, 2001].

$$\delta i = -\frac{\|\text{grad } n\|}{n} \sin i \delta s = -\frac{\delta s}{\rho} \quad (4)$$

Le long d'un chemin optique de A vers B, la déviation angulaire totale Δi sera l'intégrale de cette dernière équation (cf. figure 3 et équation 5).

$$\Delta i = -\int_A^B \frac{\|\text{grad } n\|}{n} \sin i ds \quad (5)$$

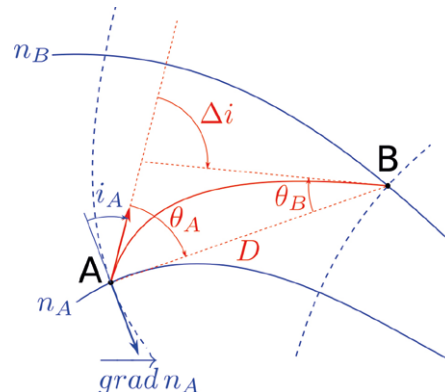


Figure 3. Déviation totale Δi due à la réfraction sur le chemin optique de A à B.

En appliquant une fois encore la loi de Snell-Descartes, il est possible de sortir le sinus de l'intégrale. En effet, on a l'équation 6.

$$n \sin i = n_A \sin i_A \quad (6)$$

Avec i_A l'angle entre le gradient et le chemin optique à la station en A. En

appliquant ce résultat dans l'équation 5, on obtient le résultat en formule 7.

$$\Delta i = -n_A \sin i_A \int_A^B \frac{\|\text{grad } n\|}{n^2} ds \quad (7)$$

Sur la figure 3, on note θ_A l'angle entre la tangente au chemin optique en A et la droite euclidienne (AB). De la même manière, on note θ_B en B. Géométriquement, on peut aisément démontrer que $\Delta i = \theta_A + \theta_B$.

Modèle usuel en vertical

Si A et B correspondent aux centres optiques, respectivement d'un tachéomètre et d'un prisme, nos mesures angulaires en A vers B sont faites par rapport à la tangente au chemin optique en A. Dès lors l'angle θ_A est celui qui nous intéresse pour corriger nos mesures de direction horizontale r et d'angle zénithal ζ .

Pour obtenir la modélisation usuelle en topométrie, certaines hypothèses sont faites pour simplifier la formule 7. En l'occurrence, on suppose que :

- Le gradient de n est exclusivement vertical. Dès lors, si on note les corrections Δr et $\Delta \zeta$ à apporter sur respectivement les directions horizontales et les angles zénithaux, on a $\Delta r = 0$ et $\Delta \zeta = \theta_A$. Cela implique également qu'à la station on ait $\sin i_A = \pm \sin \zeta$.
- La déviation est symétrique en A et en B, ce qui revient à dire que $\Delta \zeta = \theta_A = \Delta i/2$.

On peut alors modéliser le chemin optique comme étant un arc de cercle, dans un plan vertical, de rayon ρ . Si on note D la distance inclinée et d la distance horizontale de A à B, on obtient :

$$\Delta i = \frac{D}{\rho} \quad (8)$$

Introduisons maintenant le coefficient de réfraction k , lié au rapport entre le rayon de la Terre R et ce rayon de courbure moyen du chemin optique en équation 9. L'ajout du $\sin \zeta$ change légèrement la définition commune du coefficient de réfraction, mais cela permet de s'affranchir d'une hypothèse forte d'horizontalité des mesures.

$$k = \frac{R}{\rho \sin \zeta} \quad (9)$$

On obtient alors la modélisation usuelle en topométrie, liant la correction des

angles zénithaux avec ce coefficient k [Torge, 2001].

$$\Delta i = \frac{k D \sin \zeta}{R} = \frac{k d}{R} \Rightarrow \Delta \zeta = \frac{k d}{2R} \quad (10)$$

Si on identifie les termes de la *formule 10* avec ceux en 7, après application de nos hypothèses, on peut interpréter le coefficient k comme une forme de moyenne pondérée par les distances du gradient de n le long du chemin optique. En effet, on a :

$$k \approx \pm \frac{n_A R}{D} \int_A^B \frac{\|\text{grad } n\|}{n^2} ds \approx \pm \frac{n_A R}{\sum_j s_j} \frac{\sum_j \frac{\|\text{grad } n_j\|}{n_j^2} s_j}{\sum_j s_j} \quad (11)$$

■ Variabilité du coefficient de réfraction k

Le coefficient de réfraction est généralement modélisé par la valeur $k = 0.13$ [Torge, 2001] ou encore $k = 0.16$ [AFTOPO, 2000]. Ces valeurs sont obtenues en considérant le gradient standard de n avec l'altitude, essentiellement dû aux gradients de pression et de température, lorsqu'on est suffisamment haut au-dessus du sol pour que celui-ci n'ait plus d'effet thermique. D'après [Torge, 2001], cette valeur est applicable quand la hauteur dépasse 40 m. C'est sans doute une valeur à nuancer en introduisant la notion de couche limite de la basse atmosphère qui sépare la zone convective, soumise aux effets thermiques du sol, et la zone stratifiée. La hauteur de cette couche limite est très variable – entre 1 m et 1 km – et est difficile à estimer¹.

Une publication ancienne mais particulièrement intéressante [Hübner, 1977] propose le schéma en *figure 4* qui synthétise remarquablement les ordres de grandeur du coefficient de réfraction k en fonction des heures de la journée et de la hauteur de la visée au-dessus du sol.

Tout d'abord, la température a un cycle journalier. Sa variation quotidienne est maximale au levé et au coucher du soleil. Lors de ces périodes

¹ Voir la définition de la couche limite atmosphérique, et notamment la couche de surface : <http://www.areelis.fr/documentation-couche-limite-atmospherique-43.html>

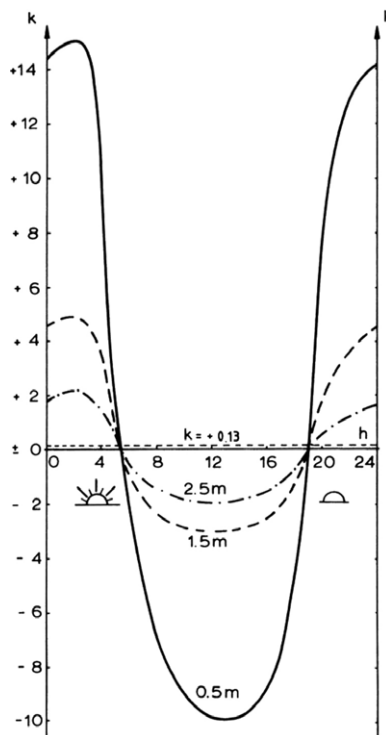


Figure 4. Ordre de grandeur de la valeur de k en fonction de l'heure de la journée et de la hauteur au-dessus du sol [Hübner, 1977].

de la journée, la valeur du coefficient k varie énormément et ce, d'autant plus si la visée est proche du sol (0.5 m, 1.5 m puis 2.5 m sur la *figure 4*). Cet état de fait a été confirmé par [Hirt et al., 2010].

Il est donc recommandé d'éviter les mesures proches du levé ou du coucher du soleil. Au milieu de la journée, même si la valeur de k peut être très différente de 0.13 (ainsi on lit $k = -3$ pour des visées à 1.5 m, la hauteur typique de canne), la variation de ce paramètre est minimale.

■ Comment mesurer ou prédire k ?

Pour qui souhaite obtenir des résultats exacts en nivellement trigonométrique, il est nécessaire, si la distance dépasse quelques centaines de mètres, de connaître la valeur de k . En *table 1*, on peut se représenter à 300 m seulement quels effets peuvent engendrer la réfraction sur la dénivelée.

k	$R = \frac{k d^2}{2R} \text{ [mm]}$
0.13	1
-1	-7
-3	-21

Table 1. Effets en mm de la réfraction sur une dénivelée trigonométrique longue de 300 m.

Déterminer k est un problème ancien. La première solution, bien connue mais peu appliquée désormais, consiste à effectuer des visées réciproques simultanées. Cette méthode, qui sera décrite dans la suite de cet article, est efficace, pour peu que la réfraction influe de manière symétrique sur le chemin optique. Toutefois, elle a l'inconvénient de nécessiter deux instruments au lieu d'un, et de ce fait de doubler le nombre d'opérateurs.

Une autre méthode a été proposée par [Ingensand, 2002] et testée récemment par [Kasser et Magnenat, 2017], en l'occurrence la dispersométrie qui tire profit du fait que la déviation due à la réfraction varie également en fonction de la longueur d'onde du faisceau propagé. Ainsi si un objet est mesuré angulairement à deux longueurs d'onde différentes connues, il est possible de déduire la vraie valeur de k de la différence angulaire mesurée. L'inconvénient de cette méthode est la précision angulaire requise pour déduire la valeur de k . Le travail de [Kasser et Magnenat, 2017] a entre autres eu le mérite de montrer que les outils de traitement d'images pouvaient être une piste intéressante dans cette voie.

La dernière piste à notre connaissance consiste à disposer suffisamment de capteurs météorologiques pour construire un modèle du gradient de n et prédire, par la méthode des éléments finis, les coefficients k à appliquer pour chaque mesure à chaque instant. Si cette piste peut être éventuellement envisagée dans un contexte industriel ou métrologique, en auscultation d'ouvrages extérieurs elle n'est pas raisonnable d'un point de vue pratique.

Visées simultanées [quasi] réciproques

Dans cette partie, nous allons décrire le fondement des visées réciproques dans leur capacité à s'affranchir presque totalement des problèmes de réfraction. Nous proposerons quelques idées simples à mettre en place sur le terrain pour en bénéficier sans recourir à du matériel spécial.



■ Principe des visées réciproques simultanées

Une visée de A vers B est déviée par la réfraction. Lors de cette visée, on mesure la distance inclinée D séparant les deux points et on définit angulairement la tangente au chemin optique à la station A. Si au même instant la mesure réciproque est effectuée, on dispose alors de la définition de la seconde tangente. Si, conformément à la figure 5, on désigne $\alpha \approx d/R$ l'angle au centre de la Terre (avec d la distance horizontale) et ζ_A et ζ_B , les deux angles zénithaux mesurés, on obtient la relation 12.

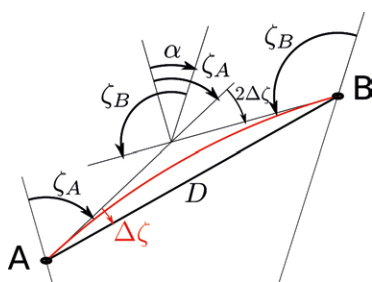


Figure 5. Schéma de principe des visées réciproques simultanées. Les mesures des angles zénithaux aux deux extrémités permettent de déduire la correction de réfraction.

$$\zeta_A + \zeta_B + 2\Delta\zeta = \pi + \alpha \quad (12)$$

D'où la correction des angles zénithaux $\Delta\zeta$ suivante, qui permet, si besoin est, de calculer la valeur du coefficient de réfraction k .

$$\Delta\zeta = \frac{k d}{2R} = \frac{\pi}{2} + \frac{d}{R} - \frac{\zeta_A + \zeta_B}{2} \quad (13)$$

Néanmoins, on peut noter les inconvénients suivants à ce modèle :

- Il n'est efficace que si l'hypothèse d'une déviation symétrique est validée.
- Il nécessite la visée réciproque des centres optiques des deux tachéomètres ce qui, en mode de pointé automatique, peut représenter un risque d'interférence des ATR (*Automatic Target Recognition*) si les instruments sont semblables.

■ Dénivelées réciproques simultanées

Prenons la formule d'une dénivelée brute h' en nivellement trigonométrique, avec I et S , les hauteurs respectivement de l'instrument et du prisme.

$$h' = I - S + D \cos \zeta \quad (14)$$

La dénivelée h est égale à cette dénivelée brute à laquelle on ajoute la correction de niveau apparent $E - R$ [Touzé, 2017].

$$h = h' + \mathcal{E} - \mathcal{R} \quad \text{avec} \quad (15)$$

$$\mathcal{E} - \mathcal{R} = (1 - k) \frac{d^2}{2R}$$

Soit h_{AB} la dénivelée vraie entre deux points A et B. Si cette dénivelée est mesurée de manière réciproque, les deux visées partagent le même coefficient k . Il est donc possible d'écrire ce qui suit, aux erreurs de mesure près

$$\begin{aligned} \bar{h}_{AB} &= \frac{h_{AB} - h_{BA}}{2} \\ &= \frac{h'_{AB} - h'_{BA}}{2} + \frac{1 - k}{4R} (d_{AB}^2 - d_{BA}^2) \\ &\approx \frac{h'_{AB} - h'_{BA}}{2} \quad (16) \end{aligned}$$

Les distances horizontales réciproques étant sensiblement identiques, la dénivelée corrigée est obtenue par la moyenne des dénivelées brutes réciproques simultanées. Cette approche est particulièrement efficace si on dispose de cadres permettant de placer, à l'aplomb de chacun des tachéomètres, un prisme. Quant au risque d'interférence des ATR, il peut être toujours présent quoique amoindri par rapport au cas précédent.

■ Dénivelées quasi réciproques

À défaut de cadre spécial, il est possible de déporter un prisme à quelques mètres de chaque station. Dans ce cas

notre canevas correspond à la figure 6, dans laquelle les visées simultanées sont $A \rightarrow B.1$ et $B \rightarrow A.1$. Si la distance séparant chaque station de son prisme déporté est négligeable par rapport à la distance entre les stations, on parle de visées quasi réciproques.

En appliquant la relation de Chasles sur nos dénivelées, on peut alors se ramener au cas précédent selon les formules 17 et 18, dans lesquelles α et β sont respectivement les angles horizontaux ($AB.1, AA.1$) et ($BA.1, BB.1$) (cf. figure 6).

$$\bar{h}_{AB} = \frac{(h'_{AB.1} - h'_{BB.1}) - (h'_{BA.1} - h'_{AA.1})}{2} + (1 - k) \Delta \quad (17)$$

Avec

$$\Delta = \frac{d_{AA.1} d_{AB.1} \cos \alpha - d_{BB.1} d_{BA.1} \cos \beta}{2R} \quad (18)$$

L'expression de Δ se retrouve aisément à l'aide de la loi des cosinus. Ce paramètre, homogène à une longueur, caractérise le biais de quasi-réciprocité. Il peut être déterminé à l'aide des mesures de distances et de directions horizontales. Comme il est peu probable que $|1-k|$ soit supérieur à 10, si une exactitude σ sur la dénivelée est souhaitée, on peut considérer $(1-k) \cdot \Delta$ négligeable quand $|\Delta| < \sigma/10$.

■ Mesure d'un triangle de 5 km de périmètre

En septembre 2018, les étudiants sortant de la 1^{re} année de la filière géoma-

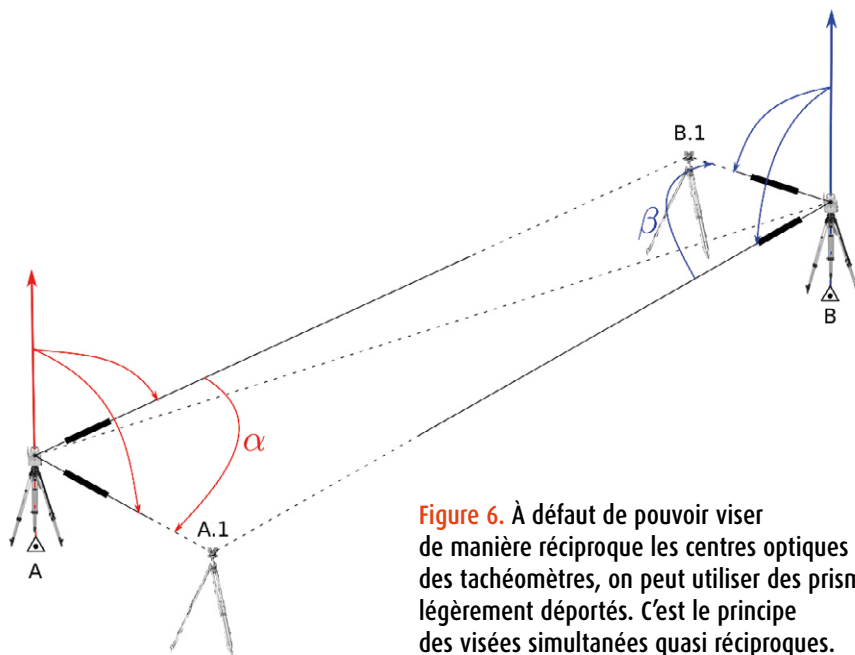


Figure 6. À défaut de pouvoir viser de manière réciproque les centres optiques des tachéomètres, on peut utiliser des prismes légèrement déportés. C'est le principe des visées simultanées quasi réciproques.

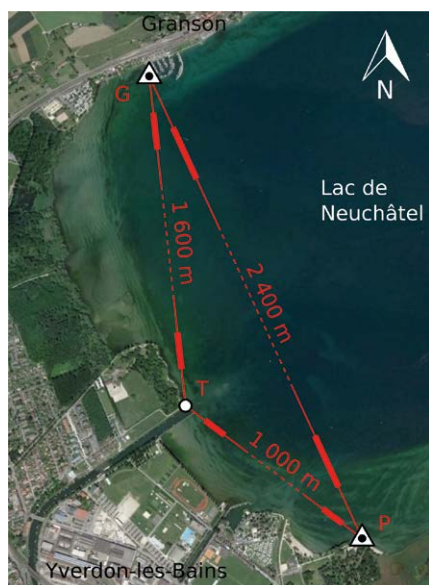


Figure 7. Triangle de visées simultanées quasi réciproques mesuré en septembre 2018. Les points P et G sont des références altimétriques données à une précision de 2 cm. [Image Google Earth]

tique de la HEIG-VD ont appliqué la méthode des dénivelées simultanées quasi réciproques pour déterminer l'altitude du point T en s'appuyant sur celle des points cadastraux G et P, dont la précision est donnée à 2 cm. Les trois dénivelées ont été mesurées simultanément et de manière quasi réciproque, par trois séries d'observations dans les deux positions de la lunette.

Les visées ont été faites en milieu de matinée à environ 2 m au-dessus du lac de Neuchâtel (cf. figure 7). Le périmètre du triangle ainsi formé est de 5 km. Les conditions météorologiques étaient bonnes : temps couvert et plafond haut. Dans de telles conditions, les températures du sol et de l'air sont sensiblement égales, ce qui minimise l'épaisseur de la couche limite. L'expérience a duré 2 h, en incluant les déplacements, le montage et le démontage. Les tachéomètres employés avaient une précision angulaire de 3 cc (soit 0.3 mgon) et une précision en distance de 1 mm + 1 ppm.

Les biais de quasi-réciprocité Δ étaient tous inférieurs, en valeur absolue, à 0.6 mm et, de ce fait, ils ont été négligés dans la formule 17. Les résultats des dénivelées obtenues sont affichés en table 2. Plusieurs remarques peuvent être faites :

- La somme des dénivelées est de

Dénivelée	h_{moy} [m]	h_{ref} [m]
$P \rightarrow G$	-0.098 ± 0.004	-0.094 ± 0.028
$G \rightarrow T$	-0.900 ± 0.004	
$T \rightarrow P$	0.981 ± 0.001	
Σ	-0.017 ± 0.006	

17 mm, ce qui, par les écarts-types empiriques propagés, est légèrement hors de la tolérance à 99 %.

- Cette fermeture est, dans l'absolu, tout à fait satisfaisante pour du nivellement trigonométrique dont la précision, sur de longues distances, est sensiblement proportionnelle au carré de la distance [Touzé, 2017].
- La justesse de la base PG, par rapport aux altitudes des deux repères, est de 4 mm.

En 2 h de travail sur le terrain et environ autant de traitement, nous avons pu obtenir un résultat tout à fait sérieux en termes de précision et de justesse, par rapport à du nivellement géométrique ou GNSS, et ce, sur des visées kilométriques. De plus, une fois les dénivelées compensées, il est possible de déduire les valeurs de k pour chaque visée. Ces valeurs sont affichées dans le graphique en figure 8.

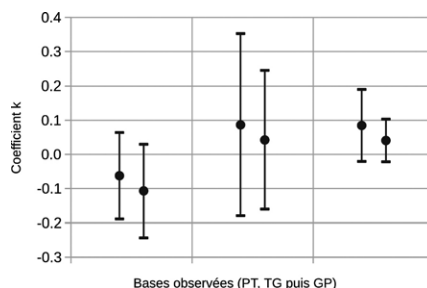


Figure 8. Pour chacune des six bases mesurées, valeurs moyennes de k et intervalles de confiance à 99 %.

Dans ces résultats, on peut constater que la valeur moyenne du coefficient de réfraction k est proche de 0. Cependant, les intervalles de confiance mettent en évidence que k est susceptible de varier dans le temps et dans l'espace dans un intervalle compris entre -0.2 et 0.3.

Ajustement d'un réseau d'auscultation

Quel géomètre, amené à compenser régulièrement de grands réseaux tachéométriques, n'a jamais observé d'excellents résultats planimétriques

Table 2. Résultats des dénivelées moyennées, corrigées de la réfraction et valeur de la dénivelée de référence.

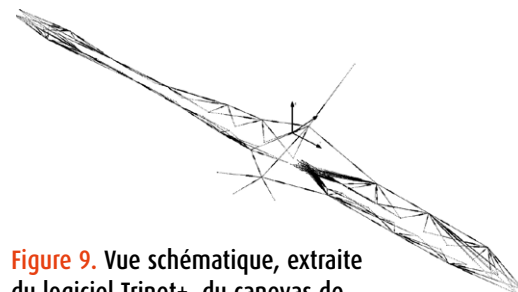


Figure 9. Vue schématique, extraite du logiciel Trinet+, du canevas de surveillance de ce chantier traité par la société SITES.

tandis qu'en altimétrie, la proportion d'angles zénithaux hors tolérance est alarmante ? Que faire ? Il s'agit sans doute du problème de réfraction le plus courant et pour lequel, néanmoins, on ne trouve pas dans la littérature de méthodologie de traitement.

La société SITES assure, parmi de nombreuses autres missions, des mandats d'auscultation d'ouvrages d'art. Le réseau présenté ci-après correspond à la surveillance d'une section droite de 800 m d'une ligne ferroviaire à grande vitesse, dans le Sud de la France. Il est situé dans une zone de remblai et contient en son centre, un petit viaduc routier (cf. schéma du canevas en figure 9). Les données de ce réseau ont aimablement été mises à disposition par M. Matthieu Hansen.

Modèle mathématique

Pour pouvoir valider l'adéquation des mesures entre elles, sans influence des points fixes, une compensation libre a été effectuée. Pour ce faire, un unique point fixe en 2D+1 a été arbitrairement choisi, ainsi qu'un gisement entre les deux extrémités du réseau. L'échelle est donnée par les mesures de distance. La compensation a été réalisée en 2D+1 à l'aide du logiciel suisse LTOP, développé par SwissTopo².

Pour la compensation altimétrique, la valeur considérée dans un premier temps du coefficient de réfraction est $k = 0.13$. Le modèle stochastique appliqué est quant à lui résumé en table 3.

² <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/home/products/software/ltop.html>

Paramètres	Précisions <i>a priori</i>
Directions horizontales	1.5 cc
Angles zénithaux	1.5 cc
Distances inclinées	0.6 mm + 1 ppm
Centrages	0.4 mm
Hauteurs	0.3 mm
Coefficient de réfraction	0.06

Table 3. Modèle stochastique initial de la compensation libre (avec 1 cc = 0.1 mgon).

Groupe	Deg. lib.	Inf.	Quotient	Sup.
Tout	294	0.89	0.83	1.11
Distances	169.969	0.86	0.61	1.14
Dir. horiz.	124.031	0.84	1.06	1.17

Table 5. Quotient d'erreur moyenne planimétrique et quotients des groupes d'observations, ainsi que leurs intervalles de confiance.



Les précisions de centrage et de hauteur correspondent ici aux effets combinés à la station et au prisme. Ensuite, le fait d'introduire une précision sur le coefficient k est – à notre connaissance – une exclusivité du logiciel LTOP. Cela revient à dépendre les angles zénithaux associés aux visées lointaines du fait des variations du coefficient de réfraction (effet de scintillement dont nous parlons au paragraphe 5.4.).

Le niveau de confiance $1 - \alpha$ pour les tests statistiques de première espèce est 99 %. Vu les degrés de libertés r des calculs planimétriques et altimétriques, respectivement 294 et 159, cela nous amène à une tolérance T sur les résidus *studentisés*³ w_i , dans les deux cas, de 2.6. Le grand nombre d'observations n (507 et 253) combiné au niveau de confiance fait que le nombre p de probables bonnes observations hors tolérance n'est pas négligeable. Nous en tenons compte ainsi que du seuil δ défini comme la valeur de la loi de Student au-delà de laquelle la probabilité est de $1/n$.

$$\begin{cases} p = \text{arrondi}(n\alpha) \\ \delta \text{ tel que } \frac{1}{n} = \mathcal{P}(|\tau_r| \geq \delta) \end{cases} \quad (19)$$

Lors d'un calcul de compensation d'un grand réseau, avec beaucoup d'observations, étudier les résidus *studentisés* w_i par rapport à ces trois paramètres T , δ et p , plutôt que de la seule tolérance

Dimension	n	r	T	δ	p
Planimétrie	507	294	2.59	3.12	5
Altimétrie	253	159	2.61	2.92	3

Table 4. Nombre d'observations n , degrés de libertés r , tolérances à 99 % T , seuils d'inacceptabilité δ et nombres probables de bonnes observations hors tolérance p .

³ Si on divise les résidus par leurs précisions *a priori*, on obtient les résidus normalisés qui suivent la loi normale centrée réduite. Si on prend la précision *a posteriori*, ils suivent la loi du τ de Student à r degrés de liberté. On parle alors de résidus *studentisés*.

T , permet de limiter la désactivation de bonnes observations légèrement hors tolérance en respectant la queue de distribution de la loi de Student. On limite ainsi la diminution inéluctable des indicateurs de précision *a posteriori* qui, sans cela, peuvent parfois devenir irréalistes.

■ Compensation planimétrique

En planimétrie, afin d'obtenir un nombre raisonnable de résidus *studentisés* entre T et δ , il a été nécessaire de dépendre 10 observations, soit 2 % des mesures, en dégradant leur précision de centrage jusqu'à 3 mm au maximum. Aucune mesure n'a été désactivée. Cela fait, il reste 6 résidus compris entre 2.6 et 3.1. Le quotient d'erreur moyenne⁴ Q obtenu est de 0.83 ; il est légèrement inférieur à son intervalle de confiance. Notre résultat est donc plus précis que prévu d'un rapport 0.83. L'étude des quotients des groupes d'observations en *table 5*, tels que définis dans [Sillard, 2001], montre que ce sont les distances qui sont trop précises. Comme il ne nous a pas paru raisonnable de modifier le modèle stochastique des distances qui est déjà très strict, nous avons validé ce résultat, excellent au demeurant.

■ Premiers calculs altimétriques

Lors de la première compensation libre altimétrique, nous avons eu 95 résidus hors tolérance sur 253 observations, soit 38 %. Une telle proportion étant inacceptable, nous avons supposé dans un premier temps la présence de quelques grandes fautes. Pour ce faire, nous avons effectué une compensation robuste de Huber avec un coefficient de 2.5 [Guble, 2003]. L'amélioration est relative puisqu'il reste 69 résidus hors tolérance, soit 27 % des observations, ce qui reste une proportion déraisonnable. Lors d'une compensation robuste, nous devrions effectivement nous attendre à avoir une réduction drastique du

⁴ C'est-à-dire la racine carrée du rapport entre les facteurs de variance *a posteriori* sur *a priori*.

nombre de fautes. Le problème est vraisemblablement à imputer à une insuffisance du modèle fonctionnel ou du modèle stochastique.

Les mesures ayant été faites à hauteur d'homme au-dessus du ballast, lors de journées très chaudes et ensoleillées typiques du mois d'août dans le sud de la France, nous avons supposé que l'origine du problème était liée exclusivement à la réfraction.

■ Adaptation du modèle stochastique altimétrique

Lorsqu'on regarde à l'œil nu l'horizon (cf. *figure 10*), selon l'ensoleillement, chacun peut constater un scintillement plus ou moins prononcé selon la distance. Ce phénomène est naturellement plus visible par le biais du grossissement du télescope d'un tachéomètre. Ce scintillement est dû aux brusques variations dans le temps du coefficient de réfraction ; il est d'autant plus prononcé quand le gradient de l'indice de réfraction est élevé, par temps chaud notamment. Si ce phénomène engendre du bruit dans ce que nous observons à l'œil nu, comment pourrait-il ne pas affecter la précision de nos mesures d'angles zénithaux ? Or, à notre connaissance, LTOP est le seul logiciel qui permet d'en tenir compte dans le modèle stochastique.

$$\bar{\zeta} = \zeta + \Delta\zeta + \varepsilon \quad (20)$$



Figure 10. Image typique d'une route par temps chaud. Le mirage démontre la présence d'un coefficient k négatif. Avec nos propres yeux, l'image vibrerait. Cet effet de scintillation est dû aux brusques variations de k dans le temps.

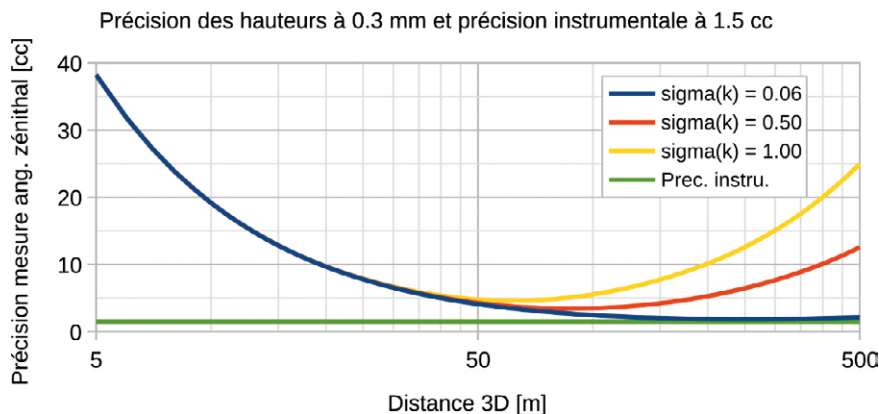


Figure 11. Modèle stochastique des mesures des angles zénithaux en fonction de la distance et des précisions de hauteurs, des lectures instrumentales et de la réfraction.

Considérons la *formule 20* qui lie l'angle zénithal vrai ζ avec l'angle mesuré ζ_s , la correction de réfraction $\Delta\zeta$ et l'erreur aléatoire ε . Par propagation d'erreur, il est possible de déterminer le modèle stochastique de notre erreur de mesure σ_ε en fonction des précisions σ_h des hauteurs, σ_ζ des lectures angulaires et σ_k du coefficient de réfraction. On obtient la *formule 21* dans laquelle d est la distance horizontale.

$$\sigma_\varepsilon \approx \sqrt{\frac{\sigma_h^2}{d^2} + \sigma_\zeta^2 + \frac{d^2 \sigma_k^2}{4R^2}} \quad (21)$$

La *figure 11* applique cette formule selon les précisions instrumentales et de hauteur de notre réseau, tout en considérant trois valeurs de σ_k caractérisant le bruit dû aux variations brusques de k par l'effet de scintillement. Augmenter la valeur de ce paramètre revient donc à dépendre les angles zénithaux associés aux visées lointaines. La valeur initiale $\sigma_k = 0.06$ est celle implémentée par défaut dans LTOP.

Toujours en mode robuste, nous avons dans un premier temps défini $\sigma_k = 0.5$, ce qui, selon la *figure 11*, engendre un bruit de scintillement de 10 cc à 400 m. De 69, nous sommes passés à 63 résidus hors tolérance, soit 25 % des observations. Jugeant ce gain insuffisant, nous avons choisi de définir $\sigma_k = 1.0$, c'est-à-dire 10 cc à 200 m. L'amélioration est ici nette puisqu'il ne reste plus que 36 résidus hors tolérance, soit 14 % des mesures.

■ Recherche du coefficient k optimal

Il reste désormais à définir quelle valeur moyenne du coefficient de réfraction k est optimale pour le calcul de ce réseau. En effet, selon [Hübner, 1977] et la

figure 4, par temps chaud au-dessus du sol, k a peu de chance d'être proche de 0.13. LTOP ne permettant pas d'ajuster la valeur de k , nous avons donc effectué plusieurs compensations en mode robuste en faisant varier k de -5 à +1 par pas de 0.2 et nous avons retenu deux critères, le quotient d'erreur moyenne et le nombre de résidus hors tolérance. Nous obtenons le graphique en *figure 12*.

Les courbes associées au quotient et au nombre de résidus hors tolérance admettent manifestement un minimum pour des valeurs de k sensiblement identiques. Après une régression polynomiale, nous avons déterminé les valeurs de k minimisant ces deux courbes (*cf. table 6*). Une moyenne pondérée nous a permis d'obtenir le coefficient k optimal de ce réseau, en l'occurrence $k = -2.12$. Pour cette valeur, le nombre de résidus hors tolérance est de 14, soit 6 % des mesures.

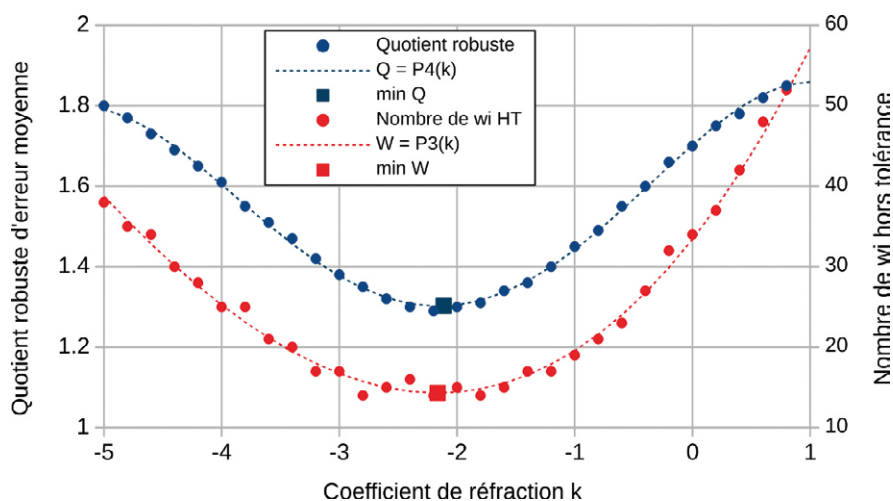


Figure 12. En mode robuste, recherche du coefficient k optimal minimisant le quotient d'erreur moyenne et le nombre de résidus hors tolérance.

Courbe	\hat{k}	$\sigma_{\hat{k}}$
$\min_k Q$	-2.114	0.014
$\min_k W$	-2.165	0.036
Moyenne	-2.121	0.018

Table 6. Valeurs de k minimisant le quotient d'erreur moyenne et le nombre de résidus hors tolérance.

■ Calcul final

Pour la compensation libre altimétrique finale, nous avons donc appliqué comme paramétrage de la réfraction $k = -2.12 \pm 1.0$ et nous avons quitté le mode robuste. Pour achever cette compensation, il a été nécessaire de dépendre 10 angles zénithaux (4 % des mesures) en dégradant la précision de hauteur à 3 mm au pire. Cela fait, il reste 3 résidus compris entre 2.6 et 2.9, ce qui est cohérent avec la loi de Student. Le quotient d'erreur moyenne altimétrique final est de 1.13. Il est acceptable par rapport à l'intervalle de confiance déduit de la loi du χ^2 , en l'occurrence [0.84;1.16]. Nous considérons que la libre altimétrie est validée. Les précisions finales des altitudes ajustées des 90 points du réseau sont comprises entre 0.4 et 1.2 mm. La précision médiane est de 0.8 mm.

Ainsi, de 95 résidus hors tolérances, nous sommes passés à 10 observations raisonnablement dépendées et ce – principalement – en réglant la valeur de deux paramètres, la variation de k sous la forme d'un écart-type dans le modèle stochastique et la valeur moyenne de k . La méthode employée peut être appliquée, quel que soit le logiciel employé, pour peu que celui-ci





permette de régler la valeur moyenne de k et d'adapter facilement le modèle stochastique des observations. Le fait d'agir sur ces deux paramètres n'a pas été arbitraire. La valeur finale du coefficient de réfraction est cohérente par rapport aux constats de [Hübner, 1977]. Quant à la précision de k dans le modèle stochastique des angles zénithaux, il se justifie par l'effet de scintillement que tout à chacun peut constater de ses propres yeux.

Conclusion

Des réflexions et expériences décrites précédemment, plusieurs conclusions peuvent être tirées sur les enjeux de réfraction en tachéométrie.

■ Sur le coefficient k lui-même

Tout d'abord, les deux expériences décrites s'appuient sur des visées proches du sol ou de l'eau, de l'ordre du mètre. Que ce soit par un temps couvert ou radieux, les valeurs estimées du coefficient de réfraction sont différentes de 0.13 et se comportent tel que décrit dans [Hübner, 1977] et [Hirt et al., 2010]. Plus particulièrement, lors de journées très ensoleillées, pour des visées à hauteur d'homme au-dessus du sol, un coefficient $k = -2$ est nettement plus vraisemblable que 0.13.

■ Sur les visées réciproques

Recommander d'employer la technique des visées réciproques pour assurer la justesse du nivellement trigonométrique n'est pas très novateur. Cependant, vu la faible utilisation de cette méthode, rappeler ce fait ne paraissait pas inutile. Mais plus généralement, en plus d'une dénivelée corrigée des effets de la réfraction, cette méthode permet également de déduire le coefficient k . Ainsi, lors d'un chantier d'auscultation, on pourrait envisager d'intégrer au canevas quelques visées réciproques, ne serait-ce que pour définir l'ordre de grandeur de k et de sa variabilité.

■ Lors de la compensation de réseaux

Avant tout, quelles que soient les conditions météorologiques lors du mesurage, il est nécessaire d'intégrer au modèle stochastique des angles zénithaux un paramètre de variabilité du

coefficient de réfraction sous la forme d'un écart-type. Son effet de dépendance des visées lointaines correspond au scintillement qui est d'autant plus marqué quand le temps est ensoleillé.

Ensuite, quand bien même le logiciel de compensation ne permet pas d'ajuster la valeur de k , il est possible d'en estimer la valeur optimale qui minimise le quotient d'erreur moyenne ou le nombre de résidus hors tolérance.

Nous avons été, ces dernières années, amenés à compenser de nombreux réseaux. Rares ont été les cas où cette recherche de k était requise, de l'ordre de 5 %. L'idée est plutôt d'avoir le réflexe, en cas de mesures par temps ensoleillé, de se dire que des effets de réfraction peuvent survenir et qu'une méthodologie de traitement existe si c'est la cas.

■ Et la suite ?

Cet article s'est focalisé sur le coefficient k dans le modèle standard de la réfraction, quand le gradient de l'indice de réfraction est vertical et que la déviation est symétrique. Dans le second volet de ce travail, nous présenterons un cas de réfraction latérale asymétrique, lors de visées proches d'un mur ensoleillé. Nous proposerons également une modélisation généralisée de la réfraction sur les visées tachéométriques, dont nous démontrerons la capacité à prendre en charge avec succès toutes ces expériences. ●

Bibliographie

- [AFTOPO, 2000] AFTOPO (2000). *Lexique topographique*. <https://www.aftopo.org/FR/Lexique-7.html>
- [Gubler, 2003] Gubler, E. (2003). *Description du programme LTOP, version 94*. Swisstopo. <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/home/products/software/ltop.html>
- [Hirt et al., 2010] Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B. et Sternberg, H. (2010). *Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements*. Journal of Geophysical research, Vol. 115. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JD014067>
- [Hübner, 1977] Hübner, E. (1977). *Einfluss der terrestrischen refraction auf den laserstrahl in bodennahen luftschichten*. Vermessungstechnik, 25(10).
- [Ingensand, 2002] Ingensand, H. (2002). *Concepts and solutions to overcome the*

refraction problem in terrestrial precision measurement. FIG XXII International Congress. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2002/js28/js28_ingensand.pdf

[Kasser et Magnenat, 2017] Kasser, M. et Magnenat, J.-L. (2017). *Étude d'un nouveau procédé pour la mesure et la correction de la réfraction par corrélation d'images*. XYZ, (N° 153).

[Sillard, 2001] Sillard, P. (2001). *Estimation par moindres carrés*. Collection ENSG-IGN.

[Torge, 2001] Torge, W. (2001). *Geodesy, third completely revised and extended edition*. Walter de Gruyter.

[Touzé, 2017] Touzé, T. (2017). *Nivellement trigonométrique*. Cours de bachelor 1 de la HEIG-VD.

Contacts

THOMAS TOUZÉ, HEIG-VD
thomas.touze@gmail.com

MATTHIEU HANSEN, Ingénieur INSA
Strasbourg – Chef du Groupe Topométrie,
Mesures Instrumentation Monitoring – SITES –
Aix en Provence – matthieu.hansen@sites.fr

ABSTRACT

Every surveyor knows that his lines of sights are deflected by refraction and that a model can be used for trigonometric leveling. This model comes directly from the Snell-Descartes law to which are added some assumptions that are quite reasonable when the ground thermal effects are negligible. Thus, we introduce the refraction coefficient k that for high enough observations above the ground, should tend towards 0.13.

The validity of this model for near-ground observations is, however, poorly known, as well as the order of magnitude of the refraction coefficient k . Yet it is close to the ground that we measure. In this first article in a series of two, we will base ourselves on literature and experiments to propose answers to both of these issues. Simultaneous reciprocal observations, in addition to a way of getting accurate height differences, will be seen as a way to estimate k . We will propose a method to compensate a monitoring network by adjusting the optimal refraction parameters. To do this, it will be necessary to consider the flicker effects due to refraction in the stochastic model of zenith angles.

Le gouffre le plus profond du monde

■ Paul COURBON

La montagne et les gouffres

En 1856, Andrew Waugh, arpenteur général des Indes orientales, annonce qu'après plusieurs années de mesures menées dans le cadre du "grand projet de topographie trigonométrique", le "Pic XV" a été coté officiellement à 8840 mètres d'altitude. Il lui donnera le nom de son prédécesseur au poste d'arpenteur général et le Pic XV (Appelé Chomolungma en tibétain et Sagarmāthā en népalais) deviendra "Mont Everest". Après les nombreuses mesures de triangulation qui suivront, son altitude sera fixée à 8848 m. En 1991, en utilisant 2 stations GPS au Népal, 2 stations GPS au Tibet, complétées de visées trigonométriques et de distances, on obtint : 8846,10 m [1].

En France, la première mesure géodésique du "mont Blanc" aurait été faite en 1685 par le géomètre et astronome genevois Nicolas Fatio et son frère Jean-Christophe. Ils donnent un calcul de l'altitude de la montagne estimée à 2 426 toises, soit 4728 m. A partir de 1863, toujours déterminée par triangulation, l'altitude officielle du plus haut sommet des Alpes a été fixée à 4807 mètres, affinée à 4807,20 mètres en 1892. Mais, subsiste l'indécision due à l'épaisseur importante de la neige qui recouvre le sommet, ce dernier n'étant pas marqué par un rocher sur lequel a été scellée une belle borne en granit ! Dans la période moderne, XYZ s'est fait l'écho des mesures GPS faites tous les deux ans depuis 2001, sous le patronage des géomètres-experts de Haute-Savoie [2]. Si l'altitude mesurée en 2017 est de 4808,72 mètres, les différentes mesures de 2001 à 2015 s'échelonnent dans une fourchette de plus de 3 m. De plus, la forme du sommet obtenue par un semis de points GPS ou scanner laser varie chaque année avec une amplitude de 40 m du déplacement en XY du point culminant depuis 2001 !

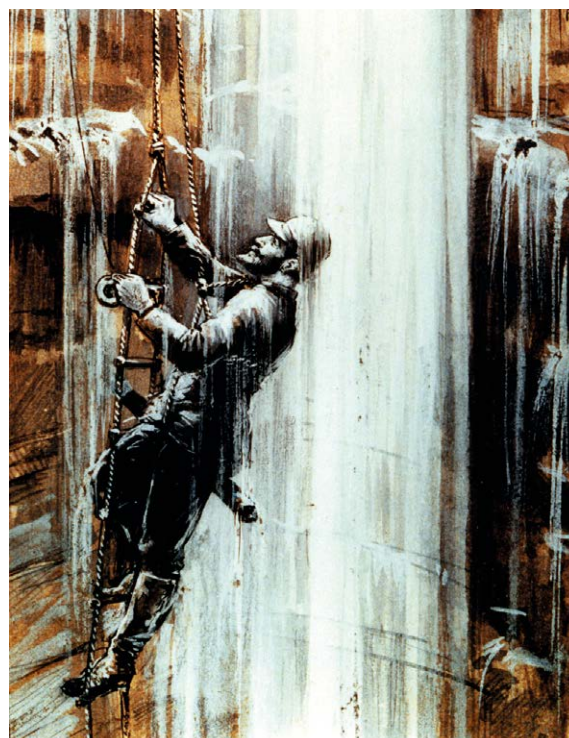
Mais les plus hauts sommets sont visibles de tous et, depuis longtemps, leur altitude a été fixée par des méthodes géodésiques rigoureuses dont on a pu confirmer la précision. Ce n'est pas le cas des grands gouffres dont beaucoup restent encore à découvrir. Un grand gouffre échappe à notre vue et nous devons nous fier à la rigueur des explorateurs qui ont dû faire leurs mesures dans des conditions difficiles et avec des instruments dont la légèreté limite la précision.

Les topographes spéléologues sont rarement des professionnels, de plus, ils ne doivent pas entraver la bonne marche des explorations, qui lors d'une progression éprouvante, se font sans perdre de temps. C'est un peu comme si on demandait aux alpinistes qui gravissent l'Everest de faire des mesures de pentes et de distances au cours de leur ascension. Si on peut mesurer l'altitude d'un sommet sans y aller, mesurer la profondeur d'un gouffre nécessite qu'on en atteigne le fond !

Les lignes qui suivent permettront de comprendre le problème et de fixer une précision aux profondeurs annoncées.

■ MOTS-CLÉS

Topographie, précision, décamètre, topofil, Disto Leica, boussole, clisimètre



Figures 1 et 2. Explorations à l'époque de Martel, vers 1900.





■ *Les conditions du lever souterrain*

Les deux gravures jointes illustrent les difficultés de la progression souterraine. Dans les grands gouffres parsemés de puits, passages étroits, escalades, rivières impétueuses et parfois des siphons à passer en plongée, pas question de descendre trépieds et théodolites !

■ *Retour à un passé récent*

Je me suis attaché à la chronologie du gouffre le plus profond du monde étendue sur près de trois siècles. De ce fait, je ne peux ignorer les difficultés de calculs passées, qui aujourd'hui ont été balayées par l'informatique et la création de logiciels accessibles à tous. En 1955, quand j'ai passé le baccalauréat, nous étions moins de 100 000 à le faire en France, avec 65 % de réussite. Aujourd'hui il y a plus de 700 000 candidats avec 85 % de réussite. Il faut aussi considérer que dans les années 1950, la majorité des lycéens prenaient une filière littéraire. Dans mon lycée, il y avait en terminale deux classes de mathématiques élémentaires pour cinq classes de philo. Il faut en tenir compte, en sachant que non-professionnels de la topographie, la plupart des spéléologues ne devaient compter que sur les notions qui leur restaient de l'école quand ils décidaient de mesurer une cavité.

Aussi, il ne faut pas s'étonner si de nombreux spéléologues, même quand ils menaient leurs mesures avec sérieux, pataugeaient lors des calculs, confondant pourcentages et angles verticaux, sinus et tangentes ! En 1953, l'équipe qui avait topographié le gouffre de la Pierre Saint-Martin avait trouvé une profondeur de 729 m qui en faisait le gouffre le plus profond du monde. Je connaissais ces spéléologues qui formaient une équipe sérieuse ayant fait ses preuves ailleurs. Mais l'EDF qui voulait capter la rivière souterraine du gouffre refit exécuter cette topographie par des professionnels qui trouvèrent 689 m. Encore se trompèrent-ils de 5 m dans la mesure de la profondeur du puits de 320 m, exposé aux chutes de pierres, par lequel débute le gouffre. Je l'appris à mes dépens quand je fis l'exploration solitaire du gouffre en



Figure 3. Trop de spéléologues ne matérialisent pas leur station, comme ici au départ d'un puits de 160 m.

1971, en calculant la longueur des échelles à prendre au plus juste !

■ *Une quête difficile*

A partir de 1970, je me lançais dans la première rédaction d'un atlas des gouffres les plus profonds du monde et j'accumulais l'exploration de grands gouffres pour contrôler leur profondeur [3 à 6]. J'avais déjà été échaudé par toutes les erreurs relevées au cours des explorations des gouffres de la Provence ou des Causses. Erreurs toujours dans le même sens, tous les gouffres étant surcotés avec des erreurs pouvant atteindre + 50 %. Dans les grands gouffres européens explorés je ne relevais pas d'erreurs aussi importantes, mais certaines atteignaient 20 %. Pourtant, vers 1830, lors des explorations du karst triestin, les Autrichiens avaient fait des topographies précises !

Il faut dire que de nombreux spéléologues ne matérialisaient pas leurs stations par un petit point de peinture, celles-ci étant prises au jugé à l'endroit

où se trouvait "l'aide-topographe" que l'on avait visé et qui vous précédait pour les mesures. Les longueurs des puits étant souvent comptées en longueur d'échelles : si on avait utilisé 8 échelles on marquait un puits de 80 m, sans compter les longueurs perdues à l'amarrage, ou traînant au fond du puits.

Aussi, en 1972, à l'instigation de Philippe Renaud rédacteur de la revue *Spelunca*, était rédigé un numéro consacré à la topographie des cavités souterraines à laquelle je participais [7 et 8]. A partir de ce moment, en France, l'École française de spéléologie (EFS), commission de la Fédération française de spéléologie (FFS), organisait des stages de topographie à l'attention des spéléologues, selon des règles bien établies. En avance sur son époque, pendant plus de deux décennies, l'École française de spéléologie eut une grande influence en dehors du territoire national. Il faut ajouter que de 1944 à 2003, le plus profond gouffre du monde se trouva en France. En 1972

même, c'étaient les trois gouffres les plus profonds. Les méthodes enseignées en France eurent donc une grande influence sur la mesure des profondeurs.

Les instruments utilisés

Comme je l'ai écrit précédemment, pas de trépieds et de théodolite dans les levés souterrains. Les difficultés de la progression, le poids du matériel d'exploration et de bivouac à porter, même pour une équipe topographique qu'on allège au maximum, ne permettent qu'un matériel léger.

- **Dans les années 1950**, les rubans plastiques n'étaient pas encore apparus, certains utilisaient des doubles décamètres à ruban en toile. Mais beaucoup préféraient une cordelette avec des petits nœuds tous les mètres. Elle craignait moins l'eau et la boue, qu'un ruban de toile lors de son enroulement ! Le summum des boussoles utilisées était la Chaix employée par les géologues ; elle permettait aussi de prendre les pentes. On notait tout sur un carnet qu'on avait beaucoup de peine à préserver de l'humidité et de la boue, on n'y arrivait pas toujours. Les premiers carnets plastiques sur lesquels on pouvait écrire n'arrivèrent que vers 1975. De retour à la maison, certains faisaient directement leur report sur papier avec une règle graduée et un rapporteur. Une minorité le faisait par calcul à partir des tables de valeurs naturelles, avec les bonnes multiplications manuelles ! Nous rappelons que les premières calculatrices électroniques



Figure 4. Le décamètre ruban de toile dont l'usage était limité par la boue qui bloquait l'enroulement.

n'apparurent qu'en 1972 et encore, vu leur prix, elles furent limitées au départ à un usage professionnel.

- **Une grande avancée fut faite vers 1970** par l'adaptation du compteur métrique à fil perdu Chaix déjà employé par l'IGN pour les opérations de complètement des levés photogrammétriques. Le club spéléologique des Vulcains, à Lyon, avait complété ce compteur par une boussole Chaix intégrée au boîtier et par un demi-cercle gradué associé à une nivelle qui permettait de mesurer la pente matérialisée par le fil tendu entre deux stations.



Figure 5. La CHAIX, "Rolls-Royce" des boussoles ! Elle avait été conçue pour les géologues.

- **Le premier petit distancemètre électronique de Leica apparut en 1993.** Il était d'un prix élevé : de l'ordre de 8.000 F HT en 1996, soit plus de 2 000 euros actuels en tenant compte de l'érosion monétaire. Il ne mesurait que

jusqu'à 30 m au maximum, profondeur que dépassent de nombreux puits. Ce type d'appareil ne fut employé couramment sous terre que lorsque son prix baissa, au début des années 2000. Il fut alors souvent associé au combiné boussole-clinomètre Sunto, dont le viseur avec grossissement permettait une lecture plus précise des angles.

Les distancemètres électroniques s'améliorèrent avec le temps, augmentant la portée des mesures de longueur. Surtout, à partir de 2008, le Suisse Beat Heeb commercialise les premières adaptations du Distomat Leica permettant de mesurer l'azimut magnétique et les angles verticaux, grâce à un module bluetooth. Cet appareil demande cependant un étalonnage précis permettant d'avoir des mesures cohérentes quelle que soit sa position. Il permet actuellement d'enregistrer jusqu'à 4 000 mesures et peut être déchargé sur un logiciel approprié.

Les calculs : suivant l'évolution exponentielle de l'électronique et de l'informatique, plusieurs spéléologues mirent au point des logiciels de calcul et de dessin, permettant d'établir la topographie d'une cavité après déchargement des mesures du Distomat. Les premiers essais datent de la fin des années 1980. Mais en France le premier logiciel qui eut une

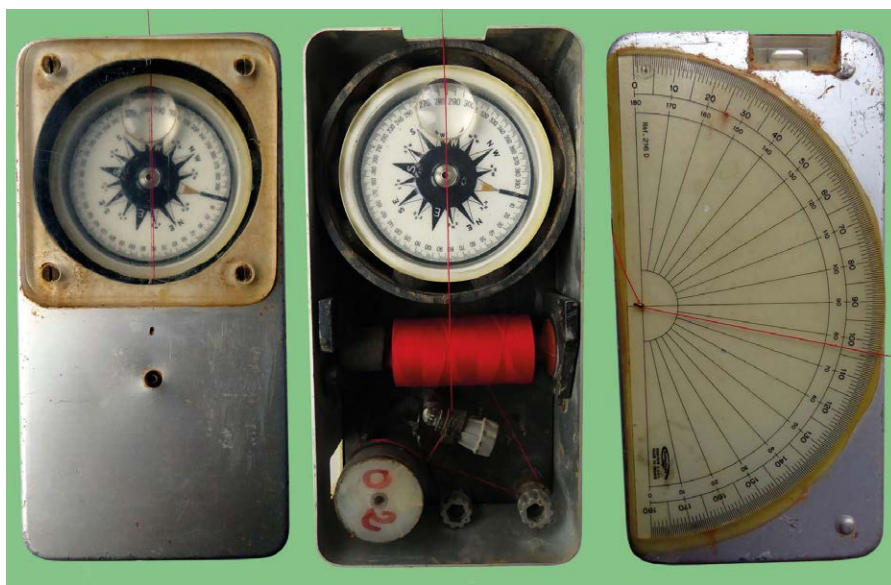


Figure 6. Le Topofil Vulcain vu recto et verso. Sur le côté, un compteur à tambour donnait les longueurs de fil déroulé.



Figure 7. Le nouveau Disto X310 donnant distance, azimuth magnétique et dénivellation. La boussole-clisimètre Suunto associée aux premiers distancemètres.



bonne diffusion, fut le Visual topo d'Eric David, en 1993. Vu le prix des PC portables à l'époque, ce premier logiciel fut utilisé sur calculatrice programmable. Visual topo a évolué et est toujours très utilisé, je l'ai sur mon ordinateur.

D'autres logiciels apparaissent encore aujourd'hui. Au lieu d'exporter les données et de faire ensuite le dessin avec des logiciels tels Illustrator, Autocad, Inkscape ou autres, la demande des topographes est maintenant de pouvoir calculer et dessiner dans le même logiciel. Ceci permet de lier les éléments graphiques aux mesures et d'obtenir directement les modifications de coordonnées en cas d'erreurs ou de bouclage de galeries. Mais il faut dire que ces dessins ou calculs ne peuvent être faits dans de nombreuses cavités, où l'humidité, la boue et des positions inconfortables rendent toutes les manipulations difficiles.

Je dois préciser que les Américains étaient en avance sur nous. En 1979, j'explorais avec les Texans de l'AMCS (*Association for Mexican Caves Studies*) le *Sistema Purification*, au nord du Mexique. C'était alors la plus profonde traversée hydrogéologique (avec une entrée et une sortie) du monde avec 858 m de dénivellation. Depuis plusieurs années les Texans s'attachaient à explorer les nombreuses branches de cette cavité hors normes. Ils m'avaient montré le listing informatique, où les coordon-

nées XYZ des stations étaient calculées en fonction des mesures qu'ils avaient effectuées.

La précision des mesures

Nous en venons au point le plus délicat, qui outre la précision des appareils utilisés, est lié aux conditions inconfortables de travail.

Cette précision est liée à quatre éléments : l'erreur de centrage et les erreurs de la mesure des longueurs, des angles verticaux et horizontaux.

L'erreur de centrage : peu de spéléologues ont la précaution de prendre un marqueur pour matérialiser leurs stations. Mais, même quand cette précaution est prise, il est souvent difficile, en fonction de la nature du point de station de mettre son œil exactement sur le point de peinture. L'œil de l'observateur est souvent décalé de 10 à 20 cm (*Figure 8*).

L'erreur sur les longueurs : si la précision des distancemètres actuels est presque centimétrique (à condition que l'objet visé soit parfaitement défini et plan), cela n'est pas le cas des autres instruments de mesure des longueurs. Que ce soit avec un décamètre ou un topofil, il y a les problèmes de tension et l'erreur de chaînette qui augmente avec la longueur des portées. Dans un puits profond, on est obligé de mettre un poids pour tendre le fil du topofil.

Quel est le poids le plus judicieux ! Sur des puits de 300 m j'ai décelé des écarts de 2 à 3 m, disons 1 %.

L'erreur sur l'angle vertical : les clinomètres Suunto, sont gradués au 1 %. Mais, sans l'appui d'un trépied il est parfois difficile de garder une immobilité complète qui pourrait aboutir à une appréciation de 0.5 %. De plus, bien que cela leur ait été conseillé, une infime minorité de spéléologues fait un étalonnage en extérieur sur deux supports stables avec deux visées réciproques. J'ai souvent constaté des écarts de 2 % dans cet exercice. Aujourd'hui, on a une précision meilleure avec le Distomat vu précédemment.

L'erreur sur l'angle horizontal : l'usage d'une boussole nécessite de maintenir le cercle gradué horizontal. Or dans une cavité accidentée de nombreuses visées ont une forte pente et sortent du champ de vue du petit trait de visée. Il faut donc apprécier la direction visée. L'erreur peut dépasser 2 grades, le Distomat s'avérant plus précis.

■ Estimation de la précision finale

Je reprends un calcul fait en 1972, avec des données que je ne possède plus. Pour traiter cette précision, j'avais repris une topographie que j'avais réalisée en 1970 dans un gouffre qui était alors le troisième du monde par sa profondeur (-980 m). Du fait de sa diffi-



Figure 8. L'erreur de centrage est accentuée par le port du casque qui élargit la tête.



Figure 9. Lors de l'exploration du gouffre le plus profond du monde en 1978, chacun des quatre équipiers avait 35 kg de matériel. Parmi les difficultés, de longs passages en opposition où les mesures sont inconfortables, difficiles à faire et à noter.

culté de parcours, avec de nombreuses parties étroites, nous avons eu 282 portées d'une longueur moyenne de 7 m, le puits le plus profond dépassant à peine 30 m. Je ne m'étais pas lancé dans le calcul rigoureux, prenant en compte chacune de ces 282 portées. J'avais estimé que nous aurions une très bonne approche en prenant en compte 282 portées moyennes.

Pour chaque portée, en estimant :

- l'erreur de centrage à 0.15 m
- l'erreur due à la pente à $7 \text{ m} \times 2 \% = 0.14 \text{ m}$
- l'erreur en longueur à $7 \text{ m} \times 1 \% = 0.07 \text{ m}$ on obtenait une résultante de : $\sqrt{(0.15^2 + 0.14^2 + 0.07^2)} = 0.22 \text{ m}$.

Pour l'ensemble de la cavité l'écart-type s'élevait donc à $0.22 \times \sqrt{282} = 3.7 \text{ m}$, soit une tolérance de $2.7 \times 3.7 = 9.99 \text{ m}$. Compte tenu des difficultés extrêmes de travail et des difficultés de mesures dans certaines stations inconfortables,

c'est cette tolérance que je préfère retenir comme ordre de précision. Elle correspond à 1 % de la profondeur de la cavité.

Bien sûr, lors d'études particulières de cavités, dans des conditions moins difficiles et moins exténuantes, on peut obtenir des précisions bien meilleures. Mais ce chiffre a été conforté lors de la reprise de deux topographies. Le spéléologue russe Alexander Klimtchouk donne la même précision de 1% concernant le dernier gouffre le plus profond du monde, exploré en Caucase (voir ci-contre).

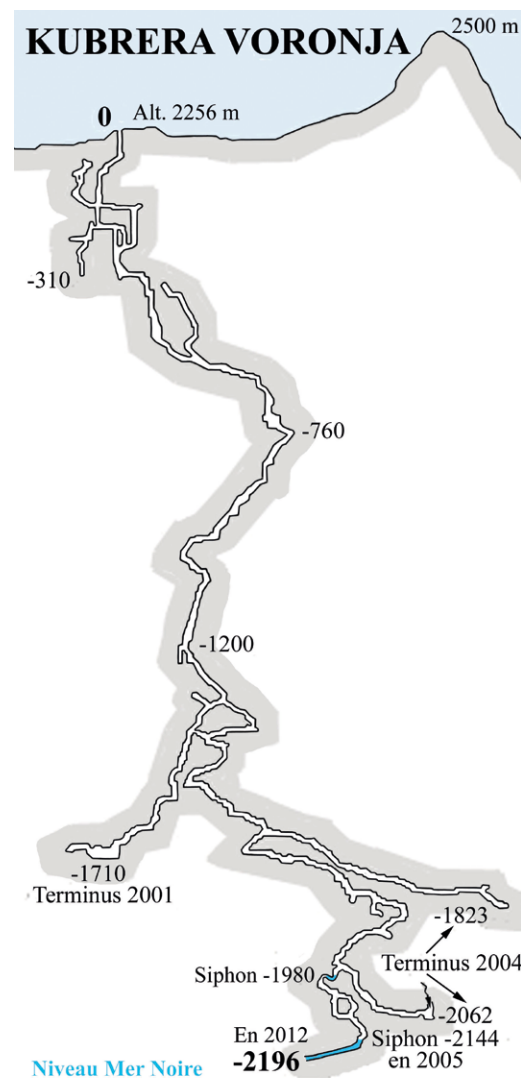
Quand la technique s'en mêle

■ L'U-GPS

Dans XYZ n° 126 [9] avait été abordée l'utilisation du GPS pour déterminer le déplacement d'un explorateur sous terre

(U-GPS). Cet opérateur était relié aux quatre émetteurs en temps réel disposés en surface par une jonction électromagnétique traversant le sol. On pouvait ainsi suivre en permanence l'itinéraire du spéléologue se déplaçant dans la cavité avec une balise émettrice.

À chaque déclenchement d'un signal par le spéléologue, le point où il se trouve va apparaître sur l'écran de l'ordinateur où seront enregistrées ses coordonnées XYZ. Mais ce procédé est limité par la portée des ondes électromagnétiques dans le rocher, très largement inférieure à la profondeur d'un grand gouffre.



Dessin P. Courbon, d'après article Red Bull

Figure 10. Le gouffre le plus profond du monde, jusqu'à quand ? Avant d'atteindre et de plonger le siphon terminal, il a fallu passer un autre siphon intermédiaire.



■ Relevé au scanner 3D

Je renvoie les lecteurs au XYZ n° 157 [10], qui traite du relevé 3D d'une cavité glaciaire de 285 m de profondeur. L'ampleur et la complexité des moyens à mettre en œuvre sont incompatibles avec les difficultés d'une exploration extrême. De plus, il nécessite l'intervention de topographes professionnels rompus à cette technique de pointe. ●

Remerciements

À Eric David, Beat Heeb, Farouk Kadded et Bernard Flacelière qui ont aimablement répondu aux questions que je leur posais.

Contacts

Paul COURBON
paul.courbon@yahoo.fr
www.chroniques-souterraines.fr

Bibliographie

- [1] Benoît CHAMOUX, 1993, *Everest moins 2 mètres, partie scientifique* par MM. BEINAT, MARCHESINI et PORETTI. Ed. Initiative, 127 p.
- [2] Bernard FLACELIERE & alii, 2015, *La mesure du Mont-Blanc*, XYZ n° 145, p. 25 à 36
- [3] Paul COURBON, 1972, *Atlas des grands gouffres du monde*, à compte d'auteur (2 000 exempl.)
- [4] Paul COURBON, 1979, *Atlas des grands gouffres du monde*, éd. Jeanne Laffitte, Marseille.
- [5] Paul COURBON et Claude CHABERT, 1987, *Atlas des grandes cavités mondiales*, à compte d'auteurs (2 000 ex.).
- [6] Paul COURBON, Claude CHABERT, Peter BOSTED, Karen LINDSLEY, 1989, *Great caves of the world*, Ed. Cave books, St-Louis, Mo
- [7] P. COURBON et G. MARBACH, 1972, *Les leviers topographiques et leur précision*, Spelunca spécial n° 2 sur la spéléologie scientifique, revue de la Fédération Française de Spéléologie, pp. 34-37
- [8] Paul COURBON, 1972, *La topographie spéléologique*, Spelunca spécial n° 2 sur la spéléologie scientifique, revue de la Fédération Française de Spéléologie pp. 39-46.
- [9] Jean-Baptiste CAVERNE, (2011) : *U-GPS : un prolongement du système GPS sous terre*. XYZ n° 126, p. 27-36.
- [10] Farouk KADDED, Tommaso SANTAGATA, 2018, *Relevé de la grotte glacée de Cenote Abyss*, XYZ n° 157, p. 57-60

■ Chronologie du gouffre le plus profond du monde

On peut définir la naissance de la spéléologie par les premières approches raisonnées du monde souterrain. Nous avons fait partir notre état en 1748, lorsque sur ordre de l'empereur d'Autriche, le mathématicien Thomas Nagel fut descendu dans le puits d'entrée de Macocha Propast (Tchéquie) et y fit quelques observations et des mesures de température. Il est certain que depuis la préhistoire, bien avant Nagel, certains hommes ont pu descendre bien plus bas. Nous pensons particulièrement à la Chine où dans les gigantesques puits appelés Tiankengs, des chasseurs ont pu aller chercher des nids d'hirondelles dans les parois.

1748	Macocha Propast (Tchécoslovaquie)	138 m
1839	Grotta di Padriciano (Italie)	226 m
06.04.1841	Abisso di Trebiciano (Italie)	329 m
1909	Nidlenloch (Suisse)	376 m
10.08.1923	Geldloch (Autriche)	464 m
1934	Antro di Corchia (Italie)	480 m
05.08.1944	Système de la Dent de Crolles (France)	512 m
07.08.1945	Système de la Dent de Crolles (France)	549 m
04.05.1947	Système de la Dent de Crolles	603 m
14.08.1953	Sima de la Piedra de San Martin (Espagne)	689 m
25.09.1954	Gouffre Berger (France)	903 m
29.07.1955	Gouffre Berger (France)	985 m
11.07.1956	Gouffre Berger (France)	1 122 m
13.08.1963	Gouffre Berger (France)	1 135 m
24.08.1966	Réseau de la Pierre Saint-Martin (France)	1 171 m
10.08.1975	Réseau de la Pierre Saint-Martin (France)	1 273 m
23.08.1975	Réseau de la Pierre Saint-Martin (France)	1 321 m
05.07.1979	Réseau Jean-Bernard (France)	1 358 m
02.03.1980	Réseau Jean Bernard (France)	1 402 m
21.02.1981	Réseau Jean Bernard (France)	1 455 m
15.02.1982	Réseau Jean Bernard (France)	1 494 m
11.11.1983	Réseau Jean Bernard (France)	1 535 m
02.12.1989	Réseau Jean Bernard (France)	1 602 m
26.01.1998	Gouffre Mirola – L. Bouclier (France)	1 610 m
Août 1998	Lamprechtsofen – PL2 (Autriche)	1 632 m
Juin 2001	Kublera - ou Voronja - (Géorgie)	1 710 m
06.01.2003	Gouffre Mirola – L. Bouclier (France)	1 733 m
Juillet 2004	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	1 823 m
19.10.2004	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	2 062 m
Sept. 2006	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	2 158 m
Août 2012	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	2 196 m

Le nivellement de Saint-Germain-en-Laye

■ Alain COULOMB

Avec le nivellement Bourdalouë effectué entre 1857 et 1864, puis le nivellement Lallemant commencé dans les années 1880, la deuxième moitié du 19^e siècle est incontestablement l'époque pionnière du nivellement général de la France. Mais c'est aussi le temps où s'effectuent de très nombreux nivellements municipaux, complémentaires des premiers et souvent liés à des travaux d'adduction d'eau ou d'assainissement (construction ou amélioration d'égouts). J'ai décidé de m'intéresser à celui de Saint-Germain-en-Laye, commune de l'ouest parisien à l'histoire particulièrement riche, parce qu'il a donné lieu à la création de repères en fonte étonnamment esthétiques.

■ MOTS-CLÉS

Nivellement, histoire



Figure 1. Un de ces beaux repères, implanté au pied de l'escalier de liaison entre la rue Thiers et la rampe des Grottes.

Le commanditaire

Le nivellement de Saint-Germain-en-Laye est effectué sous les auspices de Jules Xavier Saguez de Breuvery (1805-1876), nommé maire pour la première fois le 14 novembre 1835, à l'âge de





30 ans¹ et élu conseiller général de Seine-et-Oise sans interruption de 1848 à 1874.

Personnalité peu commune, ce brillant esprit est admis à l'École polytechnique à 17 ans, mais refuse d'y entrer pour conserver sa complète liberté d'action. De fait, il n'exerce jamais d'activité professionnelle. Cette liberté lui est offerte par sa naissance ; ses confortables revenus proviennent d'une famille de la noblesse française originaire de Champagne et convertie au protestantisme au dix-septième siècle. Son père, officier dans la Compagnie des gardes du corps du roi, s'établit à Saint-Germain-en-Laye en 1817.

Jules Xavier Saguez de Breuvery est un homme cultivé et désintéressé. Mais tout l'intéresse : l'archéologie, la géographie, les langues, l'industrie, les travaux publics... C'est un esprit encyclopédique et un grand voyageur, auteur de plusieurs récits de ses expéditions en Orient.

Il est trop indépendant pour adhérer à l'église saint-simonienne. Mais il connaît et partage en partie ses idées novatrices, promotrices du progrès social par le commerce, l'industrie, l'Europe et le libre-échange. Quelques exemples : il soutient de toutes ses forces le projet de chemin de fer entre Paris et Saint-Germain², il encourage et participe au projet du canal de Suez, lié qu'il est d'amitié depuis le collège royal Henri IV avec Ferdinand de Lesseps, il étudie de très près les questions liées à l'alimentation de sa ville en eau potable...

1 Jules Xavier de Breuvery remplit les fonctions de maire pendant environ 19 ans, en 5 périodes : du 14 novembre 1835 à 1837 ; du 27 juin 1837 au 11 juillet 1839 ; du 17 septembre 1855 au 14 février 1856 (par intérim) ; du 14 février 1856 à 1865 ; du 2 septembre 1865 au 15 septembre 1870.

2 La ligne de chemin de fer entre Paris et Saint-Germain-en-Laye est la première ligne ferroviaire de France conçue uniquement pour le transport de voyageurs et exploitée à l'aide de locomotives à vapeur. C'est aussi la première pour laquelle, sous l'impulsion de l'entrepreneur saint-germinoise Émile Péreire, la puissante banque Rothschild, qui jusqu'alors se bornait aux affaires purement financières, vient prêter son appui à l'industrie et aux grands travaux d'utilité publique.

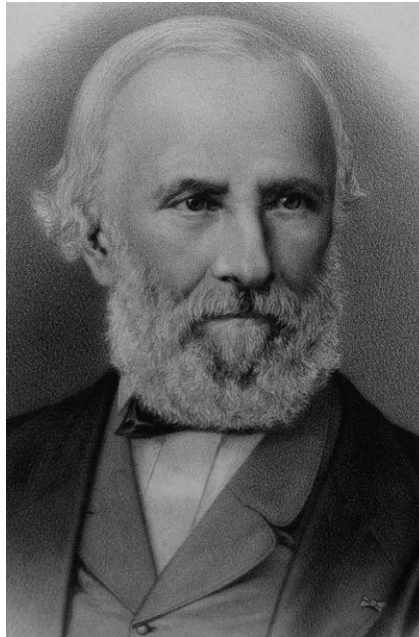


Figure 2. Jules Xavier Saguez de Breuvery a 63 ans en 1865, quand est décidé le nivellement de sa ville.

Le besoin d'eau

Dans sa séance du 17 novembre 1865, le conseil municipal de Saint-Germain-en-Laye adopte à l'unanimité le rapport d'une commission chargée d'examiner la situation financière de la ville et décide en conséquence de mettre en adjudication le plus tôt possible la construction d'un réservoir d'eau et, subsidiairement, d'une canalisation pour l'alimenter.

Lors de la séance du 19 février 1866, un membre du conseil municipal rappelle que le conseil, en approuvant le rapport de cette commission dans sa séance du 17 novembre 1865, a décidé qu'un plan de nivellement de la ville serait dressé. Il émet le vœu que l'exécution de cette mesure soit confiée rapidement à un homme de l'art. Il note que ce n'est qu'après l'achèvement de ce travail qu'on pourra appliquer réellement l'article 3 du décret du 26 mars 1852, rendu applicable à la ville de Saint-Germain par décret du 30 juin 1853³. Le niveau-

3 L'article 3 du décret du 26 mars 1852 relatif aux rues de Paris stipule : "à l'avenir, l'étude de tout plan d'alignement de rue devra nécessairement comprendre le nivellement ; celui-ci sera soumis à toutes les formalités qui régissent l'alignement. Tout constructeur de maisons, avant de se mettre à l'œuvre, devra demander l'alignement et le nivellement de la voie publique au-devant de son terrain et s'y conformer".

ment de la ville est donc certainement lié au besoin en eau potable, mais aussi aux nombreux travaux d'alignement et d'assainissement qui s'effectuent à l'époque dans les rues de Saint-Germain, au percement de nouvelles voies de communication, à l'établissement de nouveaux quartiers...

La question du nivellement est encore à l'ordre du jour des séances du conseil municipal du 17 novembre 1866 et du 18 février 1867. Afin de répondre à un membre qui trouve que les choses avancent trop lentement, *"Monsieur le maire dit que ce travail doit être exécuté par un homme très consciencieux et qu'il ne faut pas faire un choix à la légère"*. Le 2 août suivant, il expose qu'il est maintenant *"en mesure de traiter avec un homme de l'art pour l'opération du nivellement de la ville si souvent réclamée par le conseil"*. Il est alors autorisé à faire exécuter ce travail⁴.

L'opérateur

Le technicien choisi est Vincent Florent Gauthereau, conducteur des Ponts et Chaussées né le 26 octobre 1820 à Tannay (Nièvre). Cet homme de 47 ans habite à Saint-Germain, au n°2 rue de Mantes.

Fils d'aubergistes aisés, il est clerc de notaire du 1^{er} janvier 1838 au 1^{er} octobre 1843. Sa carrière dans l'administration débute en août 1846. Gauthereau est alors nommé conducteur auxiliaire dans le département de Seine-et-Oise, au service de la navigation de la Seine. Il est promu conducteur embrigadé en 1855 et passe dans le département de la Seine en 1859. Le 29 mai 1867, il est attaché à la surveillance des travaux de construction du barrage de Marly. C'est un peu plus tard que débute le nivellement de Saint-Germain-en-Laye. Gauthereau l'exécute en plus de son travail pour l'administration des Ponts et Chaussées, afin de joindre *"les fruits d'une industrie aux produits de sa place"*⁵. Ce genre de cumul est

4 Registres des délibérations du conseil municipal – cote 1D36.

5 Dans *"Les Employés"* Honoré de Balzac raille avec ces mots les innombrables cumulards employés dans les ministères.

très courant ; à tel point que les fiches signalétiques des services du personnel des différents ministères contiennent la question suivante, liée à la régularité dans le service de chaque employé : “se livre-t-il à des occupations étrangères ?”

Durant le mois d'août 1870, Gauthereau est appelé à Paris pour les travaux de défense de la capitale. Dans la manière de gérer cette période de crise, un important différend l'oppose à son ingénieur en chef. Tout en reconnaissant que Gauthereau est actif, intelligent et expérimenté, celui-ci affirme : “il n'avait pas, avant cet événement ma pleine confiance, il ne l'a pas conquise depuis” ; “je désire vivement qu'il cesse de faire partie de mon service”. Ces dures appréciations ne sont sans doute pas étrangères au choix de carrière suivant.

Le 28 juin 1875, Gauthereau est mis, sur sa demande, en congé illimité et autorisé à devenir ingénieur municipal de la ville de Saint-Germain-en-Laye. Il est enfin admis à faire valoir ses droits à la retraite le 1^{er} novembre 1880⁶.

Pour le plaisir de l'anecdote, signalons aussi que Gauthereau présente la particularité d'avoir épousé sa nièce Adèle le 10 février 1861 à Tannay, avec “l'autorisation de la dispense de degré” que lui a accordé Napoléon III le 31 octobre 1860⁷. Adèle Gauthereau, de 18 ans sa cadette, lui donne avant mariage une fille âgée de 11 ans en 1867 et un fils légitime, plus jeune de deux années.

Le cahier des charges et la soumission

Selon le cahier des charges, la longueur des rues à niveler est d'environ 33 kilomètres. Le nombre des repères à placer est de 300.

Un marché est signé avec Gauthereau le 2 novembre 1867. Il est convenu que le travail du nivellement comprendra : 1° l'indication du niveau, sur le terrain, au moyen de la pose de repères

placés les uns par rapport aux autres à une distance moyenne de 100 mètres environ ;

2° un tableau donnant l'emplacement des repères et notamment leur adresse⁸ ;

3° une série de profils de rues ;

4° le report des cotes de hauteur du nivellement sur un plan de ville⁹. Gauthereau prend l'engagement de livrer les résultats avant la fin de l'année 1868¹⁰.

Ce marché est approuvé le 11 décembre 1867 à Versailles par le préfet de Seine-et-Oise¹¹.

Le 17 février 1868, un membre du conseil municipal demande si l'opération est entamée. Monsieur le maire répond “que les travaux préparatoires et de cabinet sont assez avancés pour que le travail puisse commencer prochainement sur le terrain.”

Les repères

En France, les repères appartenant aux nivellements les plus anciens, scellés dans la première moitié du 19^e siècle, sont des plaques en fonte possédant une tablette horizontale à laquelle se

8 S'il a été établi, ce document a peut-être disparu. La mairie ne conserve aujourd'hui qu'un inventaire manuscrit partiel, dressé en 1982 et mis à jour anonymement en 1991.

9 On ne parle pas encore d'altitude. La donnée altimétrique chiffrée est désignée par les termes *hauteur*, *élévation* ou plus souvent *cote*. Le nom *altitude* est absent de la sixième édition du Dictionnaire de l'Académie éditée en 1835, où le mot *alto* succède à l'adjectif *altier*. L'*altitude* apparaît dans la littérature technique à partir du moment où l'on envisage le premier nivellement général de la France.

10 Le nivellement proprement dit est bien effectué en 1868 mais les plans ne sont livrés qu'en 1874. Leur remise est accompagnée d'une lettre où Gauthereau écrit : “je vous prie, Monsieur le maire, de remarquer que toutes les additions faites aux plans dépassent de beaucoup les limites du travail dont je m'étais chargé, et j'ose espérer qu'en les soumettant à l'examen du conseil municipal, vous en obtiendrez l'approbation et qu'il voudra bien approuver l'augmentation de dépense qui en résulte. Elles serviront aussi à expliquer le retard que j'ai mis à produire ce travail que vous ne regretterez pas d'avoir attendu pour l'avoir plus complet.” Registres des délibérations du conseil municipal – cote 1D39.

11 Archives municipales – cote 1O12.



Figure 3. Exemple de plaque-repère à tablette. Celle-ci est scellée à Marseille, au n° 82 rue Blanqui. La tablette est, sur ce modèle, constituée par la face supérieure du repère.

rapporte la cote (figure 3). Chaque nivellement possède son type de plaque, dont les aspects ornementaux sont plus ou moins développés.

Ce type de repères présente deux petits défauts. Tout d'abord, il arrive que la tablette ne soit pas parfaitement horizontale et qu'il existe une différence de hauteur de deux à trois millimètres d'une extrémité à l'autre. Ce système est aussi sujet à un inconvénient encore plus grave : ces repères étant d'une seule pièce où figure la cote, ils ne peuvent être confectionnés qu'après la fin du nivellement. Il se commet alors inévitablement quelques erreurs et imprécisions au moment du scellement.

La forme des repères du nivellement général de la France est, elle, fixée par la circulaire ministérielle du 15 novembre 1858. Ce repère est en fer



Figure 4. Croquis d'un repère de nivellement de type Bourdalouë.

6 Archives nationales – Dossier de carrière – F/14/2532.

7 Les mariages consanguins sont interdits par l'Église et par la Loi. Dans le cas d'une demande de mariage oncle-nièce (ou tante-neveu), la deuxième interdiction peut être levée par l'Empereur.



fondu ; il se compose de deux pièces, dont l'une, qui est le repère proprement dit, est scellée dans la pierre au moyen de ciment romain. Elle offre, à l'extérieur, une surface cylindrique à axe horizontal. La mire doit être posée, dans l'opération de nivellement, sur la partie supérieure de cette surface. Le creux ménagé au centre de cette première pièce est destiné à en recevoir ultérieurement une seconde, sur laquelle l'altitude du repère est inscrite. Le repère Bourdalouë (figure 4) présente deux avantages par rapport aux repères de nivellement précédemment employés :

- la surface de contact de la mire et du repère est mieux définie (on passe d'une tablette supposée horizontale à une ligne tangente, celle que définit le talon de la mire sur le cylindre du repère) ;
- le repère est scellé avant le nivellement et son altitude est rajoutée après les mesures et les calculs.

Le nivellement de Saint-Germain, pourtant postérieur de 10 ans à l'adoption du repère Bourdalouë, ne bénéficie pas de ses améliorations techniques. Ses repères (figure 5) sont de type "plaque avec tablette horizontale", dont les ornements sont conformes à la haute idée que le conseil municipal se fait de l'embellissement de la ville.

Au sommet de chaque repère figure le blason de Saint-Germain-en-Laye, composé d'un berceau semé de fleurs de lys, accompagné en chef d'une fleur



Figure 5. Repère de nivellement scellé au n°32 rue Alexandre Dumas, dans le pilier gauche du portail de la propriété "La Gagnerie". La cote correspond à la tablette qui figure au centre du repère.



Figure 6. Repère "central", scellé dans le mur de façade nord de l'église Saint-Germain, face à la place de la Paroisse.

de lys et, en pointe, d'une date, celle du 5 septembre 1638, jour de naissance de Louis XIV, venu au monde au château de Saint-Germain¹².

Le repère auquel est attribué le n°1 est implanté dans le mur de façade nord de l'église Saint-Germain. Au-dessus de ce repère est gravée l'inscription : "Ville de Saint-Germain-en-Laye - Nivellement". Au-dessous, une autre inscription donne à lire "Repère central à 66 m au-dessus du zéro de l'échelle du pont de la Tournelle. Le zéro de l'échelle du pont de la Tournelle à Paris est à 26,25 m au-dessus du niveau de la mer"¹³.

Les cotes du nivellement de Saint-Germain-en-Laye sont inférieures

12 C'est par une lettre patente du 17 août 1820 que le Roi Louis XVIII accorda ce blason à la ville afin d'honorer son aïeul. Saint-Germain accueillit la demeure des rois de France dès le 10^e siècle.

13 Le pont de la Tournelle, construit au 17^e siècle à l'emplacement d'un ouvrage plus ancien, est situé au sud de l'île Saint-Louis. Le pont, ou plutôt le mur de quai à une vingtaine de mètres en amont du pont, est équipé d'une échelle graduée en pieds. Sa graduation 0 correspond aux basses eaux de 1719. Ce zéro, qui a servi de référence à de nombreux nivellements effectués dans la capitale, était, comme l'indique l'inscription de l'église Saint-Germain, à 26,25 m au-dessus "du niveau moyen de la mer". Cette valeur, calculée en 1842, était la moyenne arithmétique de quatre nombres résultant de trois nivellements trigonométriques (mesures d'angles et de distances) depuis le niveau moyen de la mer à Cancale, Brest et Cherbourg et d'un nivellement direct depuis Le Havre.

aux altitudes normales NGF/IGN69 en vigueur aujourd'hui d'environ 25,88 m¹⁴.

Les repères en fonte galvanisée sont fournis par Léon François, âgé de 42 ans, marié et père de 3 enfants, marchand de fers et fontes domicilié à Saint-Germain, au n°8-10 rue de Mareil. L'inscription dans le mur de l'église Saint-Germain est réalisée par Eugène Gabriel Hubert, entrepreneur de maçonnerie et de monuments funèbres, domicilié au n°2 rue d'Alger, âgé de 56 ans en 1870. A son sujet, le recensement de 1866 précise que cet homme est marié et qu'il est père de 3 fils¹⁵.

14 Cette valeur a été établie grâce aux 5 repères qui figurent dans le tableau suivant. En colonne 1, le matricule actuel du repère ; en colonne 2, le numéro qu'il avait dans le nivellement municipal ; en colonne 3, son altitude normale NGF/IGN69 ; en colonne 4, sa cote au-dessus du zéro de l'échelle du pont de la Tournelle ; en colonne 5, l'écart entre son altitude et sa cote.

Matricule	Numéro	Altitude (m)	Cote (m)	Écart (m)
P.B.K3 - 207	190	81,405	55,531	25,874
P.B.K3L3 - 44	124	87,732	61,843	25,889
P.B.K3 - 253	157	50,103	24,211	25,892
P.B.K3L3 - 39	27	88,890	63,020	25,870
K.B.N3 - 21	127	86,988	61,101	25,887

15 Compte des dépenses de 1869, série L, section II, article 134. Le scellement des repères de nivellement de Saint-Germain-en-Laye ne laisse aucune trace dans les livres de comptes détaillant les dépenses de la ville, consultés jusqu'en 1878. Sans doute est-il dû à Eugène Gabriel Hubert, qui fixe pendant cette période de nombreuses plaques de rue.



Figure 7. L'ancienne couverture de l'atlas qui, malgré les traces laissées par les ans, garde la magnificence du rouge garance ou vermeil de la fine couche en cuir de sa pièce de titre.

Les documents cartographiques

Les documents cartographiques conservés aux archives municipales ne sont pas tout à fait conformes aux alinéas 3 et 4 du marché signé en novembre 1867. Ils consistent en 37 plans au format Grand Aigle (75 x 110 cm), figurés sur papier toilé et de manière à pouvoir être reliés et former un atlas. Ces 37 feuilles sont aujourd'hui indépendantes. Chacune d'entre elle est protégée par une enveloppe plastifiée. Mais un atlas a bel et bien existé : les archives municipales conservent une partie de sa couverture (figure 7).

Les 37 feuilles sont renseignées sur un fond de plans d'alignement dressés par François Alphonse Fauvel, architecte de la ville, né à Saint-Germain le 29 septembre 1824¹⁶. Les plans 1 à 22

¹⁶ Gauthereau ne dessine pas l'intégralité des plans. Il ne fait que rajouter des cotes de hauteurs sur des documents cartographiques établis par Fauvel dans un but d'alignement (voir note 3).

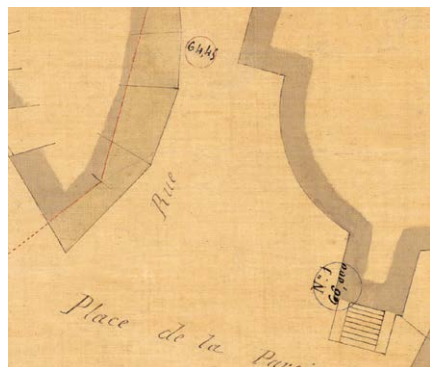


Figure 8. Extrait de la feuille n°4 du plan. Deux cotes y sont lisibles : celle de 66,000 m du repère "central" (cercle bleu) et celle de 64,45 m au milieu de la rue de la Paroisse (cercle rouge). Les contraintes d'alignement sont illustrées par la ligne rouge.

(figure 8), à l'échelle de 2 millimètres pour 1 mètre, indiquent simplement, dans de petits cercles bleus, les numéros des repères en fonte et leur cote, et dans des cercles rouges dont le diamètre est inférieur à celui des précédents, un certain nombre de cotes prises au milieu des chaussées. Les plans 23 à 37 comportent en outre des profils de rues dressés à l'échelle de 1 millimètre pour 1 mètre pour les longueurs et de 1 centimètre pour 1 mètre pour les hauteurs.

Le prix et les paiements

Le 31 mars 1870, la ville délivre à Léon François, pour la fourniture des repères, un mandat dont le montant avoisine les 1 050 francs.

Le 14 mars 1874, elle paye environ 250 francs le travail du Sieur Hubert pour la taille des pierres de l'église Saint-Germain.

La prestation de Gauthereau, évaluée à une somme proche de 4 500 francs, est réglée en trois versements effectués en décembre 1869, octobre 1875 et janvier 1878.

Le prix total payé par la mairie de Saint-Germain-en Laye pour le nivellement de la ville est donc d'environ 5 800 francs.

Afin de faire face à ces dépenses, 500 francs sont prévus au budget de 1866 et 500 francs à celui de 1867. 4 000 francs sont ensuite inscrits au budget en 1868. Sur l'avis d'une commission chargée d'examiner les plans livrés par Gauthereau, un peu plus de 800 francs sont enfin inscrits au chapitre additionnel de 1875. ●

Remerciements

J'ai bénéficié dans mes recherches de l'aide précieuse de Madame Marielle Rigault, responsable des archives municipales de Saint-Germain-en-Laye. Je l'en remercie vivement.

Bibliographie

Le portrait de Saguez de Breuvery a été établi à partir de :

- la *Notice biographique de Monsieur Jules Xavier Saguez de Breuvery* édité par François Jean Baptiste Le Blanc-Hardel en 1879 ;

- le livre de François Boulet *Leçon d'histoire de France, Saint-Germain-en-Laye* Les Presses Franciliennes - 2006

Le nivellement de la ville est notamment brièvement évoqué dans :

- le *Nouveau guide du promeneur à Saint-Germain-en-Laye*, écrit par Paul Guégan de l'Isle en 1879 ;
- la *Notice historique sur le château de Saint-Germain-en-Laye*, établie par l'architecte Étienne Desforges en 1883 ;
- *L'église paroissiale de Saint-Germain-en-Laye*, où le professeur Jean Dulon détaille ce monument construit en 1827 et le repère de nivellement central coté à 66 mètres.

Une photographie de ce repère central figure dans l'article de Gilles Thomas intitulé *Paris : des hauts et des bas*, paru dans le n°105 de la revue XYZ - 4^e trimestre 2005.

Même si cet ouvrage comporte quelques erreurs, notamment en ce qui concerne le nivellement de la ville, citons aussi le livre de Robert Haiat et Jacques Berlie édité en 2007 par les Presses Franciliennes : *Au fil des rues de Saint-Germain-en-Laye*.

Contact

Alain COULOMB

Institut national de l'information géographique et forestière, Service de géodésie et de nivellement, chef du département des réseaux matérialisés alain.coulomb@ign.fr

ABSTRACT

With both the Bourdalouë leveling carried out between 1857 and 1864 and the Lallemant leveling started during the 1880's, the second half of the 19th century is undoubtedly the pioneering era of main leveling of France. But it is also the time when there were many municipal leveling surveys, complementary to the first ones and often related to water supply works or sanitation operations (construction or improvement of sewers). This paper highlights the levelling operations of Saint-Germain-en-Laye, located west of Paris, with a particularly rich history that gave rise to the creation of amazingly aesthetic cast iron markers.

Freddy Mamani : le sommet des couleurs

■ Jean-Pierre MAILLARD

La Bolivie, pays d'Amérique du Sud grand comme deux fois la France, est peuplée de dix millions d'habitants. Sa population est composée de 55 % d'Amérindiens, dont une majorité de Quechuas et d'Aymaras - ce dernier groupe ethnique représentant le quart de la population d'origine -, de 30 % de métis et de 15 % de blancs issus majoritairement des colonisateurs espagnols. Située dans les Andes, à plus de 3500 m d'altitude sur le plateau de l'Altiplano, la capitale administrative, La Paz, est la plus élevée au monde. Son développement démographique a conduit à la création, à l'ouest et plus haut (4150 m) d'une ville nouvelle, El Alto. Cette ville est aujourd'hui surtout caractérisée par la présence d'une soixantaine de constructions aux façades inattendues et aux couleurs exubérantes initiées par un seul créateur, Freddy Mamani qui, à sa façon, affirme son identité aymara.

L'architecture "néo-andine"

Le développement de l'urbanisation le long de l'aéroport de La Paz est récent. La ville d'El Alto donne à voir un paysage urbain de maisons en briques aux couleurs de la terre du vaste plateau de l'Altiplano, un ensemble uniforme et plutôt horizontal à l'image de l'environnement quasi désertique. Pendant de nombreuses décennies El Alto était à l'origine une banlieue pauvre de la capitale sans attrait. Son développement procède de l'arrivée de nombreux Aymaras des campagnes à la recherche de meilleures conditions d'existence lié au boom économique et l'arrivée au pouvoir en 2006 du premier président amérindien Evo Morales, lui-même d'origine aymara. Ces circonstances ont permis l'augmentation du niveau de vie des habitants, celle des Aymaras en particulier, très actifs dans le commerce, jusqu'à faire d'El Alto un centre de la renaissance de la culture autochtone bolivienne. Dans ce contexte, comme d'autres, Freddy Mamani s'emploie à El Alto, selon ses mots, désormais à "retrouver identité et culture millénaires, lesquelles étaient quasiment dans l'abîme de la disparition". Il précise "nous avons aujourd'hui toute la liberté de nous montrer tels que nous sommes, aussi à travers une architecture qui nous identifie."

Avec ses constructions Freddy Mamani déploie dans la ville des couleurs chatoyantes et des motifs géométriques qui égaient les façades des rues jusqu'aux intérieurs. Il explique son exubérance à la limite du kitsch et son style très personnel par l'influence de la culture traditionnelle qui motive sa passion pour les couleurs, celle des tissus andins, et pour la géométrie "de l'esprit des ruines de Tiahuanaco, un site archéologique situé sur la rive du lac Titicaca", dit l'architecte.

Dans une réflexion intégrant la question sociale, les réalisations de Freddy



©Mattia Polisena

Un cholet à El Alto



Mamani sont intérieurement conçues pour répondre à plusieurs usages. Au rez-de-chaussée à dominante commerciale, il projette des boutiques, salles de sport et restaurants. Les premier et deuxième étages, dédiés à la fête, au folklore et à la culture, reçoivent les banquets, les événements familiaux et autres fêtes locales qui peuvent rassembler des centaines de personnes. Les étages suivants sont affectés aux logements et le dernier, le "cholet" est réservé au propriétaire.

L'originalité de l'architecture a pu faire sourire, voire être dénigrée. Elle est pourtant remarquable dans tous les sens du terme, aussi présente à El Alto que les œuvres de Gaudi peuvent l'être à Barcelone ou encore celles d'art nouveau à Bruxelles ou Nancy. Déjà Freddy Mamani fait école.

Les cholets

Sur un plan économique les cholets sont conçus comme "autodurables" puisqu'une partie des niveaux d'un immeuble produit un revenu nécessaire à la gestion de l'immeuble. Le cholet souligne le statut et la réussite de son propriétaire.

Sur le plan constructif, si l'ossature d'un bâtiment est bien projetée, sur mesures, avant le chantier, la façade et la décoration intérieure sont réalisées *in situ* directement avec les ouvriers. La palette des couleurs s'inspire grandement de l'aguayos, le tissu artisanal des occupants de l'Altiplano, chaque région possédant sa propre spécificité. Les grands carrés d'étoffe ont une symbolique culturelle pour chaque population, ce qui explique les différences de couleur et de motifs entre chaque territoire. Les formes utilisées symbolisent les dieux : le Soleil, le serpent, le condor ou la Lune, le Panthéon des Incas disparu.

La novation architecturale est considérable. La façade qui s'offre à la vue n'est plus perçue comme celle d'un immeuble mais plutôt comme une œuvre d'art à part entière, un tableau démesuré qui accroche l'œil et suscite l'imagination. Chacun peut lui laisser libre cours et, selon son impression, penser à un masque de carnaval ou un dieu andin,



©Mattia Polisena

La salle de bal

être attiré par l'analyse de la symétrie du lieu et de ses anomalies, être fasciné par une composition des couleurs aux oppositions étonnantes. En gommant grandement la vue des ouvertures en façade Freddy Mamani s'affranchit de l'académisme pour faire de chaque construction une fête qui aiguise la curiosité de connaître ce qui est caché. On apprend vite que, dans la même veine, les intérieurs sont tout autant époustouffants de couleurs et de formes.

"Géométries Sud du Mexique à la Terre de feu" à la fondation Cartier pour l'art contemporain

A Paris, du 14 octobre 2018 au 24 février 2019, la fondation Cartier a présenté une exposition de près de 220 œuvres de 70 artistes explorant la richesse de la géométrie dans l'art latino-américain. Les peintures, textiles, sculptures, céramiques, dessins et photographies présentés ont souligné sa présence aussi bien dans l'art précolombien, les cultures amérindiennes, les avant-gardes modernes, que dans l'art contemporain. L'intervention de Freddy Mamani sur des murs du boulevard Raspail et dans un espace de la fondation transformé en salle de bal andine, la première hors de Bolivie, a parfait la démonstration de la force des "Géométries Sud".

En regard de cette mise en valeur, l'installation monumentale des architectes paraguayens Solano Benitez et Gloria Cabral faite de modules triangulaires en brique procède également des matériaux et du savoir-faire propres aux cultures populaires amérindiennes. Elle se présente comme un claustra démesuré, une œuvre dont la démarche créatrice est précisée par Gloria Cabral : "Nous pensons que la géométrie est

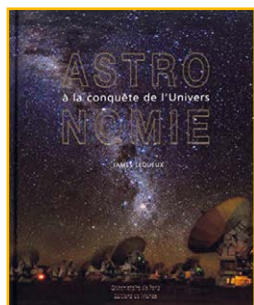
comme un rythme : elle marque les cadences, elle réside dans les petites différences, dans une légère arythmie, etc. C'est ce qui la rend si particulière. Les triangles que nous construisons pour la fondation Cartier ont tous les mêmes dimensions mais chacun est singulier, unique, en raison de la texture de la brique lavée et de ses brisures. L'ordre latino-américain repose sur le même principe : il n'est jamais parfait, il relève des nuances d'arythmie." La géométrie est ainsi présentée sous un angle inattendu.

L'exposition a été ponctuée par la 6^e Nuit de l'incertitude animée par le mathématicien Cédric Villani avec la participation de l'écrivain argentin-canadien Alberto Manguel justement dans l'ambiance colorée et géométrique de la salle de bal de Freddy Mamani. Les intervenants ont échangé sur les aspects théoriques et littéraires de la géométrie jusqu'à conclure que les mathématiques sont la poésie des sciences.

Freddy Mamani

Né en 1971 dans une montagne bolivienne de l'Altiplano Freddy Mamani, enfant, trouve intérêt à la construction en accompagnant son père maçon sur les chantiers. Cette inclination l'a incité à choisir une formation de génie civil dont il sort diplômé. Par suite il devient architecte autodidacte. Depuis une dizaine d'années Freddy Mamani a déjà construit une centaine d'immeubles en Bolivie, dont une soixantaine à El Alto. Le dénigrement dont il a pu faire l'objet provient certainement de son absence d'études aux Beaux-arts. Le Corbusier et Frank Lloyd Wright, eux aussi, n'étaient pas diplômés. Comme pour eux, seule l'œuvre compte, celle d'un architecte porteur d'une émotion et d'une passion qu'il souhaite faire partager à tout un peuple, l'appelant à saisir le meilleur de son identité millénaire.

L'heureuse exposition de la fondation Cartier à Paris a fait mieux connaître le travail de Freddy Mamani et reconnaître, assurément, son talent au moment où son architecture se manifeste également hors des limites de la Bolivie, sans nul doute une valeur ajoutée à son *curriculum vitae*. ●



■ Astronomie, à la Conquête de l'Univers

James Lequeux

L'ouvrage *Astronomie, à la Conquête de l'Univers*, retrace l'histoire d'une discipline qui, à travers toutes les civilisations, a longtemps oscillé entre astrologie et astronomie.

Pour la première fois, un même livre traite de façon très complète de l'histoire de l'astronomie, des objets observés, des méthodes d'observation.

L'œuvre est divisée en treize thèmes traités indépendamment, permettant une meilleure compréhension des sujets traités : repérer les étoiles, mesurer les étoiles, repérer les planètes, mesurer le temps, mesurer la terre, comprendre le soleil et les étoiles, comprendre les planètes et leurs satellites, comprendre les comètes et les astéroïdes, des milliards de planètes, comprendre la Voie lactée, comprendre les galaxies, comprendre l'univers, les observatoires astronomiques.

Si l'astronomie passionne le public, on ne lui en présente souvent que des aspects fragmentaires. Cet ouvrage répond à sa demande en couvrant toute cette science, avec ses développements de l'Antiquité à aujourd'hui : aucun autre ne l'englobe de façon aussi complète et aussi simple. Il insiste sur les prodigieuses avancées de l'astronomie depuis un demi-siècle, où on est allé de surprise en surprise. L'Univers est maintenant accessible aux grands instruments au sol et dans l'espace, qui dévoilent tour à tour ses secrets.

L'Observatoire de Paris, le plus grand pôle national de recherche en astronomie, a parrainé cette démarche originale et mis à disposition sa très abondante documentation. Cet ouvrage passionnant s'appuie sur une mise en page de grande qualité, une iconographie abondante qui illustre la période ancienne et les temps présents, grâce aux images les plus récentes envoyées de l'espace. Il s'accompagne aussi de nombreux schémas, de dessins, d'appendices, d'un glossaire et d'une bibliographie.

James Lequeux, ancien élève de l'ENS, est astronome honoraire. Il a dirigé la station de radioastronomie de Nançay, l'observatoire de Marseille, poursuivi sa carrière à l'Observatoire de Paris-Meudon, et a participé à l'aventure du satellite européen ISO. Il est l'auteur de nombreux ouvrages, dont des biographies scientifiques.

► Éditions de Monza

L'Observatoire de Paris PSL

69 € - 455 pages en couleur et

500 illustrations - ISBN : 978-2-916231-50-1



■ Demain, tous Estoniens ?

L'Estonie, une réponse aux GAFA

Violaine CHAMPETIER DE RIBES

et Jean SPIRI

Connaissez-vous le nouveau paradigme administratif ? Un pays où l'administration n'a pas le droit de demander deux fois dans une vie la même information à ses citoyens, où toutes les démarches se font en ligne avec une carte d'identification unique, ou en quelques minutes du fond de son canapé et de partout dans le monde, on vote, souscrit un emprunt, crée une entreprise ? Ce pays c'est l'Estonie. Et ce que l'Estonie invente depuis vingt-cinq ans c'est un modèle d'État nation à l'ère numérique nourri par un écosystème de *start-up*, boosté par ses quatre licornes (*start-up* valorisées à plus d'un milliard de dollars) et par son incroyable appétit pour le futur. Avec cet État plate-forme transnational, l'Europe aurait-elle trouvé un modèle pour contrer le glissement de souveraineté des États vers les GAFA (Google, Apple, Facebook, Amazon) ?

Violaine Champetier de Ribes a fondé

l'agence de stratégie d'influence

Le Meunier Qui Dort. E-résidente, elle a créé

DigeeTrips.com, une entreprise estonienne.

Elle organise des learning expeditions sur mesure destinées aux décideurs(euses) européens(nes) afin de leur faire découvrir l'Estonie.

Jean Spiri est responsable

du développement stratégique de Onepoint,

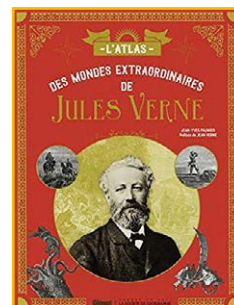
groupe spécialisé dans la transformation

numérique, normalien et géographe,

spécialisé dans l'intégration européenne.

► Éditions cent mille MILLIARD

20 € - 233 pages - ISBN : 979-10-97455-74-3



■ L'atlas des mondes extraordinaires de Jules Verne

À la découverte des mondes

connus et inconnus

Jean-Yves PAUMIER

Jules Verne géographe ? Oui, bien sûr l'était-il également, ce voyageur extraordinaire qui s'était donné pour tâche de peindre la Terre entière comme un roman. Il était naturel qu'un ouvrage rendit hommage à cette géographie universelle et vivante. Parcourir les mondes connus et inconnus sur les pas et dans les pages de Jules Verne procure toujours la même sensation d'aventure et d'insolite.

Jean-Yves Paumier nous invite ainsi à parcourir le monde vu par Jules Verne, ses continents et ses pays, ses pôles mythiques et même ses lieux imaginaires. Tel un manuel de géographie ou un guide de voyage, l'œuvre de Jules Verne est aussi exemplaire dans ces domaines. C'est à la fois une référence, qui a édifié bien des générations, et l'anticipation d'un nouveau genre littéraire.

Textes et images des éditions Hetzel, documents et objets familiers de Jules Verne, cartes des itinéraires de ses héros, photographies de ses contemporains, voyageurs et explorateurs, provenant des fonds de la Société de géographie. Autant d'approches de cette vision d'un grand écrivain que la géographie transforma en citoyen du monde.

Jean-Yves Paumier a une formation scientifique à l'École polytechnique et une attirance vers la littérature.

D'une fascination pour les cartes sont nés le goût de la géographie et un métier dans l'aménagement du territoire, ainsi qu'un engagement pionnier dans une discipline naissante, la prospective spatiale.

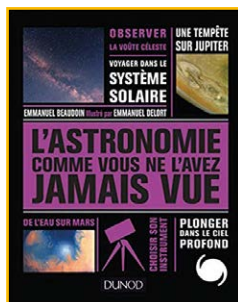
En 2002, il est devenu le chancelier de l'Académie de Bretagne et des Pays de la Loire.

► Glénat Livres - Collections La Société

de géographie - La Société des explorateurs

35 € - 216 pages

ISBN : 978-2-344-03209-1



■ L'astronomie comme vous ne l'avez jamais vue

Emmanuel BEAUDOIN

Illustré par Emmanuel DELORT

Ce guide d'astronomie présente sous une forme visuelle et synthétique tout ce qu'il faut savoir pour choisir son instrument et réussir ses premières observations. Chaque thème est traité en double page, du réglage de son télescope ou sa lunette aux objets vers lesquels pointer son instrument. L'accent est mis sur l'insolite : observer les tempêtes à la surface de Saturne, la danse des satellites galiléens, ou la collision de deux galaxies. Des activités, des conseils pour photographier et des petits quiz sont proposés. Enseignant-chercheur à l'université Paris Sud, Emmanuel Beaudoin observe et photographie le ciel depuis plus de trente ans et est auteur de plusieurs ouvrages de vulgarisation sur l'astronomie. Astronome amateur passionné, Emmanuel Delort est graphiste et illustrateur. Il a collaboré pendant de nombreuses années à la revue Ciel & Espace.

► **DUNOD**

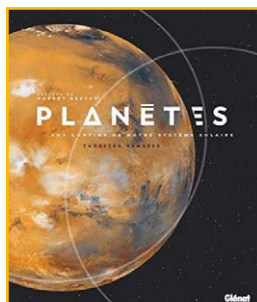
19,90 € - 192 pages - ISBN : 9782100769988

■ Planètes, aux confins de notre système solaire

Thorsten Dambeck

Préface d'Hubert Reeves

Huit planètes gravitent autour de notre soleil et chacune d'elle est en soi un monde fascinant. De Mercure à Pluton, des comètes aux planètes mineures, ce beau livre dresse un portrait complet et détaillé de chacun de ces astres, en s'appuyant sur les toutes dernières découvertes astronomiques et les derniers résultats de la recherche. Il présente plus de 300 superbes images de notre système solaire, dont les prises de vues éblouissantes de la comète Tchouri et de la mystérieuse Pluton, grâce aux sondes spatiales modernes qui nous livrent des images d'une qualité et d'une beauté inédites. Une lune magistrale, en suspension dans les anneaux de Saturne,

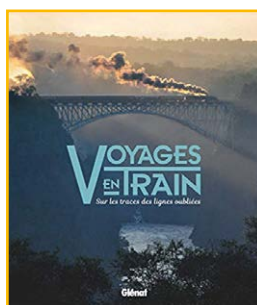


l'atmosphère turbulente de Jupiter dans une somptueuse palette de teintes pastel, les formations rocheuses de Mars d'une précision incomparable, laissez-vous emporter par la beauté et les mystères de ces astres si lointains et pourtant nos plus proches voisins.

Thorsten Dambeck, physicien, est également journaliste scientifique pour de nombreux magazines. Il est spécialiste des corps célestes de notre système solaire.

► **GLÉNAT LIVRES - 35 € - 192 PAGES**

ISBN : 978-2-344-03152-0



■ Voyages en train Sur les traces des lignes oubliées

Anthony LAMBERT

Partez sur les traces des voies de chemins de fer abandonnées à travers le monde entier

Des grandes gares aux allures de cathédrale de l'époque de la vapeur aux lignes surprenantes construites à travers des paysages spectaculaires pour désenclaver certaines régions, ce livre est un hommage aux lignes de chemins de fer qui ne peuvent plus être parcourues, et la célébration d'un héritage ferroviaire oublié. Tout autour de la planète, l'ouvrage retrace ces voyages en train du temps passé, embarquant le lecteur dans ce monde perdu des voitures-restaurants, wagons-lits, porteurs de gare, et voyages internationaux. Regroupés par continents, tous ces itinéraires ferrés racontent des histoires étonnantes et nostalgiques parfois. Richement illustré par des cartes postales et affiches d'époque, ainsi que des photographies tirées de collections et d'archives du monde entier, ce livre invite à un vrai voyage dans le temps.

Anthony Lambert a publié plusieurs livres sur les chemins de fer et les voyages et écrit pour des journaux et magazines. Il a voyagé sur les chemins de fer de plus de 50 pays.

► **Glénat Livres**

35 € - 208 pages

ISBN : 978-2-344-03156-8



■ L'avion qui vole avec le soleil

L'extraordinaire tour du monde de Solar impulse

Michèle Piccard

Solar Impulse, c'est l'histoire d'un défi qui semblait longtemps impossible à relever : le premier tour du monde sans carburant avec un avion solaire. Initiée par le psychiatre et explorateur Bertrand Piccard, cette incroyable aventure est un message d'espoir pour les futures générations. Michèle Piccard, comme membre de l'équipe, nous fait découvrir de manière inédite et de l'intérieur, les coulisses de cette fascinante épopée, le suspense des 40 000 km à survoler grâce à la seule énergie du soleil et nous amène à mesurer la taille de l'exploit. Au travers de photos, de cartes, le lecteur découvre des notions d'écologie, de géographie, de technologies modernes, mais aussi la synergie du travail en équipe et la persévérance pour arriver au bout du challenge. La fondation Solar Impulse : dans la lignée des 3 générations Piccard, vivier de scientifiques et d'explorateurs, la fondation Solar Impulse veut démontrer qu'un monde plus respectueux de l'environnement est possible grâce aux technologies propres.

► **Éditions LAROUSSE**

14,95 € - 92 pages

ISBN : 978-2-03-594660-7

RÉPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 158	
COVADIS GEOMEDIA	4° de couv.
SPECTRA	2° de couv.
Forum de l'AFT	3° de couv.
LEICA GEOSYSTEMS	2
REIS STOLZEL	11

Chicoco Maps Our Cities¹

■ Une interview d'Anne GIRARDIN, CADASTA FOUNDATION

480 000 personnes vivent sur les bords de l'eau à Port-Harcourt et font face à la menace de démolition par le gouvernement du Rivers State. Expulsions forcées et démolitions menées en 2009 par les forces de sécurité ont entraîné déplacements et décès de membres des communautés. Aucun plan n'existe pour indemniser ou réinstaller les résidents des quartiers informels et la démolition en masse de ces quartiers est irréalisable. Comment passer des expulsions à un développement basé sur des partenariats ?

La rédaction de XYZ : Anne, tu arrives du Nigeria après une insolite et intéressante mission, de quoi s'agissait-il ?

Anne Girardin : C'était une mission de la Fondation Cadasta³, pour une ONG locale CMAP ou Community Mapping, mais plutôt connue maintenant comme Chicoco Maps.

XYZ : Mais que signifie donc chicoco, est-ce un nom local ?

Anne : Oui, chicoco, c'est la boue des marigots et de la mangrove, maintenant enrichie des monceaux de débris, déchets plastiques, résidus industriels issus de cette ville de plus d'un million d'habitants. Les communautés, dont les pêcheurs, vivant au bord de la Bonny River construisent sur le chicoco, en le tassant et en coulant dessus une dalle en béton.

XYZ : Problème de salubrité mais aussi foncier je suppose. Et que font les autorités ?

Anne : Rien pour anticiper la situation, mais si elles veulent récupérer les terres occupées, elles lancent des opérations d'expulsion des occupants et de destruction de ces quartiers. C'est ce qui est arrivé à plusieurs reprises déjà.

XYZ : Et que s'est-il passé depuis ?

Anne : Michael Uwemedimo, un Anglo-Nigérian, témoin des exactions de 2009 et soutenu par Amnesty International, a décidé de témoigner et a filmé les scènes de destruction. C'est le début de Chicoco Cinema qui a propulsé au sein de la communauté l'activisme militant grâce aux prises de vues et à leurs diffu-

sions. La suite a été Chicoco Studios où les jeunes ont créé dans la même veine des groupes de musique, la musique est si importante en Afrique, et enfin Chicoco Radio une chaîne pour porter la voix des membres de la communauté et soutenir leurs revendications.

XYZ : Nous sommes encore loin de la cartographie !

Anne : On y arrive ; il y a deux ans grâce à des fonds de la Banque mondiale, Chicoco Maps Our Cities a débuté sur les trois quartiers de Darick, Amatori et Ibiapu avec une petite cartographie sur fond d'images satellitaires. J'ai rencontré Michael à LANDac, la Conférence internationale sur la gouvernance foncière pour un développement équitable et durable à Utrecht et je lui ai parlé des actions de la Cadasta Foundation dans les domaines de l'acquisition et gestion de données foncières et ses outils Web et mobiles conçus pour aider les utilisateurs à collecter, gérer et stocker des données de droits foncières. C'est ce qui a entraîné notre collaboration.

XYZ : Donc vous êtes maintenant dans la phase Chicoco Maps, comment cela se passe-t-il ?

Anne : Plusieurs communicants, acteurs, artistes des Chicoco Cinema, Studios, Radio sont devenus des mappers, des cartographes. Travaillant auparavant sur KoBoToolbox, sur leur téléphone portable et sur les impressions des images satellites, ils se mettent maintenant sur les outils Cadasta entièrement numériques et en parallèle apprécient



© CMAP

l'apport des récepteurs GNSS (de poche) par comparaison au téléphone portable.

XYZ : Et les étapes à venir ?

Anne : Il est prévu d'inventorier l'important, l'aspect des sensations des habitants à leurs droits foncières, sont-ils propriétaires, locataires, squatters, expulsables, ce qui nous entraîne vers le prochain Chicoco Advocates Our Rights (Chicoco défend nos droits) en cours de mise en place.

XYZ : Et pour toi, quel a été le fait marquant majeur de cette mission ?

Anne : Tu connais Emem Isang qui a écrit avec moi dans XYZ⁴ ? Elle est maintenant Surveyor General (directrice de la géomatique et du cadastre) de l'état voisin d'Akwa Ibom. Avec son homologue du Rivers State, ils ont été sensibilisés à Chicoco et appris que les jeunes mappers artistes et musiciens n'étaient pas les brigands délinquants que les autorités dénoncent faute de les connaître.

XYZ : C'est la cerise sur le gâteau de cette mission ! ●

1 Chicoco cartographie nos villes

2 <https://cargocollective.com/jeffforbes/The-Human-City-Project-Nigeria>

3 XYZ155, Cartographie pour la réflexion sur un périmètre à irriguer dans le Sud Kivu, Girardin, A. & Pichel, F.

4 XYZ 151, Les femmes, la terre et le foncier ; un assemblage qui prend forme au Nigeria, Girardin, A. & Isang, E.



FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2019



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



le 15^e Forum de la topographie

le jeudi 28 mars 2019 - 29 rue des Jardiniers 54000 Nancy

L'immersion numérique en topographie

PROGRAMME

9h00-9h30	Ouverture du Forum et café de bienvenue	13h00-14h00	Pause repas
9h30-9h45	Accueil des participants par M. Olivier PALLEZ, proviseur du lycée Loritz et Françoise DUQUENNE, présidente de l'AFT	14h00-15h15	Café sur les stands
9h45-10h15	"Virtualiser le réel, une aventure industrielle", Jean-François HULLO (EDF Energy)	15h15-15h30	La parole est aux exposants
10h15-10h45	"Cartographie des installations souterraines par l'utilisation de réalité augmentée", Pr Dimitri KONSTANTAS (université de Genève) et Youri ROBERT (CERN)	15h30-16h00	"Numérisation, restitution et visualisation en 3D de sites patrimoniaux", Jonathan CHEMLA (ICONEM)
10h45-11h30	La parole est aux exposants	16h00-16h30	"Comment s'immerger dans la réalité ?", Farouk KADDED (Leica Geosystems)
11h30-13h00	Visite des stands	16h30-17h00	Remise du prix de l'AFT à Marion HINAUX et à Valentin GIRARDET et leurs exposés
		17h00	Cocktail

RÉSERVEZ MAINTENANT VOTRE JOURNÉE EN VOUS INSCRIVANT EN LIGNE PAR INTERNET
<https://www.billetweb.fr/forum-aft>



Association française de topographie

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

Participants : forum@aftopo.org – Exposants : communication@aftopo.org



BIM

Infrastructure c'est nous !

Groupe GEODESIAL

Logiciels métiers d'étude et de conception
Géomatique - Urbanisme - Infrastructure - BIM

COVADIS

AUTOPISTE 17

Nouveautés

Voirie et Réseaux Divers

Nouveau module réseau d'assainissement en 3D dynamique
Bibliothèque d'objets en 3D : regard, déversoir, branchement ...
Nouveaux objets 3D trottoir : bordure, caniveau et bateau
Nouvelle coupe dynamique sur nuage de points
Nouveau module projet linéaire



Technologie BIM

Évolution de la technologie objet pour le BIM
Inter-portabilité des données avec Import/Export IFC et IMX
Échange avec le logiciel Revit (Autodesk)
Création d'une maquette paysagère avec InfraWorks (Autodesk)



Topographie & DAO

Le PCRS V2 nouvelle version : évolution de la norme
Création et gestion des états parcellaires avec import SPDC
Nouvel objet parcelle paramétrable
Nouvelle fonction de dessin automatisé sur nuage de points



Projet linéaire AutoPISTE

Nouveaux Giratoires circulaires et de formes complexes
Nouveau module bretelle/échangeur
Épure de giration dynamique



GEOMEDIA SAS

Tel 02 98 46 38 39
contact@geo-media.com
www.geo-media.com