



Automatisation
du traitement de données
"Mobile Mapping"
page 37

**Le 15^e Forum
de la topographie
au lycée Loritz
à Nancy**
page 22



GEODATA
DAYS 2019

2 & 3 JUILLET 2019

LES JOURNÉES NATIONALES
GÉONUMÉRIQUES
de L'AFIGÉO & DÉCRYPTAGÉO

ARTOIS EXPO - ARRAS - HAUTS-DE-FRANCE

www.geodatadays.fr

SOMMAIRE

Directeur des publications

Tania Landes
Maître de conférences
INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière

Rédacteur en chef adjoint

Flavien Viguier
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

IMPRIMERIE DECOMBAT

5 bis rue Gustave Eiffel
BP 90449 - 15004 Aurillac Cedex
Tél. 04 71 63 44 60
Fax 04 71 64 09 09



Dépôt légal

2^e trimestre 2019 ISSN 0290-9057

Tirage de ce numéro : 1 600 ex

Abonnement annuel

France : 90 €

Étranger (dont CEE) : 93 €

Les règlements payés par chèques payables sur une banque située hors de France doivent être majorés de 10 €, sauf à utiliser l'identifiant international de compte IBAN

FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048

Le numéro : 25 €

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

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

Tous droits de reproduction ou d'adaptation strictement réservés.

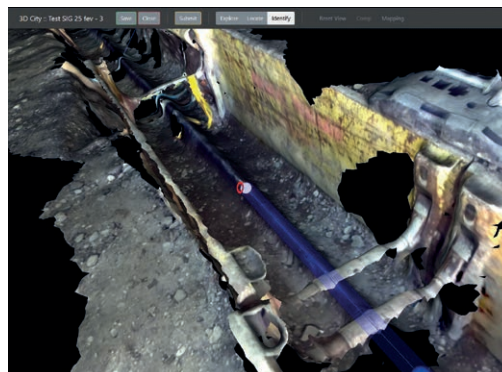
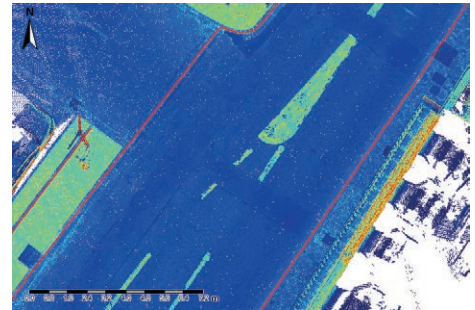
Couverture : Henri Loritz, fondateur de l'école en 1844 et les élèves du lycée. © B. Flacelière

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

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

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

Éditorial	3
InfoTopo	
> Les informations de la profession	4
Manifestation	
> Aimé Laussedat (1819-1907) 30 avril 2019 - Journée du bicentenaire <i>Jean-Pierre MAILLARD</i>	8
> Analyse de performances et calibration de systèmes LiDAR mobiles 26 et 27 mars 2019 à Lyon <i>Thomas TOUZÉ - Emmanuel CLÉDAT Nicolas SEUBE</i>	10
> La semaine professionnelle de la FIG à Hanoï L'information géospatiale pour une vie plus intelligente et une résilience environnementale <i>Françoise DUQUENNE - Bernard FLACELIÈRE</i>	12
> Commercial UAV expo Europe La foire du drone, commerciale et technique <i>Flavien VIGUIER</i>	14
> Business Game de l'OGÉ : une première édition très réussie ! <i>Tania LANDES</i>	16
> Le monde en sphères, une très belle exposition à la Bibliothèque nationale de France <i>James LEQUEUX</i>	18
> Journées de la Topographie 2019 : l'intelligence artificielle et la topographie	20
> Les journées REFMAR 2019 - Réseaux de référence des observations marégraphiques <i>Bernard FLACELIÈRE</i>	21
> Le 15 ^e Forum de la topographie Le 28 mars 2019 au lycée Loritz à Nancy <i>Jean-Pierre MAILLARD - Bernard FLACELIÈRE</i>	22
Vie des écoles	
> Les 4 ^e années de l'INSA de Strasbourg en voyage d'étude en Croatie <i>Aneesha CUNTHEN - Victor MARTIN Sabrine AMZIL</i>	31
Réglementation	
> Quand la légistique rattrape le train de la géodésie... <i>Gilles CANAUD</i>	33
Cartographie	
> Automatisation du traitement de données "Mobile Mapping" : extraction d'éléments linéaires et ponctuels <i>Loïc ELSHOLZ</i>	37
GNSS	
> Du NRTK vers le PPP-RTK, un exemple avec TERIA <i>Paul CHAMBON</i>	44
Géodésie	
> Ajustement global d'un réseau géodésique classique étendu. Application à un réseau test du réseau primordial Algérie <i>Bachir GOURINE</i>	50
> GEODESEA : une expérience de positionnement géodésique en fond de mer <i>Pierre SAKIC - Jean-Yves ROYER - Valérie BALLU Helen PIÉTÉ - Étienne POIRIER Mickael BEAUVERGER</i>	56
Art et géométrie	
> Op Art, Land Art, et topographie <i>Laurent REYNÈS</i>	63
Ouvrages	
<i>André BAILLY</i>	70



> 3DCity - Cartographie spatiale et outils
holographiques pour l'acquisition des données 3D
et visualisation des réseaux enterrés
*Vedran VLAJKI - Mathieu TAPPOLET - Youri ROBERT
Rodolphe FAHRNI - Dimitri KONSTANTAS*

37

44

50

56

63

70

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la p. 72

PROCHAIN XYZ - n° 160
Numéro spécial, les 40 ans de l'AFT et de XYZ.



Leica Viva TS16

Station totale qui s'adapte à
votre chantier et dédiée aux
applications de topographie.
#LeicaTS16

Be **Captivated**



Plus d'informations sur : leica-geosystems.fr

Leica Geosystems SAS
www.leica-geosystems.fr



- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

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



Notre-Dame et le virtuel

La rédaction d'XYZ partage l'émotion suscitée par la disparition en l'espace de quelques heures de la silhouette historique de la cathédrale Notre-Dame pendant l'incendie du 15 avril. Dans les jours qui ont suivi, on a vu sur les réseaux sociaux que de nombreux acteurs disposaient de nuages de points ou d'images d'archives de cet ensemble patrimonial. Dès le 20 avril, Notre-Dame a fait l'objet de relevés par drones et par lasergrammétrie pour établir un diagnostic des dégâts (*voir page 6*). Les débats sur les options de reconstruction n'ont pas attendu, et les données 3D archivées par les ingénieurs et les architectes seront précieuses pour les porteurs des futurs projets. Nous suivrons de près le projet "Open Notre-Dame" lancé le 17 mai par Microsoft et Iconem (*voir page 7*). Ces deux entreprises promettent une mise à disposition des données visuelles en *open source*, destinée à mieux comprendre et analyser l'édifice dans son histoire. Cette initiative (qu'il faut saluer, NDLR), doit contribuer *"non seulement à rassembler et analyser un maximum de documents existants sur le monument mais également à produire des modèles 3D à travers les époques pour les mettre à disposition de tous"*.

Ces dernières semaines ont confirmé (même si la notion d'archives en photogrammétrie est établie depuis 150 ans) que les technologies de numérisation 3D développées au cours de la dernière décennie occupaient une place essentielle dans la documentation du patrimoine culturel. Ce n'était pas un hasard si le 15^e forum de la topographie qui s'est tenu le jeudi 28 mars au lycée Henri Loritz de Nancy autour de l'immersion numérique a montré que la topographie du futur était fortement liée aux évolutions technologiques du virtuel. Les outils de réalité virtuelle constituent pour notre profession des moyens extraordinaires pour communiquer sur la qualité des données 3D produites par nos scanners et nos systèmes de photogrammétrie. Les technologies du virtuel ne manqueront pas de nous aider dans un futur proche à développer des environnements virtuels faits de nuages de points 3D, de modèles et de maquettes numériques en tous genres et en partenariat avec de nombreuses professions.

Pour faire face à ce nouveau paradigme, XYZ vous accompagne tous les trimestres pour vous tenir au courant des recherches en cours dans les sciences topographiques, des nouveaux développements technologiques et des améliorations apportées aux outils actuels. Notre communauté aura la chance d'accueillir les spécialistes mondiaux de la 3D lors de deux ateliers de l'ISPRS les 2 et 3 décembre à Strasbourg : *LowCost 3D et Optical 3D Metrology*. Ces journées organisées par l'AFT et l'INSA seront sans doute une bonne opportunité de découvrir des capteurs, des algorithmes et de nouvelles applications tout en visitant les marchés de la Capitale de Noël. Prenez date !

Pierre Grussenmeyer, vice-président de l'AFT

■ GEOCONCEPT ouvre une filiale aux États-Unis

L'éditeur français poursuit son expansion internationale sur le territoire nord-américain et annonce la signature d'un nouveau contrat commercial avec Blinds To Go, spécialiste en stores sur mesure.

GEOCONCEPT SA, concepteur leader de technologies d'optimisation géographique pour les professionnels, annonce l'ouverture d'une filiale à Miami, en Floride.

C'est la quatrième filiale de l'éditeur à l'international, après l'Inde, la Suisse et la Chine. L'ouverture de cette filiale américaine est officialisée depuis mars 2019. La direction de cette nouvelle filiale est confiée à Pierre-Antoine Tricen, précédemment Directeur de la zone Asie Pacifique et à la tête de la filiale de Shanghai.

Le marché de la mobilité en pleine croissance

Selon les prévisions d'IDC, le nombre de travailleurs mobiles aux États-Unis devrait atteindre 105,4 millions de personnes en 2020, soit plus des 2/3 des travailleurs

américains. A l'heure de l'ultra-mobilité, optimiser les déplacements de ses collaborateurs sur le terrain est donc plus que jamais une priorité majeure des entreprises. Le marché nord-américain est en recherche constante d'innovations pour accélérer les échanges et améliorer les expériences clients et utilisateurs.

Nouveau contrat commercial avec Blinds To Go

GEOCONCEPT n'en est pas à son premier fait d'armes sur le territoire nord-américain : son partenariat stratégique avec Salesforce.com lui permet notamment de participer à divers projets dans la région et sa solution Opti-Time est déployée depuis plusieurs mois au sein de filiales US et Canada de certains clients français. GEOCONCEPT annonce par ailleurs avoir remporté un nouveau contrat commercial avec Blinds To Go, un acteur américain spécialisé dans la vente et la fabrication de stores.

► www.geoconcept.com

■ L'IGN sort la nouvelle carte relief de la France



Quatre années après sa précédente édition, la carte Relief de la France fait peau neuve. Pas moins de quatre mois de préparation associés à l'expertise de quelques agents de l'IGN auront été nécessaires pour en permettre la parution.

Depuis le 11 avril 2019, une nouvelle édition de la carte Relief de la France est disponible à la vente. Avec une palette plus vive que la précédente édition, cet objet cartographique présente le territoire métropolitain. Les Parcs nationaux et les Parcs naturels régionaux y figurent désormais, ainsi qu'une mise à jour des données routières. Ses échelles planimétrique 1 : 1 160 000 et altimétrique 1 : 125 000 permettent un survol de notre territoire en 3D, ainsi qu'une visualisation précise des massifs montagneux, des vallées et des zones littorales. Tout commence par l'impression de la carte de la France au format 92 cm x 102 cm sur une feuille de plastique à l'imprimerie de l'IGN à Saint-Mandé (94). Un peu différente des cartes habituelles, celle-ci est dès le départ conçue pour intégrer le futur relief sans que les informations qui s'y trouvent soient dégradées. Pour la suite des opérations, c'est sur le site de l'IGN de Villefranche-sur-Cher (41) qu'il faut se rendre. Sur place, une matrice créée spécifiquement et en relief déterminera la forme définitive de la carte. La feuille de plastique est préalablement chauffée à 200°C pour qu'elle se dilate et épouse les aspérités de la matrice. Ce procédé s'appelle le thermoformage. Réaliser une carte en relief requiert de l'expertise et de nombreux savoir-faire que les agents de l'IGN appliquent à toutes les étapes de fabrication et jusqu'à la dernière d'entre elles : la vérification du positionnement des routes, des rivières et des crêtes. Géographes, enseignants, touristes ou simples amoureux du territoire, cette carte est pour vous !

► Disponible dans les points de vente habituels et sur la boutique en ligne de l'IGN <https://ignrando.fr/boutique/>

■ Bilan Laval Virtual 2019 : renouveau et succès pour la 21^e édition



Proposer un rendez-vous toujours plus qualitatif et récurseur : mission accomplie pour la 21^e édition du salon Laval Virtual qui s'est tenue du 20 au 24 mars derniers à Laval, en Mayenne. Pour cette édition 2019, ce sont près de 18 000 visiteurs professionnels et grand public, qui sont venus "réseauter" et découvrir les grandes tendances et innovations en matière de technologies immersives.

Une dynamique nouvelle et un leadership confirmé

Inspirer, réunir, valoriser, tels étaient les maîtres mots de la 21^e édition du rendez-vous incontournable de la réalité virtuelle, qui s'est clôturée le dimanche 24 mars. Cette année ce sont plus de 18 000 visiteurs qui ont parcouru les allées du salon, à la découverte de plus de 300 exposants. Avec près de 50 nationalités représentées, Laval Virtual a su attirer cette année encore une communauté internationale experte et passionnée de réalité virtuelle et réalité augmentée.

Une rampe de lancement pour les innovations d'aujourd'hui et de demain

L'engouement pour ces technologies s'est concrétisé cette année avec plus de 400 candidatures pour les Laval Virtual Awards. Ce sont des technologies toujours plus à la pointe de l'innovation que le jury d'experts internationaux a dû départager pour primer 11 d'entre elles, le jeudi 21 mars dernier. Toujours en quête de nouveaux talents, les Laval Virtual Awards ont aussi bien récompensé les talents émergents, que les solutions existantes qui contribuent à résoudre des problématiques industrielles.

Succès au rendez-vous pour le festival Recto VRso

En parallèle du salon, Laval Virtual organisait pour la deuxième année consécutive, le Festival Recto VRso dédié à l'art et à la réalité virtuelle. Rien que pour l'exposition officielle située au Musée des Sciences, il a accueilli 4 000 visiteurs au cours de cette édition 2019. Parmi les 86 artistes représentés, les visiteurs ont notamment pu y découvrir l'œuvre "Eve is an unplaceable place" des artistes Margherita Bergamo et Daniel Gonzalez qui ont été primés dans la Catégorie Art&VR des Awards, parmi les 15 projets sélectionnés.

► Revivez les temps forts du salon en images

Opening : <https://www.youtube.com/watch?v=NMhl6XbqiQo>

LV Party : <https://www.youtube.com/watch?v=HJQe7nbaqlw>

Recto VRso : <https://www.youtube.com/watch?v=85ECmpy3KaQ>

■ Le Bénin dispose désormais d'une carte nationale à jour



En octobre 2014, IGN FI est attributaire d'un marché portant sur la réalisation d'une cartographie numérique de l'ensemble du territoire béninois à l'échelle du 1:50 000. Depuis l'indépendance du pays, à de rares exceptions près, la cartographie du Bénin n'avait en effet pas été mise à jour.

Cofinancé par l'Union Européenne dans le cadre de l'Alliance Mondiale contre le Changement Climatique et le Programme des Nations unies pour le Développement (PNUD), le projet de mise à jour de la cartographie nationale du Bénin s'achèvera officiellement la semaine du 15 avril 2019. A cette occasion, une cérémonie de remise par le PNUD au gouvernement Béninois, a été organisée le 18 avril 2019 à l'Institut Français du Bénin en présence de nombreux officiels.

Dans le cadre de cette ambitieuse réalisation, 120 000 km² ont été photographiés et cartographiés, plus de 15 000 images acquises, plus de 20 experts internationaux (imagerie, géodésie, SIG, toponymie,

cartographie...) ont été mobilisés et 4 ateliers de production ont été mis en place et supervisés, impliquant plus de 50 opérateurs béninois formés à l'exploitation des données et à la cartographie.

Outre la carte topographique numérique à l'échelle du 1:50 000, le Bénin dispose désormais d'un modèle numérique de terrain (MNT) qui permettra de nombreuses applications dans l'aménagement du territoire ou l'agriculture par exemple, d'un Géoportail permettant la visualisation en ligne des données disponibles et les exemplaires de la nouvelle carte imprimée.

Le Bénin rejoint donc désormais le cercle des pays d'Afrique de l'Ouest disposant d'une base de données topographiques à jour, homogène sur l'ensemble du territoire et des outils lui permettant de les exploiter. La cartographie nationale du Sénégal a en effet été remise à jour en 2012, celle du Mali en 2016 et celle du Burkina Faso en 2015.

► Pour en savoir plus :

<https://www.ignfi.fr/fr/2019/04/09/le-benin-dispose-dune-carte-nationale-a-jour/>



■ Pierre Jaillard élu président du groupe d'experts des Nations unies sur les noms géographiques

Le Groupe d'experts des Nations unies sur les noms géographiques (GENUNG ; UNGEGN en anglais) a élu Pierre Jaillard comme président pour quatre ans ce vendredi 3 mai 2019 à New York (États-Unis).

Le GENUNG a été créé en 1967 pour normaliser la fixation et l'usage des noms de lieux. Il réunit

tous les deux ans des spécialistes délégués par les pays membres de l'ONU pour échanger sur leurs activités et actualiser leurs compétences. Il tenait du 29 avril au 3 mai 2019 la première session de sa nouvelle formule, destinée à le rapprocher du Comité d'experts des Nations unies sur la gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale (UNGGIM en anglais).

Pour le présider, le GENUNG a choisi Pierre Jaillard, président depuis 2004 de la Commission nationale de toponymie (CNT) française. Il est le premier Européen à présider le GENUNG en 52 ans d'existence. Au sein de ce groupe d'experts, dont il a présidé la division francophone de 2006 à 2014, il s'était fait remarquer en défendant la dimension culturelle des noms de lieux et la diversité linguistique dans leur usage, conformément à la tradition diplomatique française. Administrateur de l'INSEE et ancien rapporteur à la Cour des comptes, il est aussi vice-président de l'association Patrimoine sans frontières et a été adjoint au maire de Sceaux (Hauts-de-Seine) délégué à l'action culturelle.

► Site du GENUNG : <<https://unstats.un.org/unsd/ungegn/>>.
Site de la CNT : <http://cnig.gouv.fr/?page_id=671>.

Agenda des manifestations 2019

- **Les 2 et 3 juillet, GéoDataDays 2019** à Arras
<https://www.geodatadays.fr/les-actualites/fiche-sans-titre/30>
- **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 25 au 27 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 20 au 24 novembre, Third International Scientific Conference in Applied Geomorphometry, GIS and Remote Sensing in Earth Sciences and Environment** à Beyrouth, Liban
<http://if3g.unioneag.org/>



L'INSA de Strasbourg et l'AFT organiseront deux ateliers scientifiques en collaboration avec l'ISPRS
les 2 et 3 décembre à Strasbourg :
1) LowCost 3D (<https://www.lc3d.net>)
2) Optical 3D Metrology (<https://o3dm.fbk.eu/>),
Date limite pour soumettre une communication : 5 septembre 2019



■ Faro : première étape de la reconstruction de Notre-Dame

Art Graphique & Patrimoine a mené une opération de numérisation 3D d'urgence avec la gamme de Lasers Scanners Faro S

L'équipe d'AGP (Art Graphique & Patrimoine) en collaboration avec FARO, la référence mondiale dans le domaine des technologies de mesure et d'imagerie 3D destinées aux processus BIM (modélisation des données du bâtiment), a mené samedi 20 avril 2019, une opération d'urgence pour la sauvegarde de Notre-Dame : effectuer en une journée un relevé 3D précis de l'édifice post-incendie pour établir un diagnostic des dégâts.

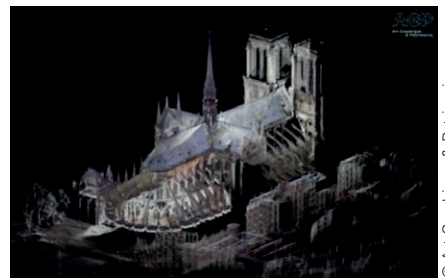
Les données acquises avec ces premiers relevés 3D réalisés après sinistre avec les *lasers scanners* de dernière génération Focus S de Faro, pourront être comparées avec les données (AGP) antérieures à l'incendie, fournissant ainsi des informations utiles à la reconstruction et à l'enquête en cours. L'ensemble des données récoltées permettra à tous les corps de métier d'avoir une base fiable de mesures 3D, d'images et de documents techniques. Cette opération "Commando" a été organisée le samedi 20 avril pour numériser la totalité de la cathédrale, et notamment les parties les plus endommagées. Plus de 300 positions de scans couleurs ont ainsi été réalisées pour environ 30 à 40 milliards de points. Les parties inaccessibles ont été acquises en photogrammétrie par drone. Ces données serviront à établir le diagnostic des dégâts causés par l'incendie afin de déterminer quelles parties sont les plus endommagées. Il s'agit de la première étape de la reconstruction : une prestation d'urgence indispensable à la sauvegarde de la cathédrale.

En 25 ans d'activité et en collaboration avec FARO, AGP a réalisé plusieurs relevés 3D dans la cathédrale à travers les techniques de scan laser – lasergrammétrie – et de photogrammétrie. Ces données assemblées ont permis de récupérer tous les scans (nuage de points) de la toiture, de la charpente (la "forêt") et de la flèche, les éléments disparus lors de l'incendie. Avec 50 milliards de points de mesure, AGP possède la cartographie 3D la plus complète et précise existante de Notre-Dame, notamment la charpente et la flèche, perdues lors de l'incendie

De quelles données s'agit-il ?

- Pour la "forêt" il s'agit de : 150 scans de précision millimétrique pour un total de 3 à 5 milliards de points ;

La densité exceptionnelle des points (environ 1 à 2 points par mm²) permet une retranscription inégalée des détails de la charpente



Nuage de points de Notre-Dame

et de la toiture avec sa flèche. AGP avait accompagné Andrew Tallon en 2010 et collaboré à sa campagne de numérisation de Notre-Dame. Cette numérisation d'une précision millimétrique, mais d'une densité centimétrique, a permis d'acquérir les volumes généraux du bâtiment dans le cadre de sa recherche sur les systèmes constructifs des cathédrales.

- Pour la totalité de la cathédrale : l'intégralité des scans effectués sur Notre-Dame depuis plusieurs années par Art Graphique & Patrimoine contient environ 50 milliards de points contre 1 milliard pour celle d'Andrew Tallon.

La vidéo du travelling dans le nuage de points du toit :

https://www.youtube.com/watch?v=02z5jjj_2tU&feature=youtu.be

Du relevé à la modélisation 3D

Laurence Stefanon d'AGP a en outre travaillé, entre 2010 et 2013, à une reconstruction historique de la Cathédrale de Paris, en réalisant un modèle 3D pour 14 phases architecturales, de 1163 à aujourd'hui. Ce modèle 3D avait été réalisé avec les outils et logiciels FARO, pour une publication avec des objectifs pédagogiques, présente aussi la reconstruction 3D de Notre-Dame de son origine à l'époque actuelle, avant incendie. Le détail de la charpente est visible dans la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=wecORQNKPM4>

Modèle 3D reconstruction de Notre-Dame 2010-2014



© Art Graphique & Patrimoine

© Art Graphique & Patrimoine – Laurence Stefanon

■ Capture de la réalité 3D connectez le monde réel et le monde numérique

La transformation numérique est partout. L'utilisation de la capture de la réalité 3D s'est largement démocratisée ces dernières années et nous permet de connecter le monde réel au monde digital. Les solutions Leica Geosystems numérisent leur environnement en capturant des millions de points par seconde et des images en haute résolution.

Solutions pour la capture de la réalité 3D Leica Geosystems

Grâce à une gamme complète de solutions 3D pour le terrain jusqu'au

bureau, Leica Geosystems est le partenaire idéal pour vous permettre d'entrer sur le marché de la capture de la réalité. En garantissant simplicité, précision et fiabilité en matière de collecte de données, les solutions pour la capture de la réalité 3D permettent d'augmenter la productivité.

Qu'est-ce que la Capture de la Réalité ?

Les évolutions technologiques facilitent l'accès et la gestion de l'information permettant une prise de décision plus rapide. La capture de la réalité 3D permet de numériser et capturer



n'importe quel site en combinant des mesures et des images de haute qualité.

- <https://leica-geosystems.com/fr-fr/about-us/content-features/reality-capture-solutions>
- <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360/educational-articles-and-insights/what-is-3d-reality-capture>

Aimé Laussedat (1819-1907) 30 avril 2019 - Journée du bicentenaire

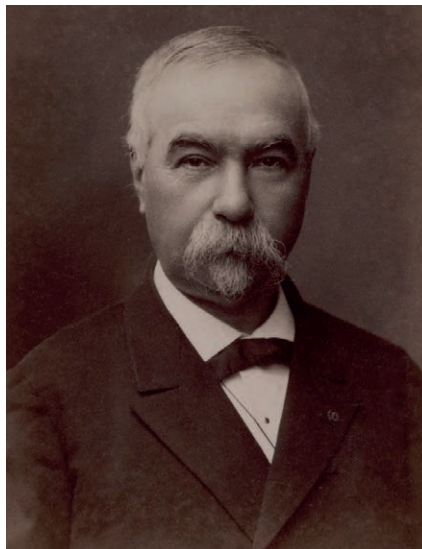
À l'occasion du bicentenaire de la naissance du colonel Aimé Laussedat, la société française de photogrammétrie et de télédétection (SFPT) et l'association française de topographie (AFT) ont organisé une journée de commémoration en hommage à l'inventeur de la photogrammétrie, sous l'égide de la société internationale de photogrammétrie et de télédétection (ISPRS) et avec le soutien du conservatoire national des arts et métiers (CNAM), l'hôte de la manifestation, de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN), de l'ordre des géomètres-experts (OGE) et du syndicat national des entreprises privées de la photogrammétrie et de l'imagerie métrique (SNEPPIM).

Ancien élève de l'école polytechnique devenu officier du génie, Aimé Laussedat a modernisé la topographie en effectuant des mesures sur des photographies plutôt que sur le terrain. Cette invention fait de lui le précurseur de la photogrammétrie, une technique appliquée à la photographie terrestre sous le Second Empire et qui deviendra la méthode standard de la cartographie de tous les pays du monde avec le développement au XX^e siècle de la photographie aérienne avec prise de vues à bord d'avion, et plus récemment de satellite et de drone.

Olivier Faron, administrateur général, a accueilli la centaine de participants dans la salle Abbé Grégoire du CNAM et rappelé la carrière de son prédécesseur de 1881 à 1900. La journée a ensuite été ouverte par les représentants des organisateurs Françoise Duquenne (AFT), Aurélie Sand (SFPT), Nicolas Paparodis (IGN-ENSG), Jean-François Dalbin (OGE), Fabrice Bunouf (SNEPPIM) et Christian Heipke (ISPRS).

Plusieurs conférences à caractère historique, scientifique et professionnel ont ensuite retracé le parcours de cette personnalité d'exception et permis d'en mesurer l'héritage académique et professionnel.

Olivier Azzola, archiviste au centre de ressources historiques de l'école polytechnique et Claudine Fontanel ont brossé sa biographie, décrit le parcours de l'étudiant, les diverses missions du militaire, souligné sa rencontre fondatrice avec François Arago qui présentait



l'utilisation de la photographie naissante à des fins topographiques, ses responsabilités à la direction des études de l'École polytechnique avant d'enseigner puis de prendre en charge le CNAM, jusqu'à devenir membre de l'académie des sciences.

Ensuite Yves Egels de l'école nationale des sciences géographiques (ENSG) a présenté l'état de la photogrammétrie avant la Première Guerre mondiale, Pierre Grussenmeyer de l'institut national des sciences appliquées (INSA) de Strasbourg les applications de la photogrammétrie de Laussedat à nos jours, Marc Pierrot-Deseilligny de l'IGN l'avancement de la recherche dans le domaine, Laurent Polidori du CNAM l'évolution de l'enseignement de la matière depuis l'origine, Audrey Alajouanine de l'OGE l'utilisation actuelle et prospective de la discipline dans les métiers de

la topographie, Michel Mémier du SNEPPIM l'héritage de Laussedat dans les métiers de l'imagerie et Christian Heipke, président de ISPRS, le rayonnement international d'Aimé Laussedat. Ce dernier a annoncé et s'est félicité de l'organisation, du 14 au 20 juin 2020 à Nice, du XXIV^e congrès de l'ISPRS sur le thème "Imaging today, foreseeing tomorrow" et invité les participants à retenir la date.

Tous les intervenants ont reconnu qu'en prolongement de la photogrammétrie, de la lasergrammétrie, et les levés lidar ont grandement facilité la vie du topographe jusqu'à le transporter dans les nuages... de points.

Au Panthéon des géomètres-topographes Aimé Laussedat a toute sa place aux côtés d'Eratosthène, de Claude Ptolémée, de Mercator, des Cassini, de Lambert, de Bourdalouë ou encore de Lallemant.

Il est heureux que l'année de sa naissance soit commémorée justement au CNAM, dans le lieu qu'Aimé Laussedat a dirigé et animé pendant dix-neuf ans, à un âge où le plus grand nombre se satisfait d'une retraite méritée. Il était bienvenu d'honorer sa motivation inlassable au service de la recherche, de l'enseignement et de la profession. Il convient tout autant de remercier Laurent Polidori, titulaire de la chaire de géomatique du CNAM, d'avoir initié, organisé et animé la journée du bicentenaire.

Les actes du colloque seront réunis dans un ouvrage à paraître d'ici la fin de l'année aux bons soins de l'OGE et de la société Publi-Topex. Sans attendre, les lecteurs intéressés peuvent consulter la collection de la revue XYZ, abondamment citée par les intervenants en particulier les n° 133 de décembre 2012 et 114 de mars 2008 qui contiennent respectivement, dispensées au CNAM justement dans l'amphithéâtre Abbé Grégoire, les leçons inaugurales d'Aimé Laussedat et de Laurent Polidori. ●

J.-P.M.



LES SCANNERS STATIQUES FARO :

LA GAMME DE SCANNERS 3D LA PLUS COMPACTE ET POLYVALENTE POUR DES EXPERTS

Le monde de la topographie fait face à une mutation de ses missions. Aujourd'hui, celles-ci sont de plus en plus exigeantes et nécessitent des outils innovants et polyvalents.

Geomesure et Geotopo, distributeurs agréés **FARO**, forts d'une expérience de plus de 20 ans au côté des géomètres-experts, travaillent à proposer les solutions les plus en adéquation avec les attentes du marché.

Pour les géomètres-experts la précision, la polyvalence et l'efficacité sont essentielles. Afin de répondre à ces attentes, **FARO** a développé une série de fonctionnalités sur ses scanners 3D ainsi que sur son logiciel **SCENE2019**. Ces fonctions permettent aux professionnels de travailler avec une grande précision, tout en garantissant une qualité optimale de leurs données et une sérénité dans leurs missions.

Ainsi les scanners 3D **FARO** de la gamme S offrent entre autre :

- **un enregistrement sur site** qui assure un recalage avec affinage de haute qualité, sans revenir au bureau. Seul l'enregistrement sur site de **FARO** permet ce recalage sur le terrain,
- **l'ajout de numérisation** : cette fonction dans le levé garantit une grande précision dans les rendus en permettant de relever des sphères jusqu'à 60m,
- **la gestion de la photo** : s'agissant de leur 3^e génération de scanners 3D, **FARO** a développé la possibilité de reprise d'une partie des photos après l'acquisition, en plus du mode HDR 2, 3 et 5. Cette fonction vous garantit une information et une colorisation optimales.

Comme nous savons que c'est le terrain qui commande, toutes ces fonctions sont directement intégrées dans les scanners 3D **FARO** de la gamme S, avec en plus le poids le plus léger du marché (4,2 kg avec la batterie).



FARO S150 en action

Avec les scanners **FARO**, vous avez la possibilité de :

- scanner tête en bas et à l'horizontale,
- couper la ventilation, afin de travailler dans des environnements pollués,
- piloter le scanner avec un smartphone IOS ou Android, sans logiciel additionnel,
- choisir parmi 38 personnalisations possibles en qualité et résolution du nuage de points

La gamme matérielle et logicielle **FARO** permet de réaliser des projets divers et multiples aussi bien :

- en intérieur qu'en extérieur (portées de 70m, 150m et 350m),
- dans des environnements complexes,
- dans des environnements exigeants une grande précision

Et parce que le chantier ne s'arrête pas sur le terrain, **FARO** a également développé un logiciel de traitement de ses scans : **SCENE2019**. Outre le traitement très simple des données, ce logiciel dispose d'un algorithme propre à la technologie **FARO** avec de nombreux filtres : points sombres, points perdus, artefact de bord, Li-HDR (Laser Illuminated HDR), objets en mouvement.

Toutes ces fonctions vous permettent un rendu de haute qualité.



Photo du Phare du Petit Minou à Plouzané (29)



Nuage de points du Phare réalisé en 1h30 avec le scanner FARO S150

Et parce que **FARO** favorise le lien entre les experts et leurs clients, le logiciel **SCENE2019** propose des outils de visualisation et de communication tels que l'affichage des projets en mode VR, la création de **SCENE2019** (viewer) et de **SCENE2CLOUD** (véritable outil de collaboration).

FARO SCENE2019 est la plateforme commune à de nombreux métiers, elle permet de réaliser aussi bien des exports métiers (coupes ou ortho-photos), des exports communications (web export) que des exports vers des logiciels spécialisés, notamment dans le domaine du BIM.

La gamme matérielle et logicielle **FARO** répond à de nombreuses applications et ouvre de nouvelles possibilités notamment dans le domaine du BIM, grâce au logiciel **FARO As-Built**. **Geomesure** et **Geotopo** vous accompagnent dans la découverte du BIM.

Analyse de performances et calibration de systèmes LiDAR mobiles

26 et 27 mars 2019 à Lyon

■ Thomas TOUZÉ - Emmanuel CLÉDAT - Nicolas SEUBE

Atelier issu d'un projet de recherche québécois

Les 26 et 27 mars 2019 se sont tenues, à l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry, deux journées consacrées à l'état de l'art sur les outils de calibration et d'analyse de performance de systèmes LiDAR mobiles. Cet atelier a été organisé dans le cadre de la finalisation du projet PSR-SIIRI sur la "Calibration automatique et analyse de performances de systèmes LiDAR", soutenu par le Ministère de l'Economie et de l'Innovation du Québec qui rassemblait les partenaires suivants : CIDCO, Université Laval, HydroQuébec, Geown (Canada & France), HEIG-VD (Suisse) et IXBlue (France). Ce colloque s'est tenu à Lyon, grâce au soutien de la DTG d'EDF qui a intégralement pris en charge les frais d'organisation (figure 1). L'objectif de cet atelier était double. D'une part, partager des résultats récents portant sur la calibration automatique, la modélisation de l'incertitude et l'analyse de performances de systèmes LiDAR mobiles. D'autre part, mettre en perspective les besoins et points de vue des différents acteurs du monde du LiDAR mobile : les maîtres d'ouvrage (donneurs d'ordres), les prestataires et les instituts de recherche et de développement.



Figure 1. les organisateurs et partenaires de l'atelier



Figure 2. Les participants de l'atelier "Analyse de performances et calibration de systèmes LiDAR mobiles"

Une trentaine de participants a suivi ces deux journées fructueuses (figure 2). Du côté des maîtres d'ouvrage, nous retrouvons la DTG d'EDF, SNCF Réseau, les Travaux spéciaux de l'IGN et Total. Les entreprises en charge de levés LiDAR mobiles étaient représentées par Helimap (Suisse), Altametrus et Jakarto (Québec). Les fabricants de solutions instrumentales ou de plates-formes intégrées étaient également présents via YellowScan et Microdrones. Quant aux universités et instituts de Recherche et Développement, nous retrouvons la R&D d'EDF, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, l'Université Laval de Québec, le CIDCO (Québec) et Geown (France et Québec).

Les deux journées se sont articulées autour de cinq ateliers successifs :

1. Systèmes LiDAR et applications
2. Élimination des erreurs systématiques
3. Besoins des maîtres d'ouvrage et prestataires en termes d'analyse qualité
4. Analyses et utilisation de modèles d'incertitudes
5. Table ronde et clôture de l'atelier

Session 1 : Systèmes LiDAR et applications

Au cours de cette session, quatre présentations ont été faites sur la thématique des systèmes LiDAR aériens ou terrestres, mais présentant des problématiques et enjeux très divers (plate-forme, choix du système inertielle, classification des résultats, reconnaissance automatique, etc.), ce qui est représentatif des multiples contextes de la géomatique requérant des données LiDAR mobiles.

- *Nuage de points et imagerie de grade professionnel par drone*
Stéphanie Van-Wierts – Microdrones
- *Le relevé LiDAR aérien : une donnée clef pour la maintenance des réseaux*
Luc Perrin & Pierre Assali – Altametrus
- *Jakarta : un projet de cartographie grande échelle sur la ville entière*
Loïc Messal – Jakarto
- *Impact des performances de centrales inertielles et du réajustement des mesures sur la qualité de l'alignement de données LiDAR* – Tristan Allouis & Pol Kennel – YellowScan



Session 2 : Élimination des erreurs systématiques

Les levés LiDAR mobiles requièrent l'utilisation de plusieurs instruments (GNSS, IMU et LiDAR) qui, nécessairement, doivent être synchronisés et alignés. Une juste restitution des données nécessite de connaître les latences, bras de leviers (*Lever-Arm*) et matrices de montage (*Boresight*) des différents capteurs les uns par rapport aux autres. Au cours de cette session, différentes méthodes de calibration de ces paramètres ont été présentées. Si ces méthodes diffèrent essentiellement dans une approche en laboratoire ou sur site, au préalable d'un levé, les présentations ont pu mettre en avant leur application de manière pragmatique.

- *A new Combined Standard Measurement Uncertainty (CSMU) model for LiDAR systems*
Nicolas Seube, William Ney-Cassol & Christian Larouche – Cidco, Geown & Université Laval
- *Lidar IMU Boresight Automatic Calibration* – Rabine Keyetieu – Geown & Cidco
- *Étalonnage des angles de visée IMU-GNSS-LiDAR par une méthode statique* – Thomas Touzé – EDF DTG & HEIG-VD
- *Validation d'un modèle d'incertitudes et d'une méthode statique d'étalonnage des angles de visée IMU-LiDAR sur systèmes lidar mobiles terrestres*
Christian Larouche – Université Laval
- *LiDAR IMU Latency Automatic Calibration* – Rabine Keyetieu – Geown & Cidco
- *Towards automatic boresight angles adjustment of road based mobile LiDAR system* – Mohsen H. Shahraji – Université Laval

Session 3 : Besoins des maîtres d'ouvrage et prestataires en termes d'analyse qualité

EDF et SNCF Réseau, deux principaux maîtres d'ouvrage présents à l'atelier font part de leurs besoins en termes d'analyse qualité. EDF parle d'analyse qualité de données produites par des services extérieurs et a ainsi des besoins d'investiguer des jeux de données pour y déceler la présence résiduelle d'er-

reurs systématiques. La comparaison avec des états historiques (problématiques d'auscultation) est également mentionnée. Il faut prendre en compte la connaissance sur la dynamique des ouvrages en réponse à des sollicitations mécaniques, et s'assurer de la qualité des données sur des régions où les déformations sont prédites de très faibles amplitudes.

La détection de caractéristiques peut être liée à l'analyse qualité des formes détectées. En particulier, les objets d'intérêt ou ceux présentant des particularités doivent être étudiés avec attention. Aujourd'hui, des méthodes semi-automatiques impliquant des intégrations Homme-machine ergonomiques faisant intervenir des visualisations d'indices de qualité sont plus fiables que des algorithmes aveugles. L'objectif étant de discriminer bruit de mesure versus phénomène observé. Par exemple : discriminer déformation réelle d'un objet au cours du temps et erreurs de mesure.

Session 4 : Analyses et utilisation de modèles d'incertitudes

Comme dernière session technique, faisant suite aux besoins des maîtres d'ouvrage de s'assurer de la qualité des données fournies par des prestataires, il s'agissait ici de présenter les développements actuels de tels outils, tout en ouvrant vers la valeur ajoutée que représentera certainement la fusion de la lasergrammétrie avec la photogrammétrie.

- *Analyse de performance de systèmes LiDAR vs. centrales inertielles* – Julien Vallet, Adrien Gressin & Philippe Clausen – Helimap System SA & EPFL
- *Débruitage des nuages de points par analyse géométrique ou probabiliste* – Elliot Mugner – Geown
- *Couplage fort de données photogrammétrique et lasergrammétrique dans un ajustement en bloc* – Emmanuel Clédât – EPFL
- *Validation et contrôle de la donnée LiDAR chez SNCF Réseau* – Jean-Christophe Michelin – SNCF Réseau
- *LiDAR Survey Data Automatic Validation* – Nicolas Seube – Geown

Session 5 : Table ronde et clôture de l'atelier

Une discussion a eu lieu sur le sujet de la validation de données. On retient que ce thème, pour l'instant sous-représenté, a suscité un intérêt manifeste des participants, à la fois des maîtres d'ouvrage (il s'agit d'évaluer la qualité des données provenant de fournisseurs de prestataires de service), et des organismes producteurs de données LiDAR. La validation des données en est encore à un stade préliminaire et plusieurs pistes d'améliorations sont proposées, par exemple : focaliser la validation sur certains objets d'intérêt de la mesure LiDAR, en complétant la détection (segmentation de ces objets) par une analyse d'incertitude type composée/incertitude type *a posteriori*. Les outils de validation ne seront sûrement pas totalement automatiques à court terme, une utilisation semi-automatique des algorithmes de validation semble plus porteuse (par désignation des zones pouvant poser problème).

Conclusion

Nous tenons à remercier chaleureusement les présentateurs et auditeurs, pour l'excellence des exposés et la pertinence des questions posées. En clôture de l'atelier, les participants ont montré leur enthousiasme pour réitérer l'organisation d'un tel événement. En effet, il paraît important d'une part d'échanger entre les différents acteurs du monde des technologies LIDAR : écoles d'ingénieurs et formations de géomatiques, prestataires, maîtres d'ouvrages, instituts de recherche et centres de recherche et développement, et d'autre part, de représenter la diversité des cultures de la francophonie de ces acteurs autour du monde. Ainsi, la prochaine édition de cet atelier LIDAR se tiendra en langue française, et sera annoncé dans les différents canaux de l'AFT : XYZ, lettre d'actualité... Les présentations sont disponibles sur demande par courriel (nous demanderons alors aux auteurs leur accord). ●

Contacts

Thomas Touzé, thomas.touze@edf.fr
Emmanuel Clédât, emmanuel.cledat@epfl.ch
Nicolas Seube, nicolas.seube@geown.io



La semaine professionnelle de la FIG à Hanoï

L'information géospatiale pour une vie plus intelligente et une résilience environnementale

■ **Françoise DUQUENNE - Bernard FLACELIÈRE**

De retour en Asie du Sud-Est après Kuala Lumpur en 2014, la FIG renoue avec une région riche en sujets et aspects touchant notre profession, des constructeurs et sociétés de service aux universités et leurs thèmes de recherches, de la Chine à l'Australie et de l'Inde au Japon. Plus de 1 000 participants de 90 pays ont apprécié l'accueil de Hanoï, la variété de la cuisine et la gentillesse des Vietnamiens. Un des trois plus grands édifices de ce type dans le Sud-Est asiatique, le Vietnam National Convention Center accueillait également la trentaine de stands, y compris ceux des futurs hôtes des événements de la FIG : Amsterdam, Le Cap et Accra. C'est l'Association vietnamienne de géodésie, cartographie et télédétection (VGCR, Vietnam Association of Geodesy, Cartography and Remote Sensing), une fusion vietnamienne de l'AFT et de la SFPT qui nous accueille par son président Tran Bach Giang. Rudolf Staiger, le nouveau président (2019-2022) de la FIG, est également de la partie avec toute son équipe.

Un riche programme de présentations

La gamme de présentations, leur variété et leur simultanéité rendent difficiles une appréciation globale. Les nécessaires interventions et tables rondes à connotations politico-financières occupent des demi-journées. Il s'agit de rendre compte, dans les domaines du foncier et du développement durable, des implications des organisations internationales comme les Nations unies et la FAO. Les sessions plénières insistent sur :

- l'information, clé du développement vers un monde intelligent,
- les approches de UN-GGIM, la gestion de l'information géospatiale mondiale des Nations unies pour une vie plus intelligente et une résilience environnementale,
- la modernisation des infrastructures géodésiques,
- les buts de développements durables vus par l'IAG, l'Association internationale de géodésie,
- l'échange des données, avec l'exemple d'INSPIRE,
- etc.

Le programme et les comptes-rendus des sessions se trouvent à http://www.fig.net/fig2019/technical_program.htm.

Le tour des faits saillants des commissions

La commission 5 se verra détaillée plus avant, comme suivie par Françoise Duquenne, rédactrice.

Voici quelques sessions dignes d'intérêt :



L'AFT est accueillie à Hanoï par la FIG et l'Association Vietnamienne de géodésie, cartographie et télédétection

► à un nécessaire équilibre entre les domaines fonciers et ceux de la technique de la mesure.

Le forum des associations membre, des organismes régionaux et des réseaux régionaux

Une nouveauté cette année, les trois réunions sont fusionnées en une seule, un souhait de Rudolf Staiger. Associations, organismes et réseaux se présentent en assemblée et forcément trouvent des actions communes.

Les nouvelles des événements à venir

Pour 2023, la ville d'Orlando en Floride est retenue sans vote, avec l'agrément de l'assemblée générale, étant seule candidate. Cette candidature avait été présentée par la NSPS (*National Society of Professional Surveyors*) l'année dernière et elle avait échoué derrière le Cap, Afrique du Sud.

Pour rappel, les prochains événements sont :

- Rendez-vous au WW 2020 du 10 au 14 mai à Amsterdam, Pays-Bas
- WW 2021 à Accra, Ghana
- Congrès 2022 au Cap, Afrique du Sud

Si vous venez à Hanoi...

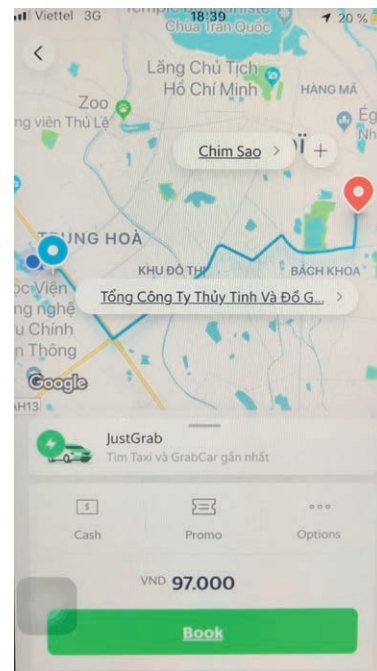
Voici les quelques recommandations pour les voyageurs.

- **Comment traverser les voies de circulation quand vous êtes un piéton ?** Jour et nuit les motocyclettes, voitures et camions sillonnent les artères. Si vous devez traverser une de celles-ci pour vous rendre au centre des congrès, comment faire ? La consigne est la suivante : attendre une légère baisse du débit, commencer à traverser à vitesse constante, avec un cap constant, en fixant tout de même le flux arrivant. Surtout ne pas courir ou changer de direction, en effet, les conducteurs vous voient très bien et anticipent votre trajectoire pour vous éviter par derrière ou bien passer par devant s'ils sont bien engagés. Je dois avouer qu'on est assez inquiet au premier essai.



- **Devenez millionnaire :** l'euro valant 25 000 dongs vietnamien (VND) on se retrouve vite millionnaire à la sortie du bureau de change. Attention, les billets ont tendance à se ressembler et il n'est pas rare de se tromper de quelques puissances de dix en payant. Les commerçants ou chauffeurs de taxi m'ont néanmoins toujours corrigé.

- **Comment voyager en taxi dans Hanoi ?** Les habitués de Uber comprendront je pense. L'Asie du Sud-Est utilise l'application Grab déclinée en GrabTaxi, GrabBike (sur motocyclette), GrabHitch (mutualisation de trajet), GrabExpress (colis) et GrabChat qui permet de correspondre avec le conducteur en traduisant le français en vietnamien.



Écran GrabTaxi, pour la traversée d'Hanoi à 97 000 dongs, soit 4 €.

Commercial UAV expo Europe

La foire du drone, commerciale et technique

Du 8 au 10 avril s'est tenu le congrès Commercial UAV Expo au centre de conférence RAI d'Amsterdam. Comme son nom l'indique, ce salon vise la promotion de l'utilisation de la technologie drone à des fins commerciales et techniques. Les industriels du secteur ont donc profité de l'évènement pour présenter leurs dernières innovations (drones à voilure fixe et tournante, capteurs, logiciels pour les traitements de données métiers ou bien encore des outils d'aide à la gestion du trafic aérien de drones).

Organisé chaque année en Europe, ce salon se partage entre un espace réservé à une exposition de solutions technologiques (matériels et logiciels) et des conférences et tables rondes visant à mettre en lumière la filière, son évolution, la réglementation et les usages industriels ou à venir (figure 1 et figure 2). Une soixantaine d'exposants ont donc profité de l'occasion pour présenter leurs produits et services. Se sont donc côtoyées des sociétés du monde de la topographie (Riegl, Trimble/Applanix, Terrasolid, Trimble...), des construc-

teurs de drones (Aeroscout, Skytronics, C-Astral Aerospace...), des fournisseurs de logiciels de traitements photogrammétriques (Pix4D, SimActive...) et des développeurs de solutions d'analyse de données du métier (ESmart Systems, Agroscout...). On peut noter en particulier une très forte représentation des intégrateurs de systèmes LiDAR (YellowScan, LiDAR USA, Lidaretto, Stormbee...). En parallèle se sont déroulées différentes conférences qui se sont focalisées sur l'ensemble de la chaîne de valeur des drones :

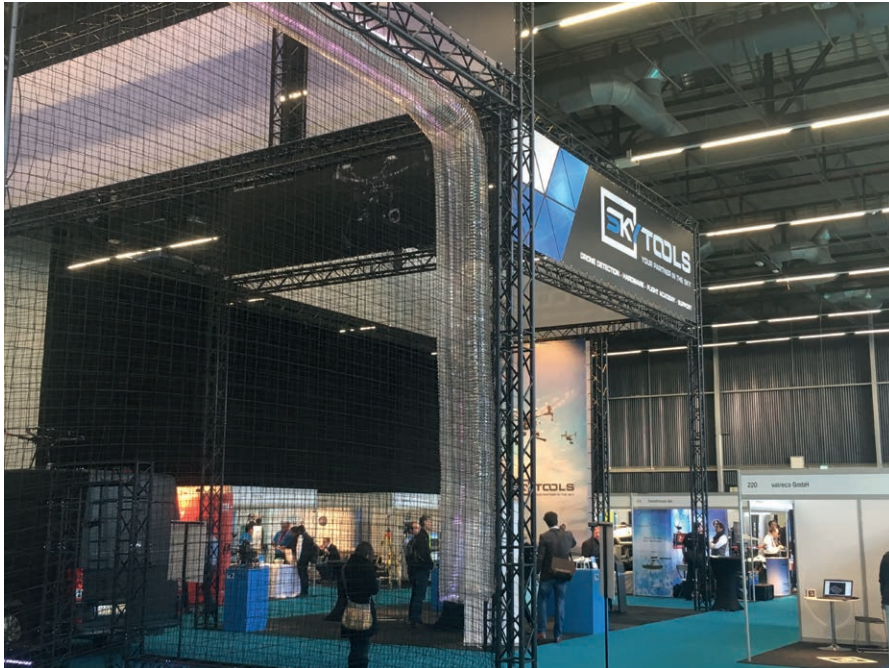


Figure 1. Le salon des exposants

- réglementation actuelle et future, optimisation de la sécurité des systèmes (standardisation, certification...),
- gestion du trafic aérien des drones et de l'aviation conventionnelle,
- usages des drones pour des besoins de la cartographie et de l'inspection pour l'agriculture et l'industrie,
- tests et développement de l'offre de transport de biens et de personnes par drones,
- déploiement de systèmes de drones autonomes et/ou pilotés depuis un

centre de supervision opérationnel,

- drone et anti-drone pour sécuriser les sites et installations sensibles.

Bien que principalement centrée sur la technologie drone, cette édition a marqué une transformation de la filière : d'un écosystème foisonnant vers une filière industrielle centrée sur les besoins et les usages métiers. Ce virage représente une étape importante pour le marché des drones qui va être amené à se consolider dans les prochains mois et années. À ce

titre, de nombreuses interventions ont insisté sur la nécessité d'une vision système pour répondre aux besoins et attentes des clients. Les acteurs de la filière ne positionnent plus les drones comme "la solution unique" à toutes les sollicitations techniques mais plutôt comme une brique pertinente à intégrer dans la chaîne de valeur d'ores et déjà en place chez les clients. Les grands donneurs d'ordres du monde de l'énergie et du transport ont par exemple présenté de nombreux projets partenariaux avec des *start-ups* visant à intégrer les drones dans les référentiels et méthodes existantes (inspections automatiques de mâts et pylônes électriques, aide à l'*asset management*, sécurisation de sites...). Ce nouveau positionnement de l'industrie du drone permet de révéler les nouveaux enjeux techniques pour la filière (au-delà des aspects liés à l'optimisation de la sécurité des machines) liés à la combinaison de données multi-sources (données acquises par moyens conventionnels aériens ou terrestres), l'analyse en temps réel des données à l'aide d'intelligence artificielle (traitement d'image, *machine learning*...). De même, le développement de solutions techniques permet de répondre à des besoins métiers (détection de défauts, de changements et fourniture de proposition d'actions de maintenance) ou bien encore à la mise en place de plates-formes de diffusion et de partage des données acquises.

Malgré la qualité des échanges et des acteurs présents sur le congrès, nous pouvons regretter la faible représentation française (en comparaison des délégations espagnoles, allemandes ou bien encore italiennes) alors même que la filière nationale est innovante et foisonnante, tant d'un point de vue technique (de nombreux drones, capteurs et solutions de traitement de données sont développés par les industriels français) que réglementaire. La Direction générale de l'Aviation civile (DGAC) mène ainsi un travail de fond aux niveaux national et européen pour permettre un développement exponentiel de la filière. ●

Flavien VIGUIER



Figure 2. Les conférences

Business Game de l'OGE : une première édition très réussie !

L'Ordre des géomètres-experts a eu l'idée originale d'organiser une journée spéciale dédiée aux étudiants topographes en 1^{re} année de formation ingénieur des 3 écoles d'ingénieurs formant au diplôme d'ingénieur topographe, à savoir l'ESTP, l'ESGT et l'INSA Strasbourg. L'événement s'est déroulé le jeudi 14 mars 2019, dans un site tout aussi original : la cité de la mode et du design de Paris.



Figure 1. Les participants du Business Game

L'événement a rassemblé un total de 230 étudiants, dont 80 de l'ESTP, 90 de l'ESGT et 36 de l'INSA Strasbourg, arrivés des 3 coins de la France. Ils ont été accueillis par les organisateurs de l'événement dans une gigantesque salle où les attendaient des tables et un coin de détente. Sur les tables, on trouvait : un plan au format A0, des feutres de couleur, une feuille de papier calque et un recueil (figure 1).

Le cahier des charges ?

Le Business Game avait pour objectif de faire connaître le métier de géomètre-expert d'une façon plus ludique et conviviale auprès d'un public susceptible de se diriger vers ce métier. Ainsi, les étudiants avaient deux heures pour se mettre dans la peau du géomètre-expert et proposer un nouvel aménagement d'un quartier industriel du vieux Paris (de la gare d'Austerlitz à Ivry-sur-Seine). Pour ce faire, l'OGE a mis à leur disposition un livret comportant le plan d'origine du site, les photos des bâtiments à conserver, le périmètre de la zone à aménager, des photos d'ambiance de l'époque et de l'environnement du site. Un recueil des

prestations recensant chacune des activités du géomètre-expert était également mis à leur disposition et leur a servi de guide dans cet exercice. Ces 130 hectares de page blanche ont très vite été occupés par des quartiers résidentiels, des maisons reliées par des passerelles, des complexes sportifs, de nombreuses pistes cyclables, des aménagements paysagers inédits, tout en respectant les fortes contraintes imposées par le cahier des charges (bâtiments à conserver, contraintes paysagères). Un deuxième aspect que les étudiants devaient souligner était la mention des missions du géomètre-expert à chacune des étapes de l'aménagement.

Les étudiants ont très vite relevé le défi et ont "planché" sur le sujet, avec l'assistance d'un binôme enseignant(e) / géomètre-expert par école (pour l'ESTP : Rani El Méouche/A. Matisson, pour l'ESGT : C. Proudhomme/E. Tuffier, pour l'INSA Strasbourg : T. Landes / V. Frey). Des membres du Bureau du Conseil supérieur sont également passés dans les rangs pour partager leur expérience et transmettre la passion de leur métier. Ce Business Game aura généré, au travers de cette activité interactive et ludique, une belle émulation des étudiants autour du métier de géomètre-expert !

Les vainqueurs de cette première édition ? L'INSA Strasbourg

Vers 17 h, un jury composé de professionnels a auditionné chaque école et le verdict est tombé : la coupe a été remportée par les étudiants topographes de l'INSA Strasbourg (figure 2).

Encore une première : la récompense du meilleur PFE par école

Les récompenses ne se sont pas arrêtées là, puisque l'Ordre des géomètres-experts a également souhaité primer le meilleur travail de fin d'études des diplômé(e)s 2018 de chacune des écoles d'ingénieur. Ainsi, Camille Gourguechon (INSA Strasbourg) a été récompensée pour son travail portant sur la mise en place du BIM au sein de structures gestionnaires d'actifs immobiliers : foncières, bailleurs sociaux et syndicats de copropriété. Ziana Islam (ESTP), l'a été pour son PFE sur le BIM management : mise en place d'un processus BIM sur le chantier Sytcom Saint-Ouen ainsi qu'Aurélié Bruneau (ESGT) pour "L'action foncière au cœur des processus de négociation pour la restauration de la continuité écolo-



Figure 2. Les lauréats du Business Game

gique des rivières – Études de cas sur le bassin de la Dordogne” (figure 3).

Jamais deux sans trois : une récompense de TERIA

Pour la première édition du *Business Game* de l’OGE, la société TERIA s’est engagée à fournir à chaque “Bureau des étudiants” des écoles présentes un chèque d’une valeur de 1 500 € (figure 4).

Avec en poche une coupe, un chèque et un PFE récompensé, les étudiants



Figure 3. De gauche à droite : Ziana Islam, Jean-François Dalbin, Camille Gourguechon, Aurélie Bruneau



Figure 4. Le soutien de TERIA au bureau des élèves

de l’INSA Strasbourg et leurs accompagnateurs sont rentrés satisfaits de cette journée passée à la capitale et se réjouissent de participer à la deuxième édition ! ●

Tania LANDES, pour la spécialité topographie de l’INSA Strasbourg
tania.landes@insa-strasbourg.fr

N.B. : La revue *Géomètre* a également consacré un article à ces heureux événements dans son numéro d’avril 2019.

Prix de l’AFT 2019 pour les Jeunes Ingénieurs diplômés en Topographie

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

Un montant global de 2 000 euros est prévu en 2019, pour attribution en 2020.

Conditions de participation

- être âgé(e) de moins de 26 ans ;
- joindre l’attestation du diplôme d’ingénieur ;
- proposer au comité de rédaction de la revue XYZ un article de 6 pages au moins en français (environ 4 000 mots, avec mots clés et un résumé en français et anglais, en vue d’une publication dans la revue, rajouter une présentation sommaire de son parcours (résumé du *curriculum vitae*) incluant les adresses postale et courriel valides après la sortie de l’école et suivre les consignes aux auteurs qui sont téléchargeables sur le site de l’AFT : www.aftopo.org ;
- soumettre le texte avec une proposition de mise en page (texte / illustrations) sous format PDF et joindre en fichiers attachés le texte seul en format modifiable (docx ou équivalent) avec les images et illustrations aussi en fichiers séparés intégrables (JPG ou équivalent) en résolution de 300 dpi minimum ;
- l’article doit être proposé et rédigé par le (la) candidat(e) seul(e). L’article soumis ne peut pas faire mention de “co-auteur”. Si le candidat souhaite signaler un travail collectif, il ajoutera une note de remerciements introductive ou conclusive de son texte ;
- certifier que l’article n’a pas été soumis ou publié dans une autre revue ;
- la date limite pour la proposition des articles est le 31 octobre 2019 (pour les projets présentés dans les écoles cette année et les précédentes).

L’adhésion à l’AFT, dont l’abonnement à la revue XYZ, pour l’année 2020 sera offerte aux participants.

Comité d’attribution

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

Publication des résultats

- les candidat(e)s seront informé(e)s individuellement des résultats au plus tard le 31 décembre 2019 ;
- les résultats du concours seront publiés dans la revue XYZ dans l’année suivant la publication des résultats ;
- le président du jury du prix et/ou la présidente de l’AFT remettront le ou les prix à l’occasion d’une manifestation organisée par l’AFT.

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

Le monde en sphères, une très belle exposition à la Bibliothèque nationale de France

■ James LEQUEUX, Astronome honoraire à l'Observatoire de Paris

La Bibliothèque nationale de France (BnF) présente du 16 avril au 21 juillet 2019 une exposition consacrée aux globes célestes et terrestres. Pour ceux de nos lecteurs qui n'auront pas la possibilité de la visiter, une remarquable exposition virtuelle lui est consacrée, accessible gratuitement sur <http://expositions.bnf.fr/monde-en-spheres>.

Près de 200 œuvres splendides y sont présentées, dont une cinquantaine de globes et de sphères armillaires ; la plupart appartiennent à la BnF et n'ont pas été souvent montrées malgré leur beauté et leur intérêt.

L'exposition s'ouvre sur une réalisation extraordinaire datant de la fin du règne de Louis XIV, qui est probablement une réplique d'un objet perdu destiné au Roi : une sphère armillaire géocentrique avec un mouvement d'horlogerie actionnant le Soleil et quelques planètes (*Figure 1*). C'est un témoignage de l'engouement de l'époque pour les sphères célestes et terrestres, éventuellement animées. Les globes célestes sont beaucoup plus anciens que les globes terrestres, ce qui n'est pas pour nous étonner : on connaissait beaucoup mieux le Ciel que la Terre dans l'Antiquité, bien qu'on ait vite réalisé qu'elle était ronde et non plate (assez curieusement, on trouve encore à l'heure actuelle des gens qui croient que la Terre est plate !). L'exposition met bien en évidence l'omniprésence de la sphère dans l'Antiquité et le Moyen Âge, qu'il s'agisse de la Terre, de la sphère céleste et des nombreuses sphères



Figure 1. Sphère armillaire géocentrique et "mouvante" grâce à un mécanisme d'horlogerie situé dans la boîte supérieure. Jérôme Martinot, entre 1709 et 1718. Cuivre et bois doré.

qui étaient censées porter et mouvoir le Soleil, la Lune et les planètes. Le globe céleste le plus ancien connu (2^e siècle av. J.-C.), récemment découvert, est présenté à l'exposition (*Figure 2*). Les constellations qu'il représente remontent à Eudoxe (vers 400 av. J.-C.) et sont décrites dans *Phænomena* d'Aratus (275 av. J.-C.) : elles seront reprises sans grand changement par Ptolémée jusqu'à ce que les navigateurs portugais et hollandais introduisent quelques constellations australes aux XV^e et XVI^e siècles. D'autres constellations seront définies plus tard, notamment par Hévélius et par La Caille. L'exposition permet de suivre ces développements à partir de manuscrits, de livres imprimés comme l'*Astronomicum Cæsareum* d'Apia-

nus (1540), de gravures (notamment les magnifiques gravures sur bois de Dürer qui datent de 1515), d'atlas célestes du XVII^e et du XVIII^e siècles et bien entendu de globes. L'astronomie arabo-musulmane est bien représentée par de nombreux manuscrits et globes célestes. Cependant le premier globe céleste occidental connu, qui est présenté à l'exposition, n'a été fabriqué qu'en 1502 en Italie ou en Europe centrale.

Le premier globe terrestre connu est également présenté à l'exposition sous la forme d'un fac-similé, car l'original de 1492, réalisé par Martin Behaim est très abîmé : bien entendu, il ne présente pas encore l'Amérique. Celle-ci figure pour la première fois, avec le nom d'America, sur un globe



Figure 2. Le plus ancien globe céleste connu date du 2^e siècle av. J.-C. En argent, d'un diamètre de 6,3 cm, il fait partie de la collection Kugel à Paris.

attribué à Martin Waldseemüller et réalisé dès 1506 environ (*Figure 3*). Sur ce globe, la côte ouest de l'Amérique, qui est encore inconnue, est représentée de façon fantaisiste et des îles imaginaires se trouvent entre cette côte et l'Asie. Dans le beau globe en cuivre dit "des Welser", dû à Christoff Schniepp (Augsbourg, 1575), le Japon, localisé trop au sud, n'est séparé que par un étroit bras de mer de cette côte ouest qui commence pourtant maintenant à être explorée. La très grande carte de Sébastien Cabot (Anvers 1544), est plus proche de la réalité bien qu'un peu antérieure. La méconnaissance des longitudes était telle à l'époque que le continent eurasiatique était trop étendu dans le sens est-ouest de plusieurs milliers de kilomètres, ce qui laissait peu de place entre l'Amérique et l'Asie. On a bien mesuré pour la première fois la différence de longitude entre Tolède et l'actuelle Los Angeles en profitant de l'éclipse de Lune du 23 septembre 1577 (le résultat est 99° au lieu de 94° 49', ce qui n'est pas si mal) ; mais cela n'a pas résolu pour autant le problème de l'étendue de l'Eurasie.

Les sphères terrestres et célestes vont devenir extrêmement populaires à partir du XVII^e siècle, que ce soit à l'usage des navigateurs et des géographes, comme objets didactiques ou comme symboles de puissance. L'exposition montre de nombreux globes de cette époque, ainsi que des médailles et de belles peintures où ils sont représentés, par exemple un portrait de Colbert réalisé

par Claude Lefèvre en 1666. Ces globes proviennent de Hollande, puis d'Italie avec Coronelli dont les deux globes géants de 1683 sont exposés en permanence dans le hall Ouest de la BnF, et enfin de France avec Nicolas Bion, l'abbé Nollet et d'autres. Nollet commercialisait en 1733 des paires de globes, céleste et terrestre, pour 335 livres, correspondant à environ 1 850 euros. Delamarche en fournissait encore en 1815 pour un montant sensiblement équivalent. On trouve aussi dans l'exposition quelques rares globes terrestres en relief, notamment le spectaculaire objet réalisé en 1788 pour l'éducation du dauphin par Edme Mentelle et Jean Tobie Mercklein. Une sphère armillaire française géocentrique de 1725 est exposée concurremment à une sphère héliocentrique. Il est vrai que les astronomes de notre pays étaient très conservateurs et n'ont vraiment adopté le modèle copernicien qu'après que la découverte de l'aberration par Bradley en 1725 ait définitivement mis à mal les modèles de Ptolémée et de Tycho Brahe.

L'exposition montre quelques-uns des ouvrages emblématiques de l'astronomie à l'époque classique, qui illustrent notamment la défense de Newton par Voltaire et par Maupertuis, dans une vitrine consacrée à la forme de la Terre. On reste cependant un peu sur sa faim à propos de cette question qui a occupé la première moitié du XVIII^e siècle. On



© Bibliothèque Nationale de France, département des Cartes et plans.

Figure 3. Globe terrestre dit "Globe vert", attribué à Martin Waldseemüller, vers 1506. La côte ouest de l'Amérique est totalement imaginaire.



© Bibliothèque nationale de France, département des Estampes et de la photographie.

Figure 4. Exposition universelle de 1900 : la tour Eiffel et le globe céleste.

ne peut qu'être satisfait, en revanche, de parcourir la dernière partie de l'exposition qui propose une belle collection de globes des XIX^e et XX^e siècles, qui prennent toutes sortes de formes et les dimensions les plus variées, jusqu'au gigantesque globe céleste de Paul-Louis Galeron, clou de l'Exposition universelle de 1900 (*figure 4*). Elle se termine par quelques œuvres contemporaines que nous laissons au visiteur le plaisir de découvrir par lui-même.

En résumé, une exposition très réussie, tant par la beauté et l'intérêt des objets exposés que par sa scénographie et ses qualités didactiques. On remarquera en particulier, parmi les dispositifs multimédia, les écrans interactifs qui permettent d'observer sous toutes leurs faces plusieurs des globes les plus importants présentés dans l'exposition et d'en voir les détails convenablement grossis. ●

Pour en savoir plus :

Le Monde en sphères, catalogue d'exposition, sous la direction de Catherine Hofmann et de François Nawrocki. Relié, 272 pages, 175 illustrations ; BnF-Éditions, 45 €

Le Monde en sphères album, Catherine Hofmann et François Nawrocki, 48 pages, 50 illustrations ; BnF-Éditions, 14,90 €

Journées de la Topographie 2019 : l'intelligence artificielle et la topographie

Chaque année depuis 2003, les journées de la topographie (JDT) constituent un événement majeur de la rentrée à l'INSA Strasbourg. Elles auront lieu du mercredi 25 septembre 2019 au vendredi 27 septembre 2019, autour des soutenances de projets de fin d'études.

Attention, l'inscription se fait en ligne cette année, avec un formulaire spécifique pour les entreprises souhaitant exposer et un formulaire pour les participants non exposants.

Les étudiants en charge de l'organisation ont été détectés par intelligence non artificielle au sein des classes de 3^e et de 4^e année ingénieurs (voir résultat en figure 1). Ils vous réservent de belles surprises !

Pourquoi un thème sur l'intelligence artificielle ? Les étudiants y répondent par des questions : "Jusqu'où l'intelligence artificielle peut-elle aider le topographe dans la détection souvent manuelle et la classification des objets "topographiques" ? Remplacera-t-elle à l'avenir le travail du géomètre-topographe dans son analyse de l'espace en vue de le représenter et de l'aménager ? Un thème d'actualité qui mérite d'être décortiqué par des spécialistes !"

Le salon des exposants, un moment

Programme des journées de la topographie 2019

	Mercredi 25 septembre	Judi 26 septembre	Vendredi 27 septembre
8h00	Accueil		
8h30	Soutenances de projets de fin d'études (PFE) Salle topographie	Soutenances de PFE C.115, C.116	Soutenances de PFE Salle topographie
9h00			
10h00			
11h00			
11h30	Annnonce des résultats	Annnonce des résultats	Annnonce des résultats
12h00	Repas	Repas	Repas
13h00			
13h30	Soutenances de PFE Salle topographie	Salon des exposants Salle topographie (+ challenge surprise)	Conférence : "L'intelligence artificielle et la topographie" Amphi De Dietrich
14h00			
15h00			Présentation du métier de géomètre-expert Amphi de Dietrich
16h00			
17h00	Conseil de l'AFT C.116	Cérémonie de clôture des Journées de la topo Salle topographie	
17h30			
18h00			
18h30			
19h00			

d'échange privilégié entre les professionnels et les étudiants, vous donne l'occasion de présenter vos activités. Vous souhaitez tenir un stand ? Les

étudiants ont prévu une inscription en ligne, accessible sur le blog de la topographie (accès par QR code ci-contre). L'argent récolté pour la tenue des stands contribuera intégralement au financement du voyage technique des étudiants topographes en 4^e année. Tous les événements et les soutenances (sauf le conseil de l'AFT) sont ouverts au public.



Scannez-moi



Figure 1. De gauche à droite : Étienne Barçon, Élisabeth Normier, Julian Rebetez, François Potentini, Sabine Amzil, Édouard Jund et Aneesa Cunthen, fusionnés après détection en jdt2019@insa-strasbourg.fr

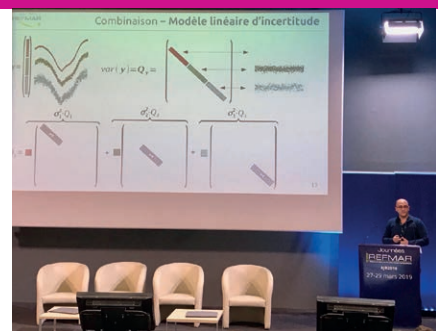
Pour ne rater aucune information, abonnez-vous au blog de la topographie :

<http://topographie.insa-strasbourg.fr/sujet/journees-de-la-topographie/> et rejoignez-nous sur notre page LinkedIn : <https://www.linkedin.com/showcase/topographie-insa-strasbourg>

Contact : jdt2019@insa-strasbourg.fr, avec le soutien de Tania Landes et Hélène Macher

Les soutenances de PFE se dérouleront dans deux salles en parallèle. L'ordre de passage sera communiqué sur le blog de la topographie. Les sujets de PFE abordés cette année sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Mise en place d'un système de mesures de convergences par photogrammétrie
Numérisation 3D du Casino des faienceries et du pavillon De Geiger pour les musées de la ville de Sarreguemines
Mise en place d'une solution de positionnement GNSS précise via smartphone ou tablette – SYSLOR (photogrammétrie et réalité augmentée)
Numérisation 3D des carrières et des œuvres de Montigny à Machedmont (Oise) pour la Mission du Centenaire 14-18
Refuge 44 – Imagerie 3D, réalité virtuelle et augmentée de la Carrière Saingt de Fleury-sur-Orne
Recherche et développement d'outils automatiques/semi-automatiques pour la digitalisation sur du nuage de points
Contrôle de nuages de points relevés par technologie LiDAR et photogrammétrie et mise en place d'une méthode de traitement
Évaluation des nuages de points photogrammétriques pour l'estimation de caractéristiques des forêts de montagne
Automatisation du traitement des traces altimétriques pour la détection des surfaces aquifères et l'estimation des volumes d'eau
Analyse et amélioration des procédures de calcul de nuages de points issus d'un système de scanner cinématique ROBIN PRECISION
Inspection visuelle de grandes structures sous SIG 3D à l'aide de modèles 3D texturés en pleine résolution
Détection des fenêtres dans le nuage de points d'un mur de façade et positionnement semi-automatique dans un logiciel BIM
Interface Génie civil / Équipement : Modélisation automatique de platines pré-scellées et réimplantation de ferrailage
Création d'une plate-forme en ligne de visualisation et de production de données issues de nuages de points
Développement d'un Système d'Information Archéologique partagé à l'échelle de la région pour une exploitation scientifique de la donnée archéologique
Modélisation 3D du château disparu des Wurtemberg à Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine
Rendu 3D et topographie des sites archéologiques d'Eridu et Ur, Irak
Classification de données images et vecteur et de nuages de points, dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg
Optimisation et industrialisation d'un process d'acquisition dans le cadre de relevés MMS (Mobile Mapping Systems) en environnements souterrains
Auscultation automatique d'ouvrages à l'aide de nuages de points : élaboration d'un processus de traitement automatisé
Étude et optimisation des mesures de convergences en tunnel au sein du chantier ligne 15T3C du Grand Paris Express : substitution de la tachéométrie et automatisation du traitement des données
Suivi du bilan hydro-sédimentaire du bassin du lac Tonle Sap par téledétection satellitaire multi-capteur
Création d'un moteur de détection automatique d'éléments ponctuels dans une base de données de scanner dynamique.
Étude et mise en place de solutions de réalité virtuelle et augmentée pour des visites inédites du château du Haut-Kœnigsbourg
Optimisation des modes et méthodes d'acquisition et de traitement de levés de bâtiments par scanner 3D et valorisation de la donnée par maquette numérique
Développement des processus de production et d' évaluation de maquettes numériques pour la rétro-conception, issues de nuages de points d'acquisitions mixtes (bâtiment)
Mise en place de nouvelles méthodes d'acquisition rapides au scanner pour les plans d'architecture - Impacts sur la qualité et la précision
Webmapping 3D : un outil pour l' aménagement du territoire
Étude d'un moyen de visualisation et d'exploitation des données 3D couvrant les parois d'une grotte ornée



Les journées REFMAR 2019 Réseaux de référence des observations marégraphiques

Le Shom (service hydrographique et océanographique de la Marine) est le référent national pour le "niveau de la mer" in situ sur l'ensemble des zones sous juridiction française. À ce titre il assure, au travers de REFMAR, différentes fonctions de coordination en matière de collecte et de diffusion des données publiques relatives à l'observation de hauteurs d'eau, de manière à promouvoir leur utilisation dans de multiples applications.

Le Shom a organisé avec le concours du Ministère de la transition écologique et solidaire (MTES) la 3^e édition des journées REFMAR 2019 à Paris - La Défense. Elle a réuni, du 27 au 29 mars 2019, producteurs de données et usagers des mesures de la hauteur d'eau.

Le programme des 3 journées, comportant une trentaine de conférences, peut être résumé en :

- le niveau marin et le trait de côte le premier jour,
- l'observation du niveau de la mer en méditerranée au profit de la recherche le jeudi,
- les technologies et les réseaux marégraphiques le dernier jour.

Plus d'une vingtaine de posters était exposée, avec une participation française certes, mais aussi une forte présence africaine comme la Tunisie, la Côte d'Ivoire, le Sénégal, l'Algérie et le Bénin.

Concours du Ministère d'accueil aidant, et en marge des conférences et posters, une sensibilisation aux importants sujets d'actualité était dispensée : les submersions marines, la GEMAPI ou gestion des milieux aquatiques et des inondations, les aléas littoraux par le CEREMA puis le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC1 et 2).

Pour en savoir plus : <http://refmar.shom.fr/journees-refmar-2019>



Le 15^e Forum de la topographie Le 28 mars 2019 au lycée Loritz à Nancy

À la suite du lycée Cantau d'Anglet en 2018 c'est celui Henri Loritz de Nancy, le 28 mars 2019, qui a accueilli le Forum de la topographie, toujours nomade, sur le thème "l'immersion numérique en topographie".

Un peu d'Histoire

Le lycée porte le nom de son fondateur, Henri Loritz, professeur et philanthrope, fils d'un lieutenant de la Grande armée. D'abord instituteur apprécié, puis directeur d'école communale, sa renommée grandit rapidement et celle qu'il dirige à Nancy devient, par la qualité de son enseignement, l'une des premières écoles primaires de France. Il innove en créant une formation continue pour adultes, sous la forme d'un enseignement élémentaire et même supérieur. Il souhaite aussi fonder des ateliers spéciaux, qui délivreraient un enseignement professionnel aux ouvriers, contremaîtres et cadres moyens. Les autorités officielles s'opposant à la réalisation de cette idée, il démissionne de l'enseignement public. Henri Loritz achète alors à ses frais une propriété pour y installer un établissement d'enseignement professionnel, le premier fondé en France qui a ouvert ses portes en 1844. La reconnaissance officielle

n'aura lieu qu'en juin 1865. En 1881, son successeur, André Tabellion, doit se résoudre à une restructuration de l'école. Une société par actions, regroupant une grande partie de notables de la région, voit le jour sous l'appellation "École professionnelle de l'Est". L'école privée fondée par Loritz, après plusieurs changements de nom, de statuts et de locaux, deviendra, le 19 février 1966, le lycée public Henri Loritz, général et technologique. Le lycée accueille également des classes préparatoires aux grandes écoles, des classes de BTS et de licence professionnelle, un centre de formation d'apprentis (CFA) et le Greta Lorraine Centre. L'établissement compte plus de 2 000 élèves et mobilise 200 enseignants.

Le Forum de la topographie 2019, organisation et chiffres

Olivier Pallez, proviseur du lycée, les enseignants de la topographie, Béatrice Patizel, Armelle Piègle, et Michel Perri directeur délégué aux équipements technologiques et professionnels ont porté sur place l'organisation de la manifestation. L'amphithéâtre de 200 places du lycée (Figure 1) et un chapiteau spécialement dédié au salon des exposants ont composé un cadre fonctionnel à la réception des 250 participants, accueillis par des étudiants de BTS topo.

Une vingtaine de stands a grandement occupé le salon des exposants ouvert



Figure 1. Les participants du forum dans l'Amphithéâtre du lycée



non seulement aux participants au forum mais également à tous les élèves et étudiants du lycée.

À Nancy, pour la première fois, le forum dont la qualité des conférences est toujours appréciée, et qui font l'objet de restitution dans XYZ, a été reconnu comme journée de formation. Il s'en est suivi un regain de participation des géomètres-experts de la région Grand Est dont l'AFT se félicite.

Des exposés attendus sur le thème "l'immersion numérique en topographie"

C'est Jean-François Hullo, du centre de recherche EDF Energy au Royaume-Uni (Figure 2) qui introduit la journée en posant le vocabulaire à employer et ses définitions. Après les définitions de numérisation (les mesures et modélisations à l'aide de la palette des technologies disponibles) et celles de tel-que-construit (les données issues d'une numérisation de l'existant, au contraire de données de conception), il aborde le dur du sujet :

La réalité virtuelle (Virtual Reality) qui est l'expérience immersive de l'utilisateur dans un environnement purement numérique, utilisant un casque opaque ou parfois des dispositifs de type "cave" (HTC Vive par exemple) ;

La réalité augmentée (Augmented Reality) qui est l'augmentation d'un flux vidéo d'objets digitaux (Apple iPhone par exemple) ;

La réalité mixte (Mixed Reality) qui peut être un casque immersif semi-transpa-



Figure 2. Jean-François Hullo, EDF Energy introduit les conférences.

rent, permettant une réalité augmentée directement dans le champ de vision (Microsoft HoloLens par exemple).

L'exposé de Jean-François, "Virtualiser le réel : une aventure industrielle" fait le point sur les capacités de la réalité virtuelle pour une visualisation aisée de sites complexes ainsi que l'apport d'objets ou éléments en réalité augmentée. Des exemples de conception sous réalité mixte à EDF sont montrés. Jean-François avait également défloré le sujet dans l'éditorial du XYZ 158 de mars, distribué aux congressistes.

C'est ensuite le tour du Pr. Dimitri Konstantas de l'université de Genève et de Yuri Robert du CERN (figure 3) de



Figure 3. Yuri Robert (G) du CERN et Dimitri Konstantas (D) de l'université de Genève exposent la cartographie souterraine.

s'étendre sur le sujet de la cartographie des installations souterraines par l'utilisation de la réalité augmentée. Il s'agit d'un Projet R&D 2017-2019 mené par l'université de Genève en partenariat avec le CERN et les services industriels de Genève. Ces deux dernières entités disposent d'une multitude de réseaux enterrés à gérer. Le projet 3DCity porte donc sur l'acquisition des réseaux visibles à l'aide d'une caméra 3D puis notamment sur la visualisation des réseaux enterrés avec les lunettes de réalité augmentée HoloLens. Pour en savoir plus, l'exposé est restitué sous forme d'article dans ce numéro, pages 25 à 29.



© ICONEM

Figure 4. L'Arc monumental (ou de Septime Sévère) de Palmyre reconstruit par anastylose, Syrie



Nous avons découvert cet hiver une magnifique exposition, à l'Institut du monde arabe : *les cités millénaires, le voyage virtuel de Palmyre à Mossoul*. C'est à un impressionnant survol que vous convient ces cités millénaires, grâce à la projection à très grande échelle d'images inédites captées par des drones et reconstituées en 3D par la société Iconem, avec laquelle l'IMA s'est associée pour cette exposition réalisée en partenariat avec l'Unesco.

Le forum de l'AFT a la chance de disposer de la contribution de Jonathan Chemla, de cette même société Iconem. Il nous emmène ainsi de l'Europe à l'Asie du Sud-Est, et plus récemment dans les zones de conflits du Moyen-Orient où les méthodes de relevés aériens par drones et aussi terrestres statiques permettent de conserver la trace de cités vouées à la destruction. Ainsi le Krak des chevaliers, Palmyre (Figure 4) et Alep en Syrie, Mossoul en Iraq font l'objet de restitutions en 3D, quelquefois à la définition centimétrique pour certains monuments, permettant leur conservation ainsi que l'immersion en 3D des archéologues amateurs et professionnels.

Farouk Kadded de Leica Geosystems termine le tour d'horizon en répondant à la question : comment s'immerger dans la réalité ? Les ensembles de méthodes et d'équipements mis en œuvre par Leica Geosystems sont évoqués, par précision, par portées, par modes d'acquisition statiques ou

dynamiques. Également les matériels de restitution et de publication en réalités virtuelles et augmentées sont montrés, avant de terminer sur la réalité mixte.

Toutes les présentations sont disponibles au format PDF sur le site <http://www.aftopo.org/> depuis la page d'accueil, visitez FORUM de l'AFT 2019.

Le prix de l'AFT et ses deux lauréats

Marion Hinaux et Valentin Girardet, tous deux de l'INSA de Strasbourg et lauréats ex aequo du prix de l'AFT 2018 attribué en 2019, ont reçu leurs prix et également exposé leurs projets de fin d'étude (figure 5). Ceux-ci ont aussi été

publiés dans le numéro 158 (mars 2019) de votre revue XYZ.

Marion Hinaux a présenté la "Mise en place de procédures automatisées pour les reports topographiques en milieu ferroviaire à partir de données photogrammétriques et LiDAR acquises par drones" étude de thème ingénierie au sein de la société Altametrus.

Valentin Girardin a lui présenté la "Numérisation et modélisation 3D du Jardin d'Hiver du Musée de la Faïence de Sarreguemines", une étude patrimoniale qui cadre bien avec le thème du forum puisque ayant débouché sur une immersion dans le nuage de points et sur une visite virtuelle.

L'AFT renouvelle ses remerciements au lycée Henri Loritz pour son accueil et son dévouement à l'organisation du Forum de la topographie 2019. De même l'AFT se félicite de la participation au salon des exposants de l'AFI-GEO, D3e, e-CASSINI, ESCADRONE, GEOFIT, GEOMEDIA, GEOMESURE, GEOPIXEL, GEOTOPO, I3MAP, JSINFO, LEICA GEOSYSTEMS, MICRODRONES, REZO PROCESS, SOGELINK, STONEX, TC ACT, TERIA et TOPCON sans qui le forum ne pourrait pas exister dans cette configuration. ●

Pour le 16^e forum de l'AFT, rendez-vous à Égletons en Corrèze en 2020, date et thème à fixer prochainement.

**Jean-Pierre MAILLARD
Bernard FLACELIÈRE**



Figure 5. De gauche à droite, Rani el Meouche, président du jury du prix, Françoise Duquenne, présidente de l'AFT, Marion Hinaux, Valentin Girardet, les lauréats et Farouk Kadded de Leica Geosystems, partenaire du prix.

© S. Guillemain



3DCity

Cartographie spatiale et outils holographiques pour l'acquisition des données 3D et visualisation des réseaux enterrés

■ Vedran VLAJKI - Mathieu TAPPOLET - Youri ROBERT - Rodolphe FAHRNI - Dimitri KONSTANTAS

Le projet 3DCity, mené par l'Université de Genève en partenariat avec le CERN et les Services industriels de Genève, vise à fournir des solutions innovantes basées sur les technologies de numérisation 3D et de réalité augmentée pour i) les opérations de relevé des réseaux souterrains et ii) la visualisation des réseaux souterrains avant les travaux d'excavation.

■ **MOTS-CLÉS**

Réseaux souterrains, numérisation 3D, réalité augmentée, relevés, HoloLens

2018, puis soigneusement testé en laboratoire pour les mesures de précision. Depuis lors, nous avons mené de multiples essais sur des chantiers de construction, en collaboration avec nos partenaires industriels CERN et SIG (Services Industriels de Genève).

Introduction

Les opérations de relevé des réseaux en fouille ouverte revêtent une importance particulière et sont très consommatrices en ressources. Elles nécessitent un personnel qualifié capable d'utiliser correctement des outils complexes tels que le récepteur GNSS centimétrique, le théodolite, etc. Par ailleurs, l'intervalle de temps disponible pour le relevé des réseaux avant que la fouille ne soit refermée est très court et doit être minimisé. Ces multiples exigences entraînent des coûts élevés, ainsi que des données inexactes ou incomplètes. Il est également très courant que des éléments tels que des câbles, des tuyaux ou autres conduites soient endommagés lors des travaux d'excavation.

Dès lors, apparaît la nécessité de développer de nouvelles méthodes simples, rapides et de haute précision i) pour le relevé des réseaux en fouille ouverte et ii) pour visualiser l'emplacement des réseaux enterrés avant les travaux d'excavation.

3DCity est un projet de recherche et développement mené par l'Université de Genève et financé par Innosuisse. Démarré en mai 2017, ses objectifs principaux sont de :

- permettre aux équipes présentes sur site de générer des modèles 3D des réseaux en fouille ouverte,

- permettre au personnel formé de bureau d'extraire des données SIG à partir des modèles 3D réceptionnés, conformément aux normes en vigueur,
- permettre au personnel formé de bureau de convertir les données SIG contenues dans les bases de données cadastrales en modèles 3D géolocalisés,
- permettre aux équipes présentes sur site de visualiser les modèles 3D des réseaux enterrés à leur emplacement précis dans l'environnement.

Un prototype fonctionnel des solutions a été complété avec succès en février

Solution de relevé

La première partie du processus de relevé consiste à utiliser une caméra 3D pour recueillir des mesures géométriques des surfaces du réseau de conduites. Comme le marché de la vision par ordinateur devrait continuer de croître à un rythme soutenu, diverses entreprises technologiques investissent massivement dans la recherche et le développement de nouvelles caméras 3D portables, toujours plus performantes et moins coûteuses. Pour notre projet de recherche, nous avons sélectionné la caméra stéréoscopique

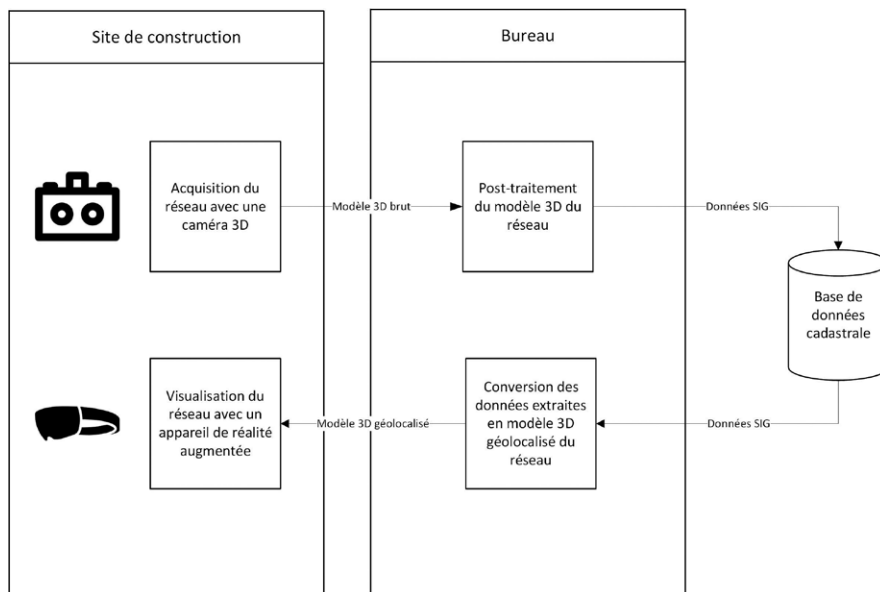
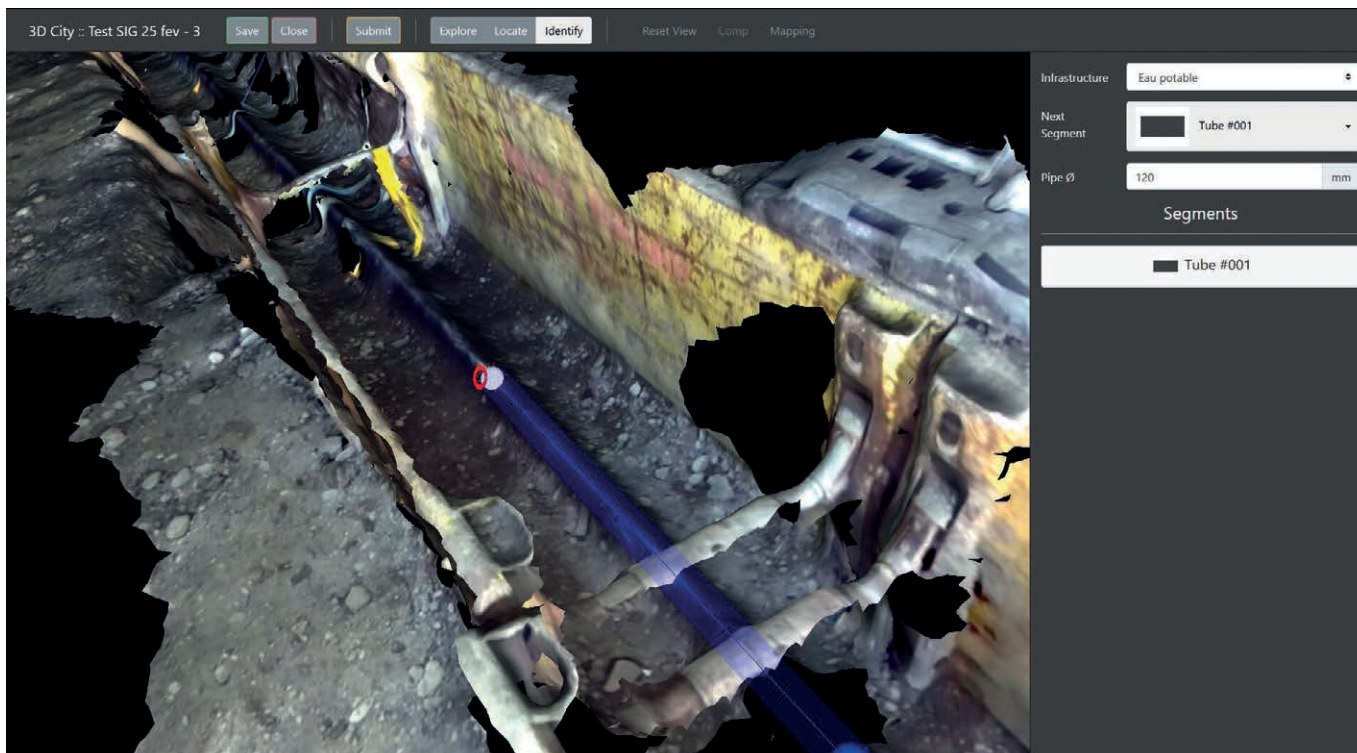


Schéma du cycle des données : de l'acquisition à la visualisation



Tracé des conduites par-dessus la scène brute dans l'application CAO



ZED produite par la société américaine StereoLabs. Elle s'inscrit dans notre objectif de fournir une solution simple (aucune expérience requise), rapide et de haute précision pour les opérations de relevé. Il suffit en effet de connecter la caméra à un ordinateur portable équipé d'un port USB3, puis de lancer l'enregistrement depuis l'application de numérisation. La longue portée de la caméra (jusqu'à 20 m), et la fonctionnalité intégrée de mappage de texture qui facilite le travail ultérieur avec le modèle 3D dans une application CAO, comptent parmi ses avantages significatifs. Une fois l'enregistrement terminé, le modèle 3D est généré et les textures projetées. Ce traitement lourd en calculs peut être exécuté directement sur site en temps réel (sur des ordinateurs portables équipés d'un GPU haut de gamme) ou par la suite sur un ordinateur de bureau.

La scène brute ainsi obtenue est composée d'une seule surface dont le point d'origine est arbitraire. En tant que telle, elle n'offre aucune utilité immédiate en termes de données SIG, même si elle peut être considérée comme précieuse en soi (visualisation, calcul des volumes, etc.). Heureusement, la plus grande partie de la géométrie des réseaux enterrés admet des représentations paramétriques explicites basées

sur des formes simples comme des cylindres ou des parallélépipèdes généraux. Le faible nombre de paramètres permet à un opérateur humain d'utiliser un logiciel de modélisation pour "nettoyer" assez rapidement la scène brute, en remplaçant des ensembles non organisés de polygones acquis par numérisation par des formes géométriques paramétriques, qui peuvent être associées à des métadonnées (par exemple matériaux utilisés, diamètres, numéros des pièces). Pour obtenir des données SIG, nous devons donc i) géolocaliser la scène, ii) recréer le tracé du réseau de conduites, et iii) exporter les données significatives dans le format requis. Ces tâches peuvent être exécutées avec l'application CAO spécialisée que nous avons développée pour le projet.

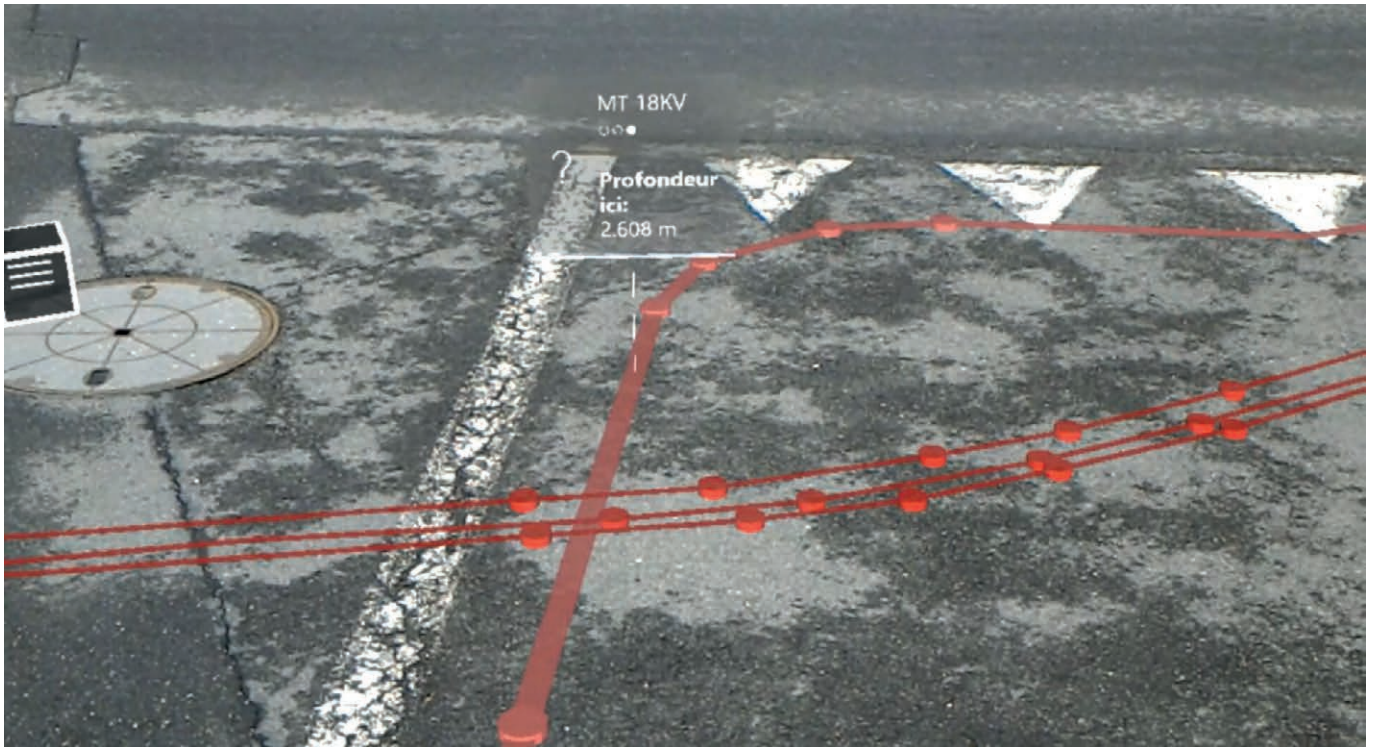
• Pour géolocaliser la scène à l'aide de notre application, nous devons identifier manuellement au moins trois points de référence ayant des coordonnées connues, tels que des marqueurs géodésiques ou des extrémités de conduites déjà existantes (et visibles). Le site de construction ne présentera parfois pas de points facilement exploitables. Dans ce cas, l'idée est de se rabattre sur des points de référence "artificiels" – par exemple

une marque pulvérisée sur le sol dont les coordonnées seront fournies par un appareil GNSS centimétrique.

- La phase suivante consiste à dessiner le plus précisément possible le tracé des conduites par-dessus la scène brute. De nombreux algorithmes d'assistance prenant en compte divers paramètres (comme le diamètre des conduites) ont été implémentés pour aider l'utilisateur et optimiser le travail. Il est possible de travailler simultanément sur plusieurs types de réseaux, de changer le type de segment (par ex. coude au lieu de droit), de fendre des conduites, etc.
- Enfin, les données significatives (coordonnées des nœuds, formes, métadonnées) contenues dans la scène peuvent être extraites, transformées dans le format exploitable par le SIG visé, puis soumises pour examen ou traitement ultérieur.

Solution de visualisation

Une localisation approximative des réseaux enterrés par les équipes de construction, basée sur des plans parfois inexacts, peut avoir de graves conséquences lors de l'excavation : blessures importantes, voire même décès, réparations à entreprendre, retards de construction. Afin de permettre une



Affichage des réseaux enterrés et aides visuelles sous forme d'hologrammes

visualisation utile et géolocalisée des réseaux enterrés existants (ou futurs) dans le cadre du chantier, nous avons développé une solution fonctionnant sur un dispositif d'augmentation holographique, à savoir HoloLens. Annoncé au 21 janvier 2015 comme une innovation scientifique majeure, HoloLens de Microsoft fonctionne sous Windows 10, et est décrit comme l'ordinateur holographique le plus avancé au monde. Il permet à l'utilisateur de visualiser et d'interagir avec le contenu holographique incrusté dans l'environnement. De plus, HoloLens génère et maintient en temps réel un modèle 3D de son environnement immédiat (cartographie spatiale).

Lorsqu'un appareil HoloLens est mis sous tension, sa position spatiale initiale définit l'origine (0, 0, 0) du système de coordonnées. Tous les hologrammes sont affichés par rapport à ce point d'origine. Cependant, pour géolocaliser notre scène et visualiser les réseaux de conduites à leur position spatiale exacte, nous devons utiliser le système de coordonnées du monde réel. Sur HoloLens, nous pouvons afficher un curseur spatial qui indique où le regard de l'utilisateur se pose dans l'environnement. Son principe de fonctionnement peut être comparé à un rayon laser

partant d'entre les yeux de l'utilisateur, et représenté mathématiquement par un vecteur. Lorsque l'utilisateur déplace son regard, le rayon est intersecté avec la surface la plus proche de l'environnement cartographié en temps réel par l'appareil, afin de déterminer les composantes et la longueur du vecteur. Nous pouvons dès lors cibler des points sur les surfaces environnantes avec le curseur, puis les mettre en relation avec une liste de points de référence connus dont les coordonnées ont été stockées dans l'application. Dès que deux points ont ainsi été identifiés (ancres spatiales), nous pouvons calculer avec précision la position et l'orientation de l'appareil, et par conséquent utiliser cette information pour transformer toutes les coordonnées relatives en coordonnées géolocalisées du monde réel.

Une fois la position de l'appareil connue, l'application peut afficher les réseaux (ou fourreaux) sous forme d'hologrammes géolocalisés. En fonction de leur visibilité, les éléments des réseaux sont représentés par leurs lignes de contour (cachés sous le sol) ou par des volumes pleins (fouille ouverte). Pour visualiser le site de manière à aider l'utilisateur à mieux percevoir la position des hologrammes "flottant" dans l'espace, les lignes de projection et les distances

entre chaque nœud et la surface du sol la plus proche sont calculées et diffusées en temps réel. L'utilisateur peut également creuser un « trou virtuel » en ciblant deux points au sol. Une représentation en coupe verticale 2D du trou incluant des informations contextuelles supplémentaires, telles que les distances entre les conduites s'y trouvant, est alors calculée en temps réel et affichée dans une fenêtre flottante.

Essais de précision en laboratoire

■ Environnement

Les essais ont été réalisés dans un espace intérieur de taille moyenne, avec une bonne luminosité et sans lumière artificielle. Plusieurs points de référence ont été placés à travers la pièce et leurs coordonnées ont été mesurées aussi précisément que possible à partir d'un point arbitraire d'origine. La caméra ZED que nous utilisons pour la numérisation 3D est basée sur une vision stéréoscopique RVB passive, ce qui signifie que la qualité du résultat est corrélée au nombre d'apparitions non ambiguës des points de l'image. Elle est donc mieux adaptée aux espaces extérieurs richement texturés, tels que les sites de construction.





■ *Tracé de conduites*

Nous avons assemblé un petit tracé de conduites en PVC brun brillant, positionné verticalement sur le sol en appui sur les extrémités de deux segments droits, et composé comme suit :

- 3 segments droits, d'un diamètre de 60 mm et d'une longueur de 1000 mm,
- 2 segments coudés à 87°, d'un diamètre de 60 mm.

Huit nœuds utiles pour les mesures ont été définis. Chaque segment a un nœud à ses extrémités. De plus, les segments coudés ont un troisième nœud équidistant des deux autres. Dans une représentation 3D, les nœuds sont au centre du plan de coupe des segments. Afin de permettre une identification répétable et précise de l'emplacement des nœuds lors de l'étape de traitement avec l'application CAO, nous avons collé des marqueurs colorés sur la surface extérieure des segments. La distance entre les nœuds correspond à la distance entre les marqueurs, et a été mesurée manuellement le plus précisément possible. Il est à noter que le réseau n'est pas parfaitement symétrique, en raison de l'angle du coude et des distorsions créées par l'orientation et le verrouillage imparfait des segments.

■ *Résultats : précision des relevés*

La scène a été numérisée avec la caméra 3D, puis traitée avec l'application CAO que nous avons développée. Les coordonnées spatiales des nœuds ainsi obtenues ont ensuite été comparées aux mesures effectuées manuellement. L'imprécision mesurée dans les conditions de laboratoire (environnement contrôlé, essais répétés et travaux effectués par les ingénieurs en charge du projet) était d'environ 2 cm en moyenne.

Min Erreur	0.2 cm
Max Erreur	4.7 cm
Moyenne	1.9 cm
SD1 68 %	1.2 cm
SD2 95 %	2.4 cm

■ *Résultats : précision de positionnement lors de la visualisation*

En considérant que toutes les coordonnées spatiales du tracé sont

parfaitement exactes, on peut postuler que la totalité de l'imprécision de positionnement des hologrammes lors de la visualisation est due i) à la distorsion des distances par l'appareil, et ii) à la géolocalisation initiale de l'appareil par le positionnement manuel des ancrs spatiales.

• *Imprécision due à la distorsion des distances par l'appareil.*

Il est facile de vérifier si l'appareil respecte la distance entre deux points représentés sous forme d'hologrammes dont les coordonnées sont connues. Pour ce faire, il suffit de marquer avec un stylo leur emplacement lorsque intersectés avec un espace plat, puis d'en mesurer la distance et vérifier si celle-ci correspond aux données. Après avoir effectué de nombreuses mesures, nous avons déterminé que l'inexactitude due à l'appareil est non significative, largement inférieure à 1 cm. Sachant cela, nous pouvons conclure que l'imprécision du placement des hologrammes est presque entièrement due à l'imprécision créée lors du placement manuel des ancrs.

• *Imprécision due à la géolocalisation de l'appareil.*

Le dispositif est géolocalisé en positionnant au moins deux ancrs spatiales sur des points de référence dont les coordonnées sont connues. Pendant les tests, chaque ancre a été positionnée grossièrement à l'aide du curseur spatial de l'appareil, puis ajustée avec les outils de translation et de rotation jusqu'à ce qu'elle semble parfaitement en place. Afin de mesurer l'imprécision, une "cible" de 1 cm a été imprimée, puis centrée sur l'emplacement théorique parfait de l'axe du tracé en intersection avec le sol. En remplaçant l'hologramme du segment par une ligne axiale centrale, nous avons pu déterminer l'imprécision équivalente à la distance entre le point d'intersection de la ligne avec la cible et le point central de la cible. Selon l'angle de vue, l'imprécision était en moyenne d'environ 2 cm.

Évaluation sur site des cas d'utilisation

Les solutions développées au cours du projet ont été évaluées sur plusieurs

chantiers de construction, en collaboration avec M. Youri Robert, responsable topographie et SIG au CERN, et M. Jean-Rodolphe Fahrni, responsable des projets géomatiques aux Services Industriels de Genève. Au-delà des deux cas d'utilisation que nous avons identifiés, testés et présentés ci-dessous, d'autres possibilités peuvent bien entendu être envisagées.

■ *Relevé sur site et extraction des données SIG à l'aide de la caméra 3D*

Le relevé traditionnel nécessite du personnel qualifié sur le site et du matériel coûteux. En raison des nombreux sites à couvrir pendant la journée, la disponibilité du géomètre est souvent limitée. Son absence peut retarder l'avancement des travaux, car la fouille ne peut être refermée avant que les mesures ne soient terminées. De plus, et sur la base d'informations obtenues lors des entretiens, les mesures par GNSS ne peuvent être effectuées dans environ trente pour cent des cas (notamment en ville) parce que le signal réceptionné est trop faible. Par conséquent, les travailleurs doivent descendre dans la fouille pour prendre les mesures à la main, ce qui est lent, dangereux et sujet à l'erreur.

La solution basée sur la caméra stéréoscopique résout les problèmes susmentionnés. En effet, la numérisation 3D peut être effectuée par les équipes déjà présentes sur le site, au moment le plus opportun, sans compétences particulières ou équipement sophistiqué – soit avec une simple application d'enregistrement vidéo nécessitant un ordinateur portable et une caméra 3D peu coûteuse. Sur la base du modèle 3D généré, le géomètre peut ensuite dessiner les tracés tout en restant à son bureau, ce qui élimine les nombreux déplacements quotidiens et réduit considérablement les coûts. Enfin, si les conditions météorologiques et l'éclairage sont acceptables, la numérisation 3D fonctionne dans les cas où le signal GNSS n'est pas disponible ou insuffisant.

Les résultats des essais de performance et de précision sont basés sur 15 opérations de relevé que nous avons



réalisées sur les chantiers des Services Industriels de Genève, dont 58 vidéos 3D et 42 tuyaux. En moyenne, nous avons constaté une différence d'environ 7 cm par rapport aux mesures traditionnelles effectuées avec un récepteur GNSS centimétrique. Le temps consacré au relevé sur place a été réduit de 60 %, et le temps de post-traitement passé au bureau de 25 %.

■ Assistance holographique pour le marquage au sol du tracé de réseaux

Les réseaux enterrés sont souvent identifiés par des lignes colorées marquées au sol avant les travaux d'excavation. C'est une tâche fastidieuse, lors de laquelle le responsable doit mesurer et déterminer avec exactitude l'emplacement des lignes point par point avant le marquage. Les techniques holographiques permettent non seulement de gagner beaucoup de temps, mais aussi de réduire les erreurs humaines pouvant avoir de graves conséquences. Suite à la géolocalisation de l'appareil, notre application se base sur son analyse de l'environnement en temps réel, afin de calculer et projeter le tracé des réseaux au niveau du sol. L'utilisateur peut dès lors simplement suivre l'affichage pour effectuer le marquage. Sur la base de plusieurs tests effectués sur les chantiers des Services Industriels de Genève, nous avons constaté que le travail était réalisé environ quatre fois plus rapidement avec le support holographique par rapport à la méthode traditionnelle.

Conclusions et perspectives

Nous avons examiné les méthodes et avantages de l'utilisation des technologies de numérisation 3D, de réalité augmentée, et des logiciels spécialisés, pour faciliter les travaux de relevé et de maintenance des réseaux enterrés. Bien que nous reconnaissons que nos solutions ne peuvent être appliquées à toutes les tâches et situations, nous sommes très encouragés par les résultats obtenus. Ceux-ci démontrent de nombreux avantages concrets, réalisés dans le cadre de l'environnement complexe de chantier. Les processus et les logiciels que nous avons développés

pour atteindre nos objectifs sont résumés ci-dessous.

En ce qui concerne l'acquisition et la transformation des données, nous avons pu utiliser une caméra stéréoscopique pour générer un modèle 3D de tracés complexes et diversifiées de conduites en fouille ouverte. Ces données brutes composées de surfaces spatiales ont ensuite été traitées dans notre application CAO, où l'utilisateur peut géolocaliser le modèle à l'aide de points de référence identifiés dont les coordonnées sont connues, recréer une représentation paramétrique du réseau avec des outils assistés, ajouter diverses métadonnées, et enfin extraire les données SIG dans le format requis. Pour nous assurer de la précision obtenue, nous avons effectué des essais de laboratoire détaillés et conclu que la différence par rapport aux mesures manuelles était en moyenne d'environ 2 cm.

En ce qui concerne la visualisation holographique des réseaux enterrés, nous avons développé une application permettant d'afficher de manière géolocalisée des tracés complexes à partir des données SIG extraites des bases de données cadastrales. De multiples aides visuelles et fonctionnalités – lignes de projection, calcul de distances, excavations virtuelles – ont été mises en œuvre de manière à fournir une solution vraiment utile pour les utilisateurs. Nous avons effectué des essais en laboratoire pour déterminer la précision du placement des hologrammes dans l'environnement, et conclu que l'imprécision était presque entièrement due à l'erreur humaine lors de la géolocalisation de l'appareil, qui est d'environ 2 cm en moyenne.

Afin de comparer notre solution aux méthodes conventionnelles, tous les processus et outils logiciels développés au cours du projet ont été testés et validés sur plusieurs chantiers, tant par les développeurs que par des professionnels du domaine. Le temps nécessaire pour effectuer les relevés a été réduit de 60 % dans certains cas, tout en maintenant une précision suffisante par rapport à un relevé classique. La visualisation holographique des lignes de projection au sol des réseaux

de conduites avant excavation a permis de tracer les marquages environ quatre fois plus rapidement que la méthode plan/kutch, tout en étant plus fiable en raison de l'absence de possibles erreurs humaines de mesure.

Parmi les difficultés à surmonter, on peut noter l'absence de points de référence connus et facilement identifiables sur certains chantiers. La solution consiste à créer des points artificiels à l'aide d'un récepteur GNSS centimétrique. Aussi, la qualité du modèle 3D réalisé avec la caméra stéréoscopique doit être validée avant la fermeture de la fouille. Cela ne peut actuellement se faire que sur un ordinateur équipé d'un GPU haut de gamme – pas forcément disponible sur le site – impliquant donc d'éventuels transferts de fichiers de données volumineux par un réseau mobile 4G. Enfin, les changements organisationnels nécessaires à l'adoption de ces nouvelles approches ne sont pas négligeables. D'autres études et essais seront certainement nécessaires pour fournir des preuves supplémentaires de fiabilité et de précision des solutions développées. ●

Contacts

Vedran VLAJKI – Université de Genève
Vedran.Vlajki@unige.ch

Mathieu TAPPOLET – Université de Genève
Youri ROBERT – CERN

Rodolphe FAHRNI – Services Industriels de Genève

Dimitri KONSTANTAS – Université de Genève

ABSTRACT

Key words: Underground networks, 3D scanning, surveying, augmented reality, HoloLens

The 3DCity project, led by the University of Geneva in partnership with CERN and Services Industriels de Genève, aims to provide innovative solutions based on 3D scanning and augmented reality technologies for i) underground networks surveying operations, and ii) visualization of hidden infrastructure elements prior to excavation.

Topcon, acteur majeur de la sécurité du Grand Paris Express

Un projet colossal – 68 nouvelles stations de métro, 200 km de tunnels en construction et 38.5 milliards d'euros de budget ! Tels sont les chiffres du Grand Paris Express.

La protection des personnes et des biens dans un projet d'une telle envergure est primordiale et passe par la surveillance en temps réel de l'ensemble des infrastructures existantes dans la zone du chantier : bâtiments, voies ferrées, routes... Le moindre mouvement doit être mesuré et analysé au plus vite.



Une technologie de pointe

Les stations Topcon MS, spécialement conçues pour ces besoins de surveillance et disponibles en version 0,5 et 1" répondent parfaitement aux contraintes techniques du projet (précision millimétrique, robustesse éprouvée pour un fonctionnement en extérieur 24h/24, 7j/7, 365j/an).

« Nous avons retenu les stations totales de Topcon non seulement pour leurs caractéristiques métrologiques mais aussi pour leur robustesse et leur précision. » affirme Vincent Lamour, PDG de Cementys, l'un des prestataires spécialisés en surveillance structurelle impliqué dans ce projet d'infrastructure.

TOPCON

DELTA WATCH



Une intégration facilitée

Topcon sait s'adapter aux besoins de chaque marché et offre la possibilité aux intégrateurs de piloter les stations Topcon MS avec leur propre solution. Ainsi, Vincent Lamour précise : « Nous avons été à même d'intégrer cette technologie ouverte à la perfection dans notre système de gestion de données global, comprenant également d'autres capteurs. Qui plus est, nous avons bénéficié du soutien efficace du service technique Topcon durant toute la phase d'intégration. »

Topcon, acteur majeur

A ce jour, Topcon est l'un des tout premiers fournisseurs de stations d'auscultation automatisée dans le cadre du Grand Paris Express et le déploiement n'est pas terminé.

Des solutions complètes pour tous les chantiers

Au-delà de projets aussi importants, Topcon offre une gamme complète de solutions clés en mains pour l'auscultation automatisée. En plus des stations MS, la gamme « Monitoring » propose le boîtier Delta Link de pilotage des stations et le logiciel complet Delta Watch, base de données d'analyse des mesures et de gestion des alertes.

Les 4^e années de l'INSA de Strasbourg en voyage d'étude en Croatie

■ Aneasha CUNTHEN - Victor MARTIN - Sabine AMZIL

Au cours de notre quatrième année au sein de la spécialité Topographie de l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, nous avons eu l'opportunité de réaliser un voyage technique dans le pays de notre choix. Cette année, nous nous sommes envolés vers la Croatie et sa deuxième plus grande ville, Split, pour une durée totale de 4 jours (du mercredi 3 avril au samedi 6 avril 2019). Le financement de ce voyage a été possible notamment grâce à diverses actions menées, comme la vente de gâteaux aux Journées de la Topographie 2018, la distribution de journaux ou encore la vente de repas à la cafétéria de notre école. Cette étape de notre cursus nous a permis de découvrir une vision de notre domaine d'étude à l'étranger, grâce aux rencontres faites avec des professionnels et des étudiants au cours de nos différentes visites techniques. De plus, nous avons également pu découvrir la ville de Split et son centre historique grâce à une visite guidée piétonne.

Notre première visite fut l'Institut Hydrographique de Croatie le jeudi matin (<http://www.hhi.hr/en/staticpages/index/aboutinstitute>). Nous avons été accueillis par M. Ante Kolić cartographe nautique et éditeur de cartes marines, qui était responsable de la visite. Cette dernière s'est déroulée en quatre étapes. La première fut la découverte du département hydrographique. Il est responsable des levés bathymétriques et de la modélisation des fonds marins pour la production des cartes maritimes et des plans de ports. Ces données doivent être renouvelées tous les cinq à vingt ans selon la demande. Ce département participe également à divers projets pour la protection de la mer Adriatique, tels que des études hydrographiques pour la pose de câbles sous-marins ou pour la localisation des objets ferromagnétiques ou explosifs sous les fonds marins.

Le deuxième département que nous avons visité est celui de l'océanographie, dont les principales tâches sont l'étude des dynamiques de la mer Adriatique comme les courants marins, la géologie des fonds marins ou encore les propriétés hydroacoustiques.

Le troisième département est celui de la cartographie. Il est chargé de produire des cartes physiques et informatiques à différentes échelles de la côte Adriatique et des îles avoisinantes appartenant à la Croatie.

Enfin, l'équipe de l'Institut nous a présenté son musée, non pas destiné au public mais qui a pour but d'archiver leurs anciennes méthodes de travail et appareils utilisés antérieurement.



Échosondeur analogique Atlas DESO 10, années 70.





M. Ante Kolić, accompagné du personnel ayant participé à notre accueil, a conclu la visite en offrant à chaque étudiant un catalogue contenant des cartes marines et des ouvrages nautiques (http://www.hhi.hr/uploads/publications/HHI_Katalog_2018.pdf) ainsi qu'un livre sur la première cartographie de l'Adriatique pour le département de topographie de l'INSA.

Enfin, nous avons pu assister à une visite guidée de la ville de Split le jeudi après-midi. C'est la deuxième plus grande ville de Croatie après Zagreb, avec plus de 170 000 habitants. Située sur la côte Adriatique, la ville a été aménagée dans l'enceinte des restes de l'ancien palais Dioclétien bâti au IV^e siècle. Ce dernier est inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1979. Parmi les vestiges que nous avons pu visiter se trouvent le mausolée de Dioclétien, la cathédrale St-Domnius, la statue de Grgur Ninski, le péristyle, le vestibule, les souterrains ainsi que la promenade Riva. L'ancienne ville est remplie de petites ruelles sympathiques et ne peut se visiter qu'à pied. Les plus courageux se sont rendus par la suite sur la colline de Marjan afin de profiter d'une belle vue sur la ville.

Enfin, la dernière étape de notre voyage technique fut la visite de la Faculté de Génie Civil, d'Architecture et de Géodésie de l'Université de Split, et plus précisément du département de Géoinformatique et de Géodésie le vendredi matin (<http://gradst.unist.hr/eng/organisation/departments/geodesy-and-geoinformatics>).



Les étudiants visitent la Faculté de Génie Civil, d'Architecture et de Géodésie de l'Université de Split.

La licence proposée par la faculté se déroule sur quatre ans et aborde les thématiques suivantes : photogrammétrie, télédétection, droit foncier, SIG, géodésie, hydrographie, etc. A l'issue de cette licence, les étudiants ont le choix entre continuer en master ou travailler en tant qu'ingénieur dans un cabinet de géomètre-expert ou d'autres organismes de topographie. Le titre de géomètre-expert (*sworn land surveyor*) s'obtient à l'issue du master.

A notre arrivée, nous avons été accueillis par Mme Martina Baučić, vice-présidente du département et enseignante en photogrammétrie. Nous avons commencé par visiter l'ensemble du campus universitaire. Nous avons vu des anciens bâtiments datant de la période de la guerre ainsi que ceux récemment rénovés. Parmi eux, nous avons pu voir la plus grande bibliothèque du campus, des cafés

réservés aux étudiants ainsi que les dortoirs qui se trouvent juste à proximité des universités. Suite à la visite, deux étudiantes de notre classe ont réalisé une présentation succincte de notre école, des matières enseignées en quatrième année de topographie ainsi que de la ville de Strasbourg. Mme Baučić nous a ensuite présenté les différentes matières enseignées durant la licence de Géoinformatique et de Géodésie. Finalement, nous avons pu échanger avec les étudiants en troisième année de l'Université de Split ainsi qu'avec Mme Baučić.

Ce voyage fut une expérience très enrichissante pour l'ensemble des étudiants et professeurs accompagnants. En plus de découvrir une nouvelle ville et son histoire, nous avons atteint notre objectif qui était de découvrir l'enseignement et des exemples d'application de la topographie dans ce pays. ●

Olivier Reis

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

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

Reinhard Stölzel

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

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

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service



Quand la légistique rattrape le train de la géodésie...

■ Gilles CANAUD

Une décennie pour un décret

C'était il y a juste dix ans, en ce début d'année 2009 où les géodésiens achevaient le traitement de la mission Antilles que le résultat fut formel. Les chiffres ont parlé : les nouvelles coordonnées, différant des précédentes de quelques décimètres, mirent en évidence un décalage par rapport aux références mondiales, et ceci de manière systématique. Il fallut assumer cet état de fait par une communication officieuse, d'abord, vers les interlocuteurs les plus proches, la direction de l'IGN, puis celle du Cadastre et enfin quelques autres de la Tutelle. Et l'idée de réfection du décret, pour entériner une nouvelle "référence", a commencé à germer dans toutes les têtes.

Plusieurs années d'atermoiements, à peser le pour et le contre, à se remémorer le traumatisme infligé à la communauté lors de l'abandon de la NTF pour le passage au RGF93, ont abouti à un constat. Il fallait réunir un groupe assez large d'utilisateurs et d'experts, sous l'égide du CNIG, pour proposer des éléments de langage aux "hommes de loi".

Outre le cas antillais, le principal déclencheur fut toutefois une lettre du Conseil d'État en 2011 constatant l'insuffisance réglementaire en regard de la mise en œuvre progressive de la directive INSPIRE, informant la ministre de l'époque de l'impossibilité légale de faire appliquer l'état de droit dans ce domaine particulier, et proposant l'élaboration d'un nouveau décret. Ces éléments firent l'objet de discussions au sein de la commission "GéoPositionnement" du CNIG qui décida de créer un groupe de travail en 2014, sous la présidence de Ludovic Andrès (Métropole Nice Côte d'Azur / AITF). L'idée principale était de rendre les textes d'application de la loi

■ Pourquoi une réglementation ?

Pour être en mesure de situer un événement dans l'espace et le temps, un "référentiel" est indispensable, en géodésie, il prend le nom de système de référence géodésique. En effet, la géodésie vise à déterminer la forme et les dimensions de la Terre, tout cela en fonction du temps, or la Terre étant un corps déformable, sa forme change continuellement. Ces changements peuvent être perceptibles, telle la marée, ou la dérive des plaques tectoniques, et pour suivre ces déplacements, il faut un référentiel quadridimensionnel (trois axes et le temps) indépendant de la surface terrestre. Les systèmes de référence géodésiques sont donc indispensables au repérage dans l'espace et le temps. Corrélativement, pour que les pouvoirs publics, les entreprises et les citoyens utilisent le même système de référence géodésique, il s'avère nécessaire de réglementer.

■ Contexte réglementaire avant 2019

La loi

En amont se situe la loi n° 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire, par son article 89 qui traite de l'obligation de rattachement des informations localisées à la référence nationale.

Les décrets

Les décrets n°2000-1276 et 2006-272 définissent le système national de référence de coordonnées géographiques, planimétriques et altimétriques. Tels que stipulé par la loi, ils s'appliquent aux levés réalisés par ou pour le compte des services publics. Ils ne s'appliquent donc pas automatiquement au code minier ou de façon plus générale à l'ensemble des domaines reposant sur de l'information géographique.

La directive INSPIRE et les règlements

Dans le cadre de la directive européenne INSPIRE, plusieurs règlements ont été publiés depuis 2010, concernant les systèmes de référence de coordonnées, visant à rendre interopérables l'ensemble des données « environnementales » publiques au sein de l'union Européenne.

La résolution des Nations unies de 2015

Au vu de son importance économique et scientifique, de l'intérêt croissant que suscite la mise en place d'un repère de référence géodésique mondial fiable et stable qui permette d'établir une corrélation entre les mesures prises n'importe où sur Terre ou dans l'espace, l'ONU a décidé d'encourager les États Membres et les organisations internationales compétentes à renforcer la coopération mondiale en matière d'assistance technique, l'objectif étant le déploiement de l'ITRS et son amélioration. <http://ggim.un.org/>

■ Pourquoi une évolution de la réglementation ?

Jusqu'à maintenant, la loi d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire, et ses décrets, s'appliquent uniquement aux levés réalisés par ou pour le compte des services publics d'une part, ils ne s'appliquent pas aux coordonnées employées dans les textes réglementaires d'autre part. Plus largement, plusieurs règlements de la directive européenne INSPIRE, visent à rendre interopérables l'ensemble des données "environnementales" publiques au sein de l'union Européenne en définissant un cadre d'échange, ce qui nécessite d'adopter des systèmes de référence cohérents.

Sources : Groupe de travail CNIG/GeoPos/GTMOD

de 1995 relatifs aux références géographiques et altimétriques en phase avec l'évolution des besoins. Les objectifs furent nombreux et variés :

- assurer une compatibilité avec la directive INSPIRE ainsi que les réglementations internationales,

- prendre en compte de la réalité physique des mouvements tectoniques dans l'utilisation des systèmes géodésiques,
- remplacer le repère géodésique de référence légal aux Antilles Françaises,
- traiter des références verticales et du zéro hydrographique,





- élargir la portée du texte existant et en faciliter l’usage, en visant la pérennité réglementaire et répondre aux besoins des utilisateurs et des applications nationales,
- décrire et tracer l’information,
- raccourcir les délais de mise en application.

À ce projet ambitieux, s’ajoutait avec acuité le problème de la gouvernance de l’évolution du référentiel : les travaux devraient être l’occasion de lever l’indétermination sur le statut du RGF93, soulevé en 2011 par Claude Boucher (Bureau des Longitudes) que l’on a tenté de résumer ainsi : *“Référentiel lagrangien, en évolution continue, piloté de facto par l’IGN, ou eulérien en évolution séquentielle ?”*

Dans la pratique, le Service de Géodésie et de Métrologie de l’IGN n’a pas attendu dix ans pour continuer à maintenir et améliorer l’infrastructure. Sans entrer dans le détail, le principe est, à chaque recalcul de solution cumulée, de ne faire bouger les coordonnées qu’au-delà d’un certain seuil. Dans ce cas seulement, on opère à une maintenance de la réalisation. Quant à changer de réalisation, l’éventualité doit rester envisageable et la réforme des textes doit aller, le cas échéant, dans le sens de la facilitation, bien que cela reste une opération lourde. L’histoire le prouve aujourd’hui.

Autour du mandat de ce groupe, le fil directeur fut donc de permettre à la fois la mise en référence des données géographiques publiques dans des repères réalisant rigoureusement l’ITRS mais aussi d’assumer le partage et la diffusion, selon le modèle d’interopérabilité INSPIRE. L’accomplissement de ce travail donna lieu, au printemps 2016, à la rédaction d’un rapport final destiné au président du CNIG pour approbation et suite à donner. On a proposé de conserver dans le décret les dispositions concernant les systèmes de référence terrestres et verticaux et de préciser les éléments pouvant faire l’objet d’arrêtés, comme les réalisations, les représentations planes et toute autre considération évolutive plus technique.

Comme cette nouvelle réglementation allait occasionner des changements dans les processus de nombreux

acteurs, il a paru nécessaire de créer fin 2016 un second groupe dit de “Mise en œuvre”, en charge d’accompagner techniquement :

- dans un premier temps les juristes lors de la rédaction,
- dans un second temps les utilisateurs pour l’application des nouveaux textes réglementaires pendant trois ans à compter de la date de signature du décret.

Les aléas des priorités gouvernementales, les échéances électorales, la succession et la multiplicité des ministères a rendu la tâche de suivi du circuit des textes longue et fastidieuse. Toutefois, c’est au printemps 2019, juste dix ans après le calcul du réseau antillais, que les textes officialisant les réalisations sont publiés. Il s’agit :

- du décret n°2019-165 du 5 mars 2019 relatif au système national de référence de coordonnées¹,
- de l’arrêté du 5 mars 2019 portant application du décret².

Les enjeux actuels

En premier lieu, il peut être utile de rappeler que l’ensemble des ressources documentaires et applicatives³⁻⁴ sont abondées comme cela était prévu dans le mandat du groupe. L’utilisateur peut donc trouver un appui au département de l’information géodésique de l’IGN. Le site⁵ du CNIG héberge naturellement les contributions du groupe ainsi que les liens vers les nouvelles pages du site de référence technique⁶ de géodésie à l’IGN.

Les objectifs énoncés ci-avant lors des travaux des groupes sont globalement atteints : pour les deux premiers, à la lecture du décret, on est logiquement satisfait d’y trouver en bonne place l’ITRS ou *International Terrestrial Reference System*, comme étant la pierre angu-

1 [NOR : TRED1803154D]

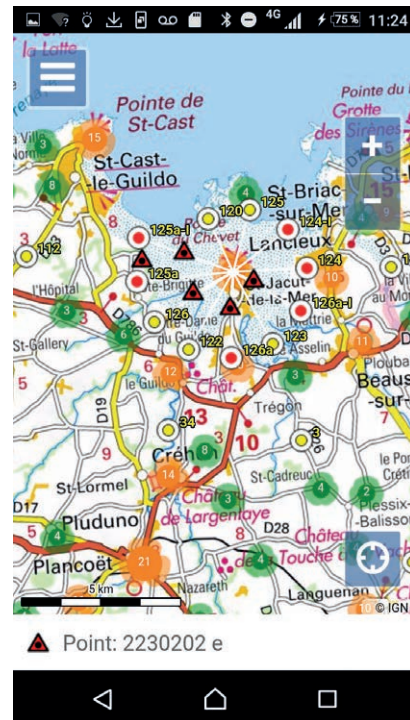
2 [NOR : TRED1803160A]

3 Le logiciel Circé v5 permet la transformation de coordonnées entre les repères de référence légaux : <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=circe>

4 L’application ‘Géodésie de Poche’ pour smartphone permet la consultation des fiches des réseaux géodésiques et de nivellement dans les références légales en direct sur le terrain <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=geodesie-poche>

5 http://cnig.gouv.fr/?page_id=8411

6 <https://geodesie.ign.fr/?p=15&page=decret>

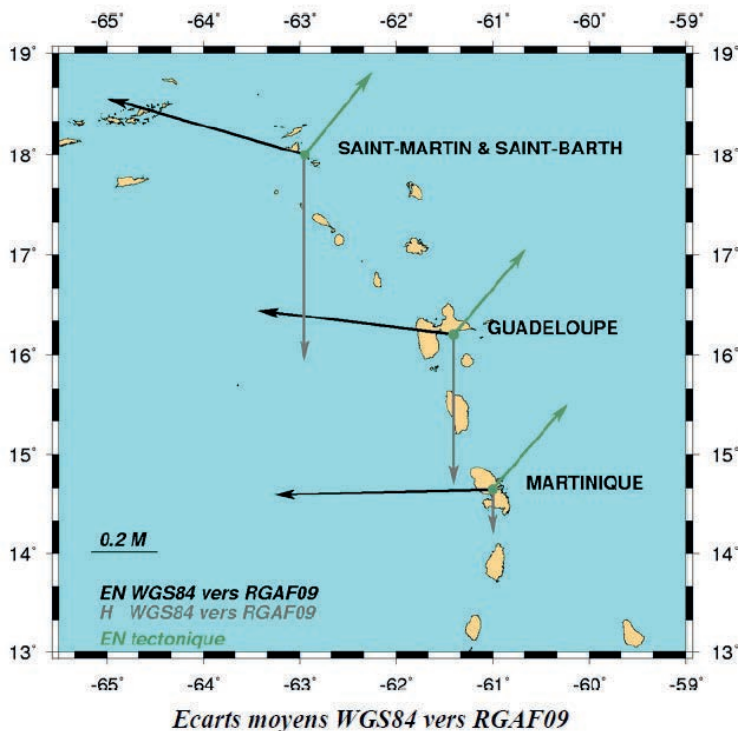


Application Géodésie de Poche pour smartphone (IGN)

laire de tous ces travaux, et qui va servir de cadre scientifique universel, stable, précis et pérenne. Quand le besoin s’en fait sentir, il pourra, le cas échéant, dans l’avenir proche, être décliné au fil des arrêtés par des réalisations susceptibles d’être renouvelées, correspondant à des densifications locales des ETRF ou ITRF en vigueur selon la zone. Ces renouvellements sont généralement provoqués, soit par des mouvements tectoniques continus et connus, comme l’évolution de la plaque eurasiennne sur trois décennies, soit par des crises telluriques épisodiques comme nous en vivons une actuellement à Mayotte.

Nous avons donc dorénavant une nouvelle définition des systèmes de référence terrestre utilisés par l’État, les collectivités locales et les entreprises chargées de l’exécution d’une mission de service public, identique à ceux applicables dans le champ de la directive 2007/2/CE du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d’information géographique dans la Communauté européenne (INSPIRE).

En revanche, des réglementations internationales propres à certains secteurs (aviation civile, navigation, défense...) ont imposé depuis 25 ans environ le WGS84 comme système de référence



L'écart entre la différence RGAF09-WGS84 et le mouvement tectonique s'explique par l'imprécision des coordonnées initiales du point fondamental de WGS84. Quant au détail des écarts différentiels, il est sans doute principalement dû à l'inexactitude des rattachements inter-îles de la détermination des positions WGS84. [Samuel Branchu, IGN,2010]

spécifiques à utiliser. L'engagement de ces communautés au travers de ces résolutions sur des choix de systèmes de référence, avec des noms particuliers, conduit également le besoin de préciser les notions d'interopérabilité de désignations adoptées par ces différentes normes. Le présent arrêté du Ministère de la transition écologique et solidaire ne précise pas directement ces concepts hors de son champ, qui conviendraient peut-être d'être clarifiés par les tutelles concernées.

Quant à la cohérence externe, le décret augure d'une synergie indiscutable tant sur l'aspect international, avec la recommandation du 26 février 2015 par l'assemblée générale des Nations unies, qui préconise l'adoption du repère de référence terrestre international comme référentiel de base⁷ que sur l'aspect normatif, la première version de la norme ISO19161-1 qui définit l'ITRS est attendue en 2020.

Il s'agissait également de remplacer le système géodésique aux Antilles

françaises. En effet, une campagne d'observations des réseaux géodésiques (en lien avec l'infrastructure géodésique mondiale de l'IGS) a été menée en 2008 donnant naissance au RGAF09 (Réseau Géodésique des Antilles Françaises 2009). Cette détermination, associée à un réseau de points et de stations GNSS permanentes, réalise une infrastructure géodésique de précision centimétrique homogène et cohérente de l'ITRS via IGS05 ép. 2009.0, époque qui se situe vers la fin de la campagne, compatible avec les processus de positionnement ponctuel précis (PPP). Elle constitue une amélioration significative par rapport au WGS84-RRAF⁸ qui, outre ses incohérences de plusieurs centimètres entre les îles, présentait un décalage systématique d'environ 70 cm avec la référence mondiale. Dans l'attente du décret et de l'arrêté, le Service de Géodésie et Métrologie avait mis en place une solution provisoire depuis quelques années :

- en qualifiant le RGAF09 de repère de référence géodésique usuel recommandé par l'IGN,

⁷ Resolution 1A : Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development <http://ggim.un.org/knowledgebase/KnowledgebaseArticle50334.aspx>

⁸ Réseau de Référence des Antilles Françaises 1991

- en diffusant ses réseaux de points matérialisés et stations GNSS permanentes à partir de janvier 2017 dans cette nouvelle référence,
- en proposant une nouvelle version du logiciel Circé qui permet de manière unilatérale le passage des anciens systèmes locaux terrestres vers le RGAF09 et inversement ainsi que le passage du WGS84-RRAF vers le RGAF09 et inversement.

Depuis le mois de mars, l'officialité du RGAF09 ne rend pas pour autant caduque l'utilisation de Circé³, qui plus que jamais, est l'outil d'intégration et de rétro-compatibilité incontournable sur la zone caraïbe. L'article 6 du décret prévoit spécifiquement pour cette zone que "les informations localisées peuvent être fournies, pendant une période de trois ans par fourniture dans l'un des systèmes de référence de coordonnées en usage, accompagnée des éléments nécessaires à leur transformation". Ce texte répond donc au besoin d'un repère de référence précis inter-îles homogène et de qualité centimétrique

La réaffirmation des références verticales dans le cadre européen, quand c'est techniquement possible, et du zéro hydrographique, a été également prise en compte. L'article 3 du décret institue l'EVRS "European Vertical Reference System" comme système de référence verticale pour toute la zone métropolitaine excepté la Corse. A l'heure actuelle, cette région ainsi que les outre-mers restent régis par leurs "réalisations locales issues de marégraphie, nivellement, gravimétrie ou modèle de géoïde"(sic).

A priori, pour l'utilisateur, il n'y a donc pas de changement notable dans ce domaine à court et moyen termes. Ceci est confirmé par l'article 2 de l'arrêté qui continue d'énoncer le NGF-IGN69 comme réalisation de l'EVRS pour la zone continentale.

La cote du zéro hydrographique dans chaque zone de marée est définie, quant à elle, à la côte dans le système de référence légal ou bien une réalisation locale fixée par l'arrêté selon le territoire.

Les deux groupes de travail ont réuni des "experts" volontaires de tous horizons, qui sont avant tout des utilisateurs quotidiens des repères, tant dans le

► domaine public que dans le domaine concurrentiel. Ils ont émis le vœu, à la demande claire formulée par le conseil d'État, d'élargir la portée du texte existant et en faciliter l'usage. Il a fallu viser la pérennité réglementaire ainsi que répondre aux besoins des utilisateurs et des applications nationales. Jusqu'à maintenant, le périmètre couvert par la réglementation concernant les localisations géographiques était trop restreint tant il excluait certaines catégories d'actes administratifs : la limitation à une certaine dimension s'est révélée encore récemment comme un facteur contribuant à limiter l'usage des systèmes de référence géodésiques précis, une partie du patrimoine restant exprimée dans d'anciennes réalisations obsolètes (de type NTF).

Plus généralement, l'évolution des différents repères de référence terrestres est logique. Elle est due en partie à l'amélioration des performances technologiques permettant de calculer de nouvelles réalisations de meilleure qualité géométrique. Jusqu'ici, l'exploitation dans le temps des différents systèmes géodésiques et altimétriques qui se sont succédé a entraîné des "difficultés sérieuses liées à l'utilisation de systèmes de localisation géographiques anciens" comme l'indique le Conseil d'État dans son courrier du 25 janvier 2011 adressé au Premier ministre. Cette situation peut se retrouver lors d'usages topographiques ou cartographiques, mais également pour des actes administratifs ou pour l'élaboration de textes tels que des arrêtés prolongeant un permis exclusif de recherches minières ou d'hydrocarbures. Comme la plupart des applications scientifiques ou techniques géolocalisées nécessitent de croiser des données provenant de différents systèmes, la connaissance précise des caractéristiques de chacun ainsi que la date des observations s'avèrent indispensables. Ces informations doivent être parfaitement décrites au travers de métadonnées (système de référence, réalisation, date, précision, etc.). En conséquence, la pérennité réglementaire des systèmes de référence et des réalisations a dû être également prise en compte. Aussi il apparaît nécessaire d'assurer la traçabilité des réalisations, c'est-à-dire de garantir la sécurité des

textes et de toutes les informations géographiques qui s'appuient sur des coordonnées légales. L'IGN a vocation à jouer ce rôle dans le cadre de sa mission de gestion du système national de référence géographique, gravimétrique et altimétrique, définie à l'article 2-1 du décret n° 2011-1317 du 27 octobre 2011 relatif à l'Institut national de l'information géographique et forestière. Cette mission est confirmée par l'article 4 de notre arrêté du 5 mars 2019.

Et la suite ?

A la lumière de ce qui précède, même si la technologie ne progresse pas forcément à la vitesse de la lumière, et que la tectonique de certains territoires évolue à une vitesse... géologique, il a fallu anticiper et "imaginer" le futur géodésique. Une des premières idées fondatrices de la démarche, adoptée par les contributeurs, fut de proposer un décret assez court, sybillin et somme toute... générique, qui se contente d'affirmer, entre autres, le système de référence et permet de décliner par arrêté les différents repères de référence ou réalisations, que l'on présentait à juste titre comme des notions beaucoup plus évolutives. Ceci sous-entendant qu'un nouvel arrêté "monministériel" soit plus facilement adopté en cas de besoin sans que cela nécessite de toucher au décret. Du point de vue métier, la situation actuelle glisse progressivement vers l'utilisation accrue du PPP. Le groupe de travail pour la "mise en œuvre du décret" fut bien conscient du besoin et se devait de proposer une méthode pour la mise en référence précise de chaque opération locale, partout sur la planète France. Il faut dire que les mouvements décelés en Polynésie ou encore sur l'archipel de la Loyauté, même si ces territoires ne sont pas directement concernés par la réglementation hexagonale, nécessitent une réponse méthodologique claire. En l'occurrence, il s'agit de passer, pour tout géomètre, d'un calcul issu des stations et éphémérides de IGS vers le repère de référence légal du territoire. La méthode est proposée par le groupe de travail dans un document pratique qui fait figure de recommandation, intrinsèquement évolutive. Il est intitulé "Utilisation

d'infrastructures géodésiques mondiales pour la réalisation nationale"⁹. Il répond à ce besoin et met en évidence pour chaque territoire la progression du "biais" de mise en référence constatés sur les stations de références. [...] Les causes peuvent être : la détermination initiale du repère de référence légal, l'incertitude de la vitesse de plaque et aussi 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. [...]

Ainsi donc la communauté géodésique, avec l'arrêté et la recommandation, dispose en main des deux cartes pour répondre à l'évolution, qu'elle soit séquentielle ou continue. Elles vont probablement être incontournables pour digérer géodésiquement la crise mahoraise dès 2019. ●

⁹ "Utilisation d'infrastructures géodésiques mondiales pour la réalisation nationale"; Raphaël Legouge, Ingénieur hydrographe responsable du projet BathyElli au Shom, Brest, 2018 - <https://geodesie.ign.fr/content/fichiers/documentation/Infrastructures-GeodesiquesMondiales.pdf> XYZ158, mars 2019, pages 35-43.

Contact

Gilles CANAUD - Gilles.Canaud@ign.fr
IGN / Département de l'Information Géodésique - CNIG/GeoPos/Groupe de travail sur la mise en œuvre du décret.

ABSTRACT

Key words: terrestrial reference system, law, regulation, West Indies

Several regulations of the European INSPIRE directive aim to make all public "environmental" data within the EU interoperable by defining a framework for exchange, which requires the adoption of coherent reference systems. Furthermore, the recognition of the ITRS by the international scientific community, and the need to link local geodetic networks, as in the West Indies, to a global framework motivated the evolution of french regulations. You can find in this paper all the the stakes of the publication of the new decree.

Automatisation du traitement de données "Mobile Mapping" : extraction d'éléments linéaires et ponctuels

■ Loïc ELSHOLZ

L'évolution rapide des technologies 3D et notamment des scanners laser a permis aux différents acteurs de la topographie et du génie civil de se doter d'outils capables d'acquérir des données rapidement et en très grande quantité.

La démocratisation des systèmes "Mobile Mapping", fruits de ces progrès technologiques, entraîne la nécessité de développer des processus de traitement de masse adaptés. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à l'automatisation du traitement de ce type de données, par le biais de l'extraction d'éléments linéaires et ponctuels, afin d'optimiser les rendements de production et d'améliorer la qualité et l'exhaustivité des livrables. Le présent article expose les différents développements réalisés, ayant trait au traitement d'images, à la photogrammétrie ainsi qu'à l'intelligence artificielle, et plus particulièrement à l'apprentissage profond et aux réseaux de neurones convolutifs.

■ MOTS-CLÉS

Cartographie mobile, traitement d'images, vision par ordinateur, détection d'objets, apprentissage automatique, apprentissage profond, réseaux de neurones convolutifs

Contexte et objectifs

En seulement quelques années, les systèmes de type "Mobile Mapping" sont devenus un outil incontournable en matière d'acquisition. Cette forte croissance a amené les sociétés telles que FUTURMAP, jeune entreprise spécialisée dans le traitement de données géographiques, à développer des processus spécifiques adaptés.

Le terme usuel "Mobile Mapping", cartographie mobile ou scanner dynamique en français, se rapporte au procédé de l'acquisition de données géographiques à partir d'un véhicule mobile équipé de différents systèmes de télédétection. Dans notre étude, nous nous sommes principalement intéressés à des systèmes terrestres composés de scanners laser et d'appareils photographiques, ce type d'appareillage étant la source principale des données traitées par la société en vue de la réalisation de plans.

Ces systèmes permettant d'acquérir d'énormes quantités de données en peu

de temps (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de levé en une journée), il est primordial de mettre en œuvre des méthodes toujours plus innovantes, afin de répondre rapidement et à faible coût aux demandes des clients, tout en assurant la qualité du produit final.

Ainsi, le présent article décrit l'étude réalisée au sein de la cellule de Recherche et Développement de la

société, visant à automatiser les procédés de traitement de données de cartographie mobile, par le biais de l'extraction d'éléments linéaires et ponctuels. Nous proposons dès lors plusieurs approches, mettant notamment à profit l'analyse d'images, la photogrammétrie ainsi que l'intelligence artificielle, et plus précisément l'apprentissage profond et les réseaux de neurones convolutifs, afin d'extraire et de dessiner automatiquement une partie des éléments du plan, et d'en optimiser le contrôle.

Extraction et dessin automatiques d'éléments linéaires

Dans la plupart des plans réalisés par la société, la majeure partie du travail réside dans le dessin des éléments linéaires (bordures, bâti, marquage au sol). Ainsi, il peut être particulièrement intéressant pour la production d'obtenir une ébauche des éléments linéaires d'un projet de manière automatique. A cette fin, nous proposons une méthode permettant, à partir de nuages de points issus des systèmes de cartographie mobile, d'extraire et de

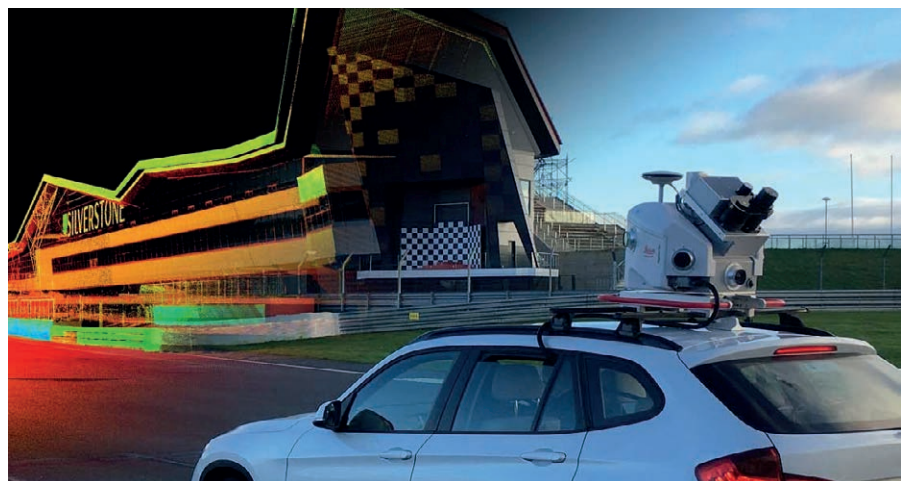


Figure 1. Système Mobile Mapping monté sur une voiture (mksurveys.com)

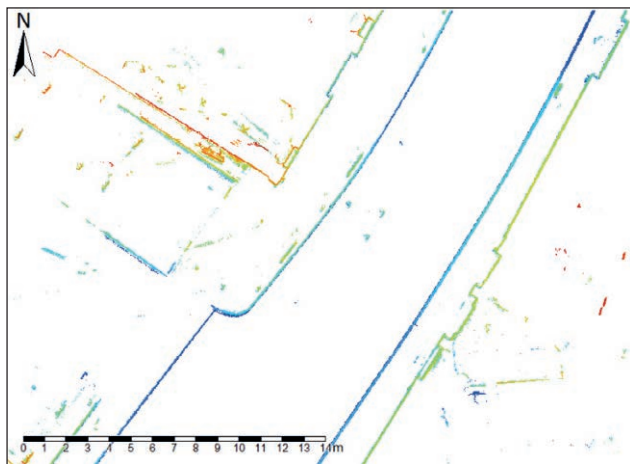


Figure 2. Points appartenant aux bordures et pieds de murs (classe 4)

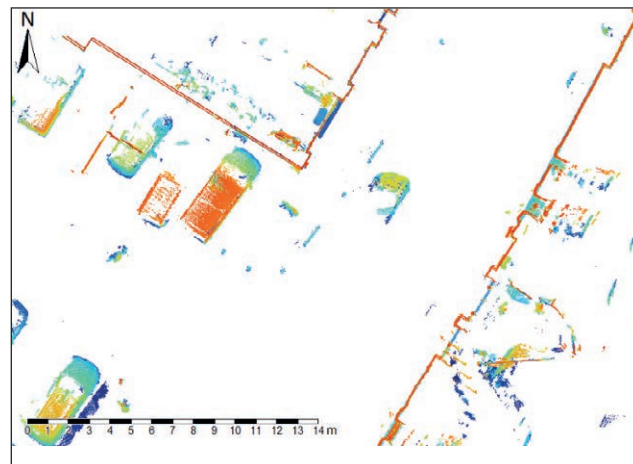


Figure 3. Points situés entre le sol et 2 m, hors classe 4 (classe 5)

► dessiner automatiquement une partie des éléments linéaires, afin d'obtenir un canevas dans un format DAO (Dessin Assisté par Ordinateur). Le logiciel libre de système d'information géographique SAGA GIS étant déjà utilisé pour la production des ortho-images servant de base aux dessinateurs pour la réalisation des plans, celui-ci a également été retenu pour les traitements d'images nécessaires à l'extraction des linéaires.

■ Extraction des bordures

Dans le cadre des bordures, on utilise tout d'abord les données de classification du nuage, effectuée au préalable selon une routine développée en interne. Cette étape de classification nous permet d'extraire directement la majorité des points appartenant aux catégories recherchées. Ainsi, on isole deux classes dans le nuage : la première correspondant aux bordures et pieds de murs, la deuxième concernant les autres éléments situés entre le sol et une hauteur de 2 m. Il s'agit, dans notre routine de classification spécifique, des classes 4 et 5. Les ensembles de points extraits sont ensuite convertis en grilles (ortho-images). Sur la grille correspondant à la classe 4 (cf. figure 2), on observe distinctement les bordures ainsi que les pieds de murs, mais également d'autres objets indésirables correspondant à tout élément proche de la verticale situé entre le sol et 30 cm de hauteur. Il s'agit par exemple de roues de véhicule, de bas de mobilier urbain, de pieds de panneaux de signalisation, etc. Sur la grille correspondant à la classe 5

(cf. figure 3), les éléments situés entre le sol et une hauteur de 2 m, en dehors des objets appartenant à la classe 4, sont visibles. Il s'agit ici principalement des murs et du bâti, des véhicules, et du mobilier urbain.

Afin d'éliminer les points correspondant aux pieds de murs et aux autres éléments indésirables dans la première grille, et ainsi isoler les bordures, on utilise la deuxième grille en tant que masque. En effet, la deuxième grille (classe 5) contient finalement les murs et le bâti, ainsi que la majorité des autres éléments indésirables décrits précédemment.

Ces éléments proviennent cependant de points du nuage situés à une hauteur plus élevée que ceux de la classe 4, et ne surplombent pas toujours parfaitement

les objets que nous souhaitons masquer (les pieds de murs sont parfois saillants vis-à-vis des murs, par exemple).

On utilise alors un opérateur de morphologie mathématique, la dilatation morphologique, afin d'élargir les objets présents dans la deuxième grille, pour s'assurer d'obtenir un masque permettant d'éliminer les éléments ciblés.

La figure 4 représente la superposition entre les deux grilles, en rouge la première, et en bleu la deuxième après dilatation. Après élimination des pixels ne correspondant pas aux bordures avec notre masque, on applique des procédés de fermeture et d'ouverture morphologiques afin d'obtenir des lignes homogènes, dans le but d'optimiser l'étape de vectorisation. Celle-ci est réalisée via l'algorithme de sque-

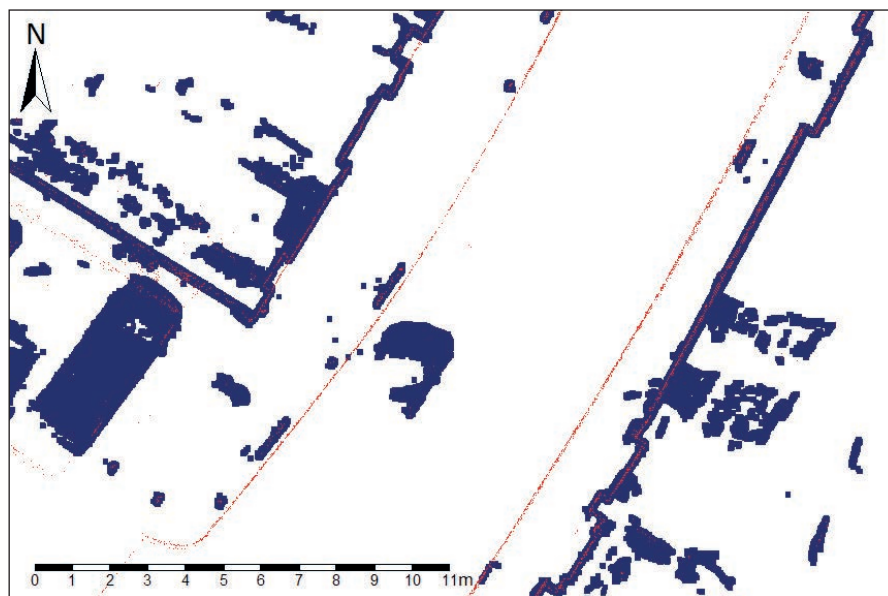


Figure 4. Superposition de la classe 4 (en rouge) et de la classe 5 après dilatation morphologique (en bleu)



lettisation de Hilditch [Hilditch, 1969], et on obtient alors un premier modèle vectoriel.

A ce stade, le modèle ayant été vectorisé à partir d'une grille échantillonnée à 5 mm de pixel, celui-ci comporte un sommet tous les 5 mm, et les lignes ont un aspect crénelé étant donné que chaque segment provient de la liaison entre deux pixels de la grille. On utilise donc un procédé de lissage disponible dans SAGA, basé sur la méthode SIA (*Smoothing via Iterative Averaging*).

Le lissage est par ailleurs paramétré de telle sorte à ne pas modifier le modèle de plus d'un centimètre, même dans le cas de courbes importantes. Ensuite, afin de réduire le nombre considérable de sommets, on utilise un processus de simplification vectorielle, en ajustant la tolérance de modification à 5 mm, une fois encore afin de conserver au maximum la précision initiale de position des éléments. On charge ensuite ce modèle dans un logiciel de DAO, afin de le nettoyer automatiquement des éléments indésirables restants, ainsi que de relier au mieux les lignes correspondant vraisemblablement à des bordures identiques. Le modèle ainsi créé contient une très large partie des bordures (~ 90 %) avec des écarts par rapport au nuage de l'ordre de 5 cm dans les cas les plus défavorables (faible densité de points, courbes fortes p. ex.), ainsi que de rares lignes erronées que l'opérateur devra éliminer manuellement, notamment en

présence d'une végétation dense, où la classification des nuages s'avère parfois inexacte. La *figure 5* illustre un exemple de tracé automatique de bordures avec notre méthode.

■ Extraction du marquage au sol

Dans le cadre de projets routiers, il est généralement nécessaire de tracer le marquage au sol (bandes blanches principalement). Cette tâche est particulièrement laborieuse, notamment concernant les autoroutes, dont les levés sont parfois longs de plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres. Afin d'extraire et de dessiner automatiquement ces éléments, nous proposons une méthode s'appuyant à nouveau sur le logiciel SAGA.

Tout d'abord, on extrait du nuage classifié les points appartenant à la route, puis on transforme cet ensemble en grille d'intensité. On isole ensuite les cellules correspondant au marquage par seuillage local de l'intensité.

En effet, les valeurs d'intensité du marquage sont largement supérieures au reste de la chaussée, de par le matériau réfléchissant utilisé. A nouveau, on utilise des procédés de morphologie mathématique pour homogénéiser les lignes extraites, puis on procède à la vectorisation de la même façon que dans le cadre des bordures.

On obtient finalement un modèle contenant le marquage au sol dans un format DAO, avec des écarts moyens

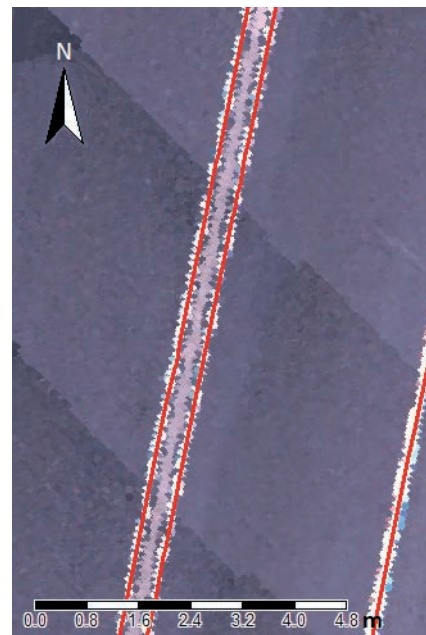


Figure 6. Modèle vectoriel du marquage au sol (en rouge) superposé au nuage de points

de l'ordre de 3 cm avec le nuage. Cette méthode, performante sur la majorité des portions routières, exige cependant souvent un traitement manuel supplémentaire dans le cas des sorties autoroutières, où le marquage est plus complexe et où les lignes se divisent parfois en plusieurs éléments.

La *figure 6* illustre un exemple de tracé de marquage au sol sur autoroute avec la méthode décrite.

Extraction et dessin automatiques d'éléments ponctuels

Le tracé des éléments ponctuels (regards, plaques, coffrets, mobilier urbain, etc.) constitue la deuxième partie essentielle du travail des dessinateurs, et suscite par ailleurs la majorité des retours clients, pour cause d'oublis ou d'erreurs de nature. Nous proposons ainsi une méthode permettant d'obtenir automatiquement le tracé d'une partie des éléments ponctuels du dessin.

Il s'agit de la partie majeure de l'étude, divisée en deux points distincts : l'extraction des ponctuels sur photographies via l'apprentissage profond et les réseaux de neurones convolutifs et leur dessin automatique à l'aide, notamment, de la photogrammétrie.

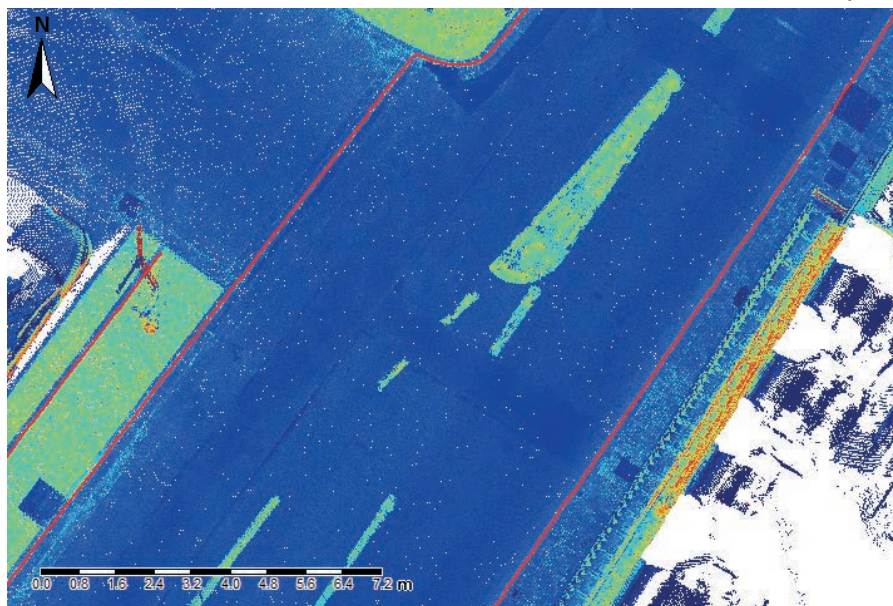


Figure 5. Exemple de tracé automatique de bordures (en rouge) superposé au nuage de points



► ■ **Extraction des éléments ponctuels**

Afin d'extraire les éléments ponctuels (regards, plaques, coffrets, mobilier urbain), l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) et plus précisément l'apprentissage profond (*Deep Learning*) a rapidement été considéré comme la méthode la plus adaptée.

En effet, il est particulièrement difficile d'extraire des objets aux caractéristiques très variables (forme, couleur dans le cas de détection sur photographie, intensité dans le cas des ortho-images issues de nuages de points) avec des techniques traditionnelles de traitement d'images. Après avoir étudié et testé certains des algorithmes d'apprentissage profond disponibles en open-source, le détecteur YOLO (*You Only Look Once*) [Redmon & Farhadi, 2016] a été retenu pour son excellent compromis entre rapidité et précision, ainsi que pour sa relative accessibilité.

Il s'agit d'un système basé sur les réseaux de neurones convolutifs (*Convolutional Neural Networks, CNN*), technologie en remarquable évolution depuis ces dix dernières années, étant actuellement à la source des algorithmes les plus performants dans de nombreux domaines de l'intelligence artificielle, et notamment en vision par ordinateur. L'architecture d'un CNN consiste en une suite de couches (*Layers*), réalisant chacune une opération transformant les données qu'elle reçoit, comme l'illustre la figure 7.

De manière succincte, la première partie d'un CNN fonctionne comme

un extracteur de caractéristiques d'images. Une image d'entraînement connue est passée à travers une succession de filtres (noyaux de convolution, sous-échantillonnage, fonctions mathématiques), créant l'équivalent de nouvelles images (*Feature Maps*) représentant une multitude de caractéristiques de l'image originale.

Finalement, la deuxième partie du réseau, c'est-à-dire les couches entièrement connectées (*Fully Connected Layers*), traduit les images filtrées en votes, ou poids, afin de décider de la catégorie à laquelle appartient l'image. Après avoir traité une image avec le processus précédent, les caractéristiques des filtres ainsi que les poids sont ajustés via rétro-propagation, et ainsi de suite avec l'ensemble des images présentes dans la base de données d'entraînement, jusqu'à convergence du système.

Après plusieurs tests avec des bases de données restreintes, le choix s'est porté sur la détection des objets sur photographies au détriment des ortho-images issues des nuages de points, dont les caractéristiques sont trop variables (intensité, densité) et au sein desquelles certains objets sont peu différenciables (regards, plaques) ou invisibles (coffrets encastrés dans les murs, bouches à clé dans le cas d'une densité faible).

■ **Création d'une base de données photographiques**

Afin d'entraîner le système de détection, il s'agit tout d'abord de créer une base de données photographiques contenant

CLASSES	NOMBRE D'OBJETS
Regard rond	3670
Regard carré	2119
Regard carré rond	1334
Chambre double	536
Chambre triple et plus	242
Grille	881
Bouche à clé	1086
Avaloir visitable	1010
Avaloir grille	340
Avaloir visitable grille	43
Gargouille	697
Coffret	3878
Armoire	360
Bouche incendie	279
Poubelle publique	652
Banc public	210
Signe PMR	182
Signe piste cyclable	629
TOTAL	18148

Tableau 1 : Classes choisies et nombre d'objets par classe dans la base de données

un maximum d'occurrences d'objets d'intérêt.

Cette base de données a été réalisée en interne, à l'aide des images disponibles au sein de la société, provenant de divers projets *Mobile Mapping*. Cela offre l'avantage d'entraîner l'algorithme sur des types d'images similaires à ceux qui devront être traités pour la détection.

Après avoir étudié et établi des conjectures quant au potentiel de détection de l'algorithme, 18 types d'objets ont été choisis en tant que classes pour la base de données.

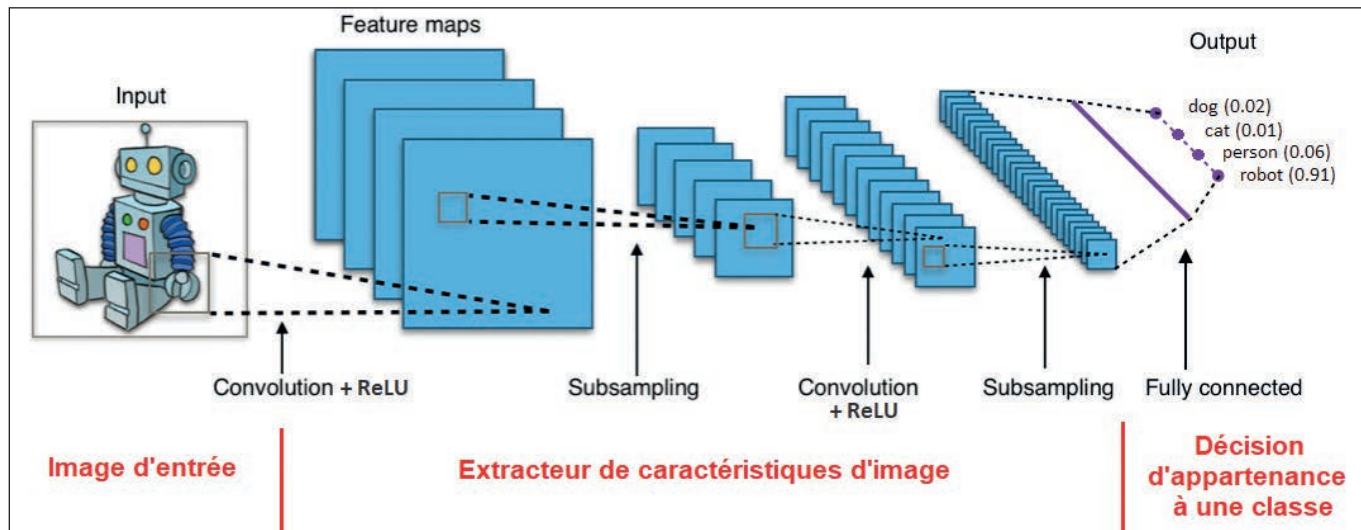


Figure 7. Architecture simplifiée d'un Réseau de Neurones Convolutifs (wikipedia.org, modifié)



Ce nombre relativement élevé de classes, dont certaines sont très semblables, a été choisi afin de partir d'un haut niveau de spécification, et de permettre la réduction de celui-ci en regroupant des classes similaires, au besoin. En effet, le regroupement de classes ne demande aucun effort, contrairement à la division d'une catégorie en deux sous-catégories, opération qui nécessite une distinction manuelle. La base de données ainsi créée, dont les photographies ont été annotées à l'aide du logiciel libre *Labellmg* [Tzuta, 2018], contient 18 148 occurrences d'objets, appartenant aux 18 classes sélectionnées, comme l'illustre le *tableau 1*.

■ Entraînement et résultats

L'algorithme a été entraîné sur notre base de données, à une résolution d'image relativement faible de 416 x 416 pixels : les images d'entraînement sont ré-échantillonnées à cette résolution afin d'alléger les calculs.

En effet, les opérations sous-jacentes à l'entraînement d'un tel réseau sont extrêmement coûteuses en ressources matérielles. Les calculs matriciels, virtuellement irréalisables sur un processeur, doivent être effectués directement sur carte graphique.

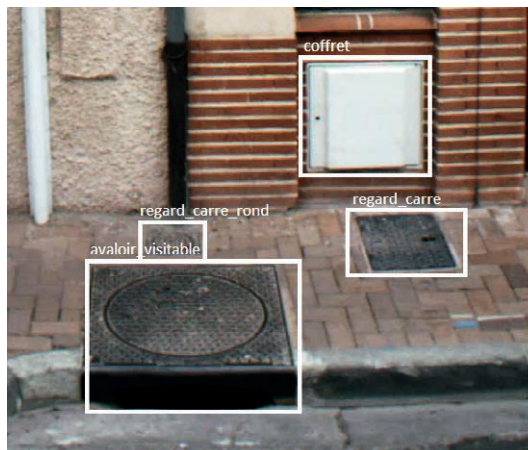
L'entraînement de notre système à cette faible résolution a nécessité une dizaine de jours de calculs, malgré une carte graphique performante (NVIDIA GeForce GTX880M 8 Go de mémoire dédiée). L'évaluation de l'algorithme a ensuite été effectuée sur une base de données indépendante contenant environ 1 000 occurrences d'objets. De manière globale, le système a prouvé son efficacité en affichant une précision et un rappel (*recall*) de l'ordre de 70 %. Ces deux critères, essentiels à l'évaluation de la performance d'un détecteur d'objets Perry, [Kent & Berry 1955], sont définis ainsi :

La précision correspond au nombre d'éléments pertinents détectés rapporté au nombre total d'éléments détectés :

$$P_i = \frac{\text{nb. d'obj. correctement attribués à la classe } i}{\text{nb. d'obj. attribués à la classe } i}$$

Le rappel correspond au nombre d'éléments pertinents détectés au regard du nombre d'objets pertinents que possède la base de données :

$$R_i = \frac{\text{nb. d'obj. correctement attribués à la classe } i}{\text{nb. d'obj. appartenant à la classe } i}$$



Figures 8 et 9. Exemples de détections d'objets effectuées avec YOLO

La performance de la détection est par ailleurs, dans son utilisation pratique, largement améliorée par la redondance des observations, que nous expliciterons dans la suite de l'article. Les *figures 8 et 9* illustrent la détection de divers objets d'intérêt par notre système.

■ Dessin automatique des ponctuels

Afin d'obtenir les coordonnées tridimensionnelles de l'objet à partir des coordonnées images obtenues via l'algorithme YOLO, la méthode suivante a été développée : à partir des équations de colinéarité (cf. photogrammétrie générale) et des données issues du système de cartographie mobile, il est possible de calculer l'équation tridimensionnelle de la droite reliant le centre de projection de la caméra au point 3D recherché, sans toutefois connaître la distance entre le centre de projection et ce point.

On résout ensuite le problème lié à cette inconnue en utilisant le nuage de points : on recherche l'intersection entre la droite calculée et le nuage, et on obtient dès lors les coordonnées 3D du point considéré.

La précision du tracé dépend alors principalement de la précision géométrique de la détection de YOLO, du calage des photographies et de la qualité de l'orientation interne des caméras, ainsi que du calage et de la densité du nuage de points pour le calcul d'intersection.

On obtient finalement des écarts très variables entre la position dans le nuage et la position calculée de l'objet, pouvant aller jusqu'à 30 cm dans les cas les plus défavorables.

Cette faible précision est également largement améliorée grâce à l'importante redondance dans la détection.

■ Exploitation de la redondance des observations et résultats

Les systèmes de cartographie mobile disposent généralement d'au moins quatre caméras, dont la fréquence de prise de vues permet d'observer le même objet à plusieurs reprises. De plus, les levés sont le plus souvent réalisés en aller-retour, accroissant encore l'abondance d'observations.

Ainsi, on distingue en moyenne le même objet sur 6 photographies différentes, ce chiffre étant bien entendu dépendant de l'emplacement usuel de l'objet aux alentours de la voirie (plus l'objet en est éloigné, moins on obtiendra d'occurrences de celui-ci).

S'agissant de la performance de détection, cette redondance permet une nette amélioration de la précision et du rappel, atteignant respectivement des valeurs de l'ordre de 85 % dans le cas d'une utilisation pratique sur un levé de corps de rue.

En ce qui concerne la précision géométrique du dessin automatique, on regroupe les points coïncidant à un même objet à l'aide d'un algorithme de partitionnement (en l'espèce l'algorithme classique *Mean Shift Clustering*), puis on effectue un ajustement par les moindres carrés afin d'obtenir la position la plus probable de l'objet.

On observe finalement un écart moyen entre la position de l'objet dans le nuage et la position calculée de l'ordre de 6 cm, pour un écart-type de 4 cm.



▶ En l'état, ce processus de dessin automatique ne pourra donc être utilisé que dans le cadre de plans n'exigeant pas une précision élevée, tels que les Plans de Corps de Rue Simplifiés (PCRS) par exemple.

Cependant, avec l'évolution rapide des algorithmes d'apprentissage profond, des systèmes de cartographie mobile, ainsi qu'en optimisant ou en améliorant la méthode en utilisant par exemple des techniques de stéréophotographie multi-vue, il sera possible d'obtenir des résultats largement plus favorables, et ainsi d'utiliser cette méthode dans le cadre de projets plus exigeants.

Processus de contrôle via projection sur photographies

Dans le cadre des projets réalisés par l'entreprise, les étapes de contrôle des plans constituent une part non négligeable du travail, et nécessitent une cellule qualité composée de personnel spécialement formé. Il est effectivement crucial pour la société de s'assurer de la qualité de ses livrables, c'est-à-dire principalement de l'exhaustivité, de l'exactitude ainsi que de la précision des plans réalisés.

En effet, dans le cas d'erreurs ou d'imprécisions dans les données livrées, la société entache non seulement sa réputation, mais est également sujette à des retours des clients, occasionnant des retards et une diminution des rendements de production.

L'optimisation des procédés de contrôle s'avère dès lors capitale, notamment au vu des quantités particulièrement importantes de données à vérifier, et de l'aspect chronophage de la tâche.

Avant la réalisation de la présente étude, un assistant qualité effectuait le contrôle de l'exhaustivité des plans sur deux écrans en comparant les éléments dessinés avec les objets présents sur les photographies, occasionnant des va-et-vient laborieux. Le contrôle de la position des éléments était ensuite effectué à même le nuage.

Malgré ces vérifications, des erreurs et oublis subsistaient bien évidemment dans le plan livré, notamment dus à des inattentions lors de la comparaison entre le plan et les photographies.

Une méthode a dès lors été développée afin de contrôler les livrables directement sur les photographies, en y projetant les éléments du plan, afin d'optimiser le contrôle et de minimiser les erreurs et oublis.

■ Méthode

On utilise à nouveau les équations de colinéarité de la photogrammétrie générale afin de transformer les coordonnées 3D des objets du plan en coordonnées-images 2D.

Pour obtenir une précision intéressante pour le contrôle, on corrige également les coordonnées calculées en prenant en compte les distorsions des caméras, selon le modèle de Brown [Brown, 1966].

La problématique restante concerne la détermination des objets contenus dans

les photographies. En effet, lorsque l'on considère une image, on ignore *a priori* quels objets y sont visibles.

Ainsi, afin d'éviter de transformer laborieusement les coordonnées 3D de l'intégralité des objets du plan en coordonnées-images 2D, et de tester pour chaque image leur appartenance, on définit pour chaque image un échantillon d'objets potentiellement projetables.

Cet échantillon est défini tout d'abord selon un seuil de distance entre les objets et la position de la caméra au moment de la prise de vues : on souhaite en effet projeter sur la photographie des objets nettement visibles par l'opérateur, c'est-à-dire relativement proches de la caméra.

Ensuite, pour chacun des objets présents dans le rayon fixé autour de la caméra, on s'assure que ceux-ci soient situés devant le capteur, en calculant le produit scalaire entre le vecteur d'orientation de la caméra et le vecteur pointant l'objet considéré.

A partir de cet échantillon, on effectue finalement la transformation 3D-2D et on teste pour chaque point sa présence ou non sur l'image : si ses coordonnées sont bel et bien comprises dans les dimensions de la photographie, celui-ci est projeté.

Enfin, via des processus propres aux logiciels DAO, on projette les blocs correspondant aux objets de manière à ce que l'échelle et la rotation soient cohérentes sur l'image, et se superposent correctement aux objets photographiés.



Figure 10. Exemple de projection automatique d'éléments du plan sur photographie



La *figure 10* illustre la projection d'objets du plan sur une photographie.

■ Résultats

Avec cette méthode, on observe finalement des écarts entre les objets projetés et les éléments sur les photographies inférieurs à 15 pixels, ce qui équivaut à un écart maximum d'environ 10 cm pour des objets situés à 10 m de la caméra (pour une caméra typique équipant les systèmes de cartographie mobile, de focale 8.2 mm).

L'assistant qualité peut alors, directement dans son logiciel DAO, faire défiler les images où sont automatiquement projetés les éléments du plan, en contrôlant l'exhaustivité ainsi que l'emplacement approximatif des objets, optimisant le temps ainsi que la qualité du contrôle.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude concernant l'automatisation des procédés de traitement de données de cartographie mobile, plusieurs axes de recherche ont été mis en œuvre dans le but d'optimiser les rendements de production, tout en améliorant l'exhaustivité et la qualité des livrables.

Les méthodes développées quant à l'extraction et le dessin automatiques d'éléments linéaires et ponctuels permettront, une fois leur mise en production effective, une augmentation des rendements estimée à près de 50 % en ce qui concerne la réalisation de plans simples, tels que les PCRS.

Par ailleurs, le procédé de contrôle des livrables optimisé via la projection automatique des éléments du plan sur photographies, d'ores et déjà en application, a permis un accroissement des rendements de contrôle d'environ 30 %, tout en améliorant l'exhaustivité et la qualité des livrables.

Avec l'évolution des systèmes de levé, des algorithmes et des bases de données, l'avènement de la technologie de la chaîne de blocs associée à l'apprentissage automatique, ainsi qu'en s'intéressant à des procédés opérant directement au sein des nuages de points, il sera assurément possible d'améliorer encore largement les processus de traitement.

Ainsi, en ce qui concerne les plans peu exigeants, à l'instar du PCRS, on peut envisager dans un futur relativement proche, des méthodes permettant une production quasi-automatique (c'est-à-dire environ 75 %).

Dans cette optique, la société Futurmap a d'ores et déjà fait appel à un développeur, qui continuera de s'intéresser à l'apprentissage automatique, et plus particulièrement à ses applications en lien direct avec les nuages.

En effet, avec la croissance rapide des puissances de calcul, la cartographie mobile profitera immanquablement, à l'avenir, de l'adaptation des dernières technologies en matière d'intelligence artificielle, notamment basées sur les réseaux de neurones convolutifs, à des données complexes et multidimensionnelles, tels que les nuages de points. ●

Contact

Loïc ELSHOLZ
loic@futurmap.com

ABSTRACT

Key words: Mobile mapping, Image processing, Computer vision, Object detection, Machine learning, Deep learning, Convolutional neural networks

The rapid evolution of 3D technologies and particularly of laser scanners enabled the different players in the fields of civil engineering and topography to collect very large amounts of geospatial data efficiently. The democratization of Mobile Mapping Systems (MMS), result of these technological advances, leads to the necessity of developing suitable mass processing methods. In this context, our study focuses on the automation of Mobile Mapping data processing, especially through the extraction of linear and punctual elements, in order to increase production efficiency, but also quality and exhaustiveness of the deliverables. This paper describes the processes developed, based on image processing, photogrammetry as well as artificial intelligence, and more specifically deep learning and convolutional neural networks.

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.

Du NRTK vers le PPP-RTK, un exemple avec TERIA

■ Paul CHAMBON

Introduction TERIA

Le réseau TERIA a été initié en 2005 par l'Ordre des géomètres-experts avec l'ambition de doter la profession d'un outil de géolocalisation temps réel de précision centimétrique (0-5 cm).

L'idée de base était de répondre à l'obligation de géoréférencement de la production topographique dans un référentiel unique.

Cette démarche a constitué le socle de la mise en place de "Géofoncier" : le premier portail cartographique du foncier des géomètres-experts.

La société EXAGONE a été chargée de la mise en œuvre et de la gestion du réseau TERIA. Plus de la moitié des cabinets en France en sont actionnaires. Le service a été ouvert sur abonnement à toutes clientèles dès son origine.

Dans une démarche "Qualité de son management", TERIA est, à ce jour, l'unique réseau GNSS certifié QUALITÉ et ENVIRONNEMENT ISO 9001 - ISO 14001.

Aujourd'hui, TERIA couvre en France le territoire de la métropole et des Îles de Mayotte et Réunion, l'extension Guyane Antilles devant être opérationnelle en 2019. TERIA est de plus connecté aux réseaux européens limitrophes pour assurer une continuité transfrontalière.

Rappels techniques

Le RTK et N-RTK

Le RTK (*Real Time Kinematic*) est une technologie visant en première approche à transmettre en temps-réel les observations depuis un pivot aux mobiles GNSS. Ce procédé technique leur permet de lever les ambiguïtés (nombres entiers de longueurs d'onde dans chaque distance satellite-récepteur, inconnus lors de la première mesure de phase sur chaque fréquence) et ainsi proposer un positionnement de

précision centimétrique. La fonction du mobile est quant à elle de calculer le vecteur pivot-mobile en effectuant un calcul par double différence généralement. Cette modalité de calcul exige un géoréférencement très précis (1 à 2 cm) du pivot, car dans le cas contraire c'est l'ensemble des points relevés qui se retrouve en décalage du système de référence.

Le NRTK (*Network RTK*) consiste à mutualiser les données de plusieurs stations fixes d'un réseau. Elles sont transmises en temps réel à un centre serveur qui retourne aux usagers des corrections modélisées pour toute la zone de couverture. Il existe plusieurs types de corrections en NRTK :

- FKP (*Flächen-Korrektur-Parameter*)
- MAC (*Master Auxiliary Concept*)
- VRS (*Virtual Reference Station*)

Historiquement, le FKP a été initié par la société GEO++ basée en Allemagne (Geo++® White PaperNr. 2002.01), le MAC par la société LEICA Geosystems (*White Paper June 2005 Take it to the MAX!*) et le VRS par la société TRIMBLE (*White paper Virtual Reference Station Systems, 2002*). La diffusion des corrections NRTK se fait généralement en RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), qui est le format standard pour l'échange des données brutes GNSS. Ainsi à l'origine de TERIA

en 2005, le RTCM 2.3 était le format d'échange utilisé avec le seul format de données FKP. Il a été remplacé en 2008 par le RTCM 3.1 pour intégrer les données GLONASS, le format MAC ainsi que des messages standards sur le calcul des résidus en VRS. Ceci a permis de mettre à disposition deux nouveaux types de corrections (point de montage MAC30 et PRS30). Depuis 2018, le RTCM 3.2 ou aussi appelé RTCM MSM (*Multiple Signal Messages*) a pris le relais pour véhiculer également les données GALILEO et BEIDOU.

Le réseau TERIA a toujours eu pour politique de fournir des corrections adaptées au matériel GNSS des clients, en fournissant les corrections privilégiées pour chaque constructeur pourvu qu'elles répondent aux standards. Pour ces mêmes raisons les corrections GALILEO et BEIDOU sont mises à disposition via le RTCM 3.2 même si actuellement tous les messages du RTCM 3.1 n'ont pas encore été adaptés pour GALILEO et BEIDOU en RTCM 3.2. Techniquement il existe une différence de philosophie importante entre ces trois types de corrections.

Le format MAC (*Master Auxiliary Concept*).

Ce format consiste à diffuser au récepteur mobile les observations brutes de la station la plus proche (dite station

Type	Content
1014	GPS Network Auxiliary Station Data coordinate difference between one Aux station and the master station
1015	GPS Ionospheric Correction Differences for all satellites between one Aux station and the master station
1016	GPS Geometric Correction Differences for all satellites between one Aux station and the master station
1017	GPS Combined Geometric and Ionospheric Correction Differences for all satellites between one Aux station and the master station (same content as both types 1015 and 1016 together, but less size)
1018	RESERVED for GPS Alternative Ionospheric Correction Difference Message Message type 1018 is not yet defined.



maîtresse) et d'ajouter à cela des corrections MAC, c'est-à-dire de fournir des corrections différentielles entre la station maîtresse et les stations auxiliaires environnantes. Cela permet au récepteur mobile de modéliser ses propres corrections locales NRTK. L'ensemble du réseau NRTK n'a qu'un impact relativement faible sur le calcul des corrections, car une grande partie du traitement est embarquée dans le mobile GNSS. Ci-contre, voici une table détaillant les données MAC pour le GPS au format RTCM 3

Le Format FKP (*Flächen-Korrektur-Parameter*)

En FKP, le réseau NRTK va fournir davantage de corrections. Comme pour le format MAC le récepteur mobile va recevoir les données brutes de la station la plus proche (RTK), auxquelles nous allons fournir des corrections géométriques et ionosphériques précises. Ces données vont lui permettre de converger rapidement et précisément. Dans ce cas le réseau NRTK a besoin de calculer de manière précise ces corrections ionosphériques et géométriques. Le calcul et la transmission de ces deux données se font sous la forme d'un calcul de plans centrés sur chaque station composant le réseau. Ainsi seuls les plans de la station servant de base au mobile sont transmis. Voici ci-dessous la table RTCM 3 des messages pour le FKP

Type	Content
1034	GPS FKP
1035	GLONASS FKP

Le format VRS (*Virtual Reference Station*)

Pour le VRS, le récepteur mobile envoie sa position approchée, à partir de laquelle le serveur va fournir les observations artificielles qui seraient obtenues par une station située en cette position. La première position reçue par le serveur servira à calculer les coordonnées de cette station virtuelle. Ainsi le récepteur mobile fonctionne en positionnement différentiel simple (RTK avec cette station VRS). Pour estimer la qualité des observations virtuelles, les résidus des calculs sont

Type	Content
1030	GPS Network Residuals
1031	GLONASS Network Residuals

transmis au récepteur via des messages RTCM standards, voir ci-dessus. Ainsi le récepteur peut estimer la qualité de son positionnement en fonction de la qualité des observations générées. De cette façon, une grande partie du travail est effectuée par le serveur pour fournir de manière très précise des données virtuelles issues de modèles, à partir des mesures réelles obtenues sur les stations permanentes. Au final quel que soit le type de correction choisi par l'utilisateur, la précision reste la même et les temps de convergence relativement proches. La technologie NRTK permet ainsi au réseau TERIA de couvrir toute la France métropolitaine, la Réunion et Mayotte, et en 2019, la Guyane et les Antilles françaises.

L'accès aux corrections NRTK :

L'accès aux corrections NRTK se fait au travers d'un serveur NTRIP, qui identifie les utilisateurs avant de leur adresser les corrections. La connexion se fait via une connexion Internet. Aujourd'hui, la majorité des utilisateurs du réseau TERIA utilise le réseau téléphonique pour accéder à Internet, soit via une carte SIM directement insérée dans leur équipement de levé, soit via un partage de connexion avec leur Smartphone. Cependant notre expérience montre qu'il reste un point limitant pour les utilisateurs confrontés aux zones non couvertes (zones blanches) ou mal couvertes (zones grises) par le réseau téléphonique. Les utilisateurs peuvent consulter des cartes de couverture mises à disposition par les opérateurs téléphoniques (par exemple pour Orange: <https://reseaux.orange.fr/cartes-de-couverture/mobile-3g-4g>) Une première solution a été apportée en proposant des cartes SIM multi-opérateurs. Ainsi lorsqu'un opérateur est en difficulté sur une zone géographique, la carte bascule automatiquement sur celui qui assure la meilleure desserte. Un autre inconvénient du protocole NTRIP en NRTK est qu'il faut que l'utilisateur renvoie sa position au serveur lors de son identification afin de lui

envoyer les corrections adaptées. En effet comme vu précédemment, les corrections sont locales. Elles sont soit issues de la station GNSS la plus proche (FKP et MAC), soit issues d'une station virtuelle située à proximité de la position du récepteur mobile (VRS). Il est donc nécessaire de travailler avec le protocole TCP/IP afin d'avoir un lien bidirectionnel entre l'utilisateur et le serveur NTRIP.

Une solution palliative est de diffuser les corrections par satellites. Ainsi nos travaux d'innovation initiés en 2010 ont permis de mettre en place le service TERIASat.

L'innovation TERIASat : du NRTK vers le PPP-RTK

Les travaux de recherche et d'innovation ont permis de développer un nouveau type de service basé sur l'association de deux technologies :

- Le NRTK (*Network Real Time Kinematic*)
- Le PPP (*Precise Point Positioning*)

Le NRTK permet de calculer de manière très précise les corrections atmosphériques nécessaires pour maîtriser les contraintes de traversée des deux couches atmosphériques ionosphère et troposphère. Ces deux informations sont essentielles pour le PPP-RTK. Pour le calcul de ces deux modèles nous utilisons la solution GNSMART de GEO++ qui fournit les corrections NRTK de TERIA.

Le PPP consiste à calculer des corrections globales au niveau des signaux GNSS bruts, sans bénéficier de l'effet différentiel avec une autre station proche. Cette méthode exige une connaissance très poussée de tous les paramètres qui perturbent la mesure (horloges, orbites, attitude de chaque satellite, propagation dans l'atmosphère, marées terrestres, etc.). Ainsi toute une série de corrections sont mises à disposition, en particulier :

- les corrections d'horloges,
- les corrections d'orbites,
- les biais électroniques des satellites sur le code et la phase.

Il existe des services publics PPP temps-réel utilisables à des fins de recherche et de tests et mis à disposition via le site de l'IGS : <http://www.igs.org/rts>





Le PPP seul permet alors de corriger de manière très précise toutes les erreurs liées au système GNSS. Il est donc possible de se positionner de manière centimétrique en PPP avec un seul récepteur. Toutefois, les modèles de corrections atmosphériques ne convergent actuellement vers une estimation précise qu'au bout de 20 à 30 minutes seulement. Cette technologie de positionnement précis n'est donc utilisée que dans des cas très spécifiques en domaine maritime, dans des zones géographiques où il n'est pas économiquement possible de fournir un service RTK/NRTK (chantier ponctuel, zone de grande culture...), etc.

L'association PPP-RTK consiste donc à transmettre des corrections PPP et à diffuser en parallèle des corrections via des modélisations des erreurs troposphériques et ionosphériques très précises issues d'un réseau de station GNSS dense. Il s'agit du concept SSR (http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf).

De ce fait, il est possible de travailler avec une précision centimétrique sur l'ensemble de la zone de couverture des modèles atmosphériques, tout en gardant un temps de convergence équivalent au NRTK.

Cette technologie a plusieurs avantages comparée au NRTK :

- les erreurs sont décomposées par poste d'erreur,
- le service est global et localement augmenté,
- les corrections dépendent de modèles et non de la(les) station(s) la(les) plus proche(s),
- la diffusion des corrections ne dépend pas de la position du mobile,
- la bande passante nécessaire ne dépend pas du nombre d'utilisateurs.

Cette technologie n'est pour le moment pas encore standardisée au niveau du format, seule la partie PPP a ses propres messages RTCM. Le choix a été donc fait de créer un service TERIASat basé sur un format en partie propriétaire. Cette solution s'appuie donc sur les messages

RTCM existants et fournit des corrections d'ionosphère et de troposphère via des messages propriétaires.

Les récepteurs actuels ne sont pas compatibles avec les messages RTCM pour le PPP, car toutes les solutions commerciales PPP (tel que Omnistar, Starfire, Atlas, etc.) fonctionnent avec des formats de type propriétaire. Notre format de corrections n'est donc pas compatible en direct avec les récepteurs du marché, mais l'innovation allant dans ce sens, il fallait se conformer avec les standards actuels. Il a donc fallu innover pour exploiter nos corrections avec les récepteurs actuels.

Les premiers essais ont consisté à utiliser les données brutes d'un récepteur et à ajouter les corrections PPP-RTK dans un moteur de calcul de la position.

Pour cela nous avons intégré en mode mobile des données de stations permanentes dans notre moteur de calcul des corrections NRTK (GNSMART de GEO++) sans spécifier les coordonnées de référence et sans utiliser ces mêmes données pour le calcul des corrections. Nous avons utilisé pour ces tests les données des flux temps-réel de stations IGN CREI, BRST, AXPV, SCOA et ENTZ le 20/08/2014. L'échelle des figures de 1 à 5 ci-contre est de +/- 10 cm, les écarts aux points connus sont E-W, N-S et verticaux. Cette méthode permet ainsi d'utiliser les modèles atmosphériques du réseau, sans avoir à les convertir dans un format spécifique pour les exporter. Les résultats étaient très bons. On avait un positionnement avec une déviation standard centimétrique et un temps de convergence de dix secondes.

Ces tests nous ont permis de valider nos choix techniques :

- la couverture est bien nationale,
- la précision centimétrique est atteinte,
- le temps de convergence est très rapide (autour de 10 s.).

Cependant, cette solution n'était pas compatible avec les appareils mobiles qui ne permettent pas d'accéder aux données brutes. Cela impliquait aussi une incompatibilité avec les logiciels des constructeurs, car la position n'était plus calculée par le récepteur mais par notre logiciel. En effet, dans ce cas la position est calculée par le serveur, hors les logiciels constructeurs utilisent des

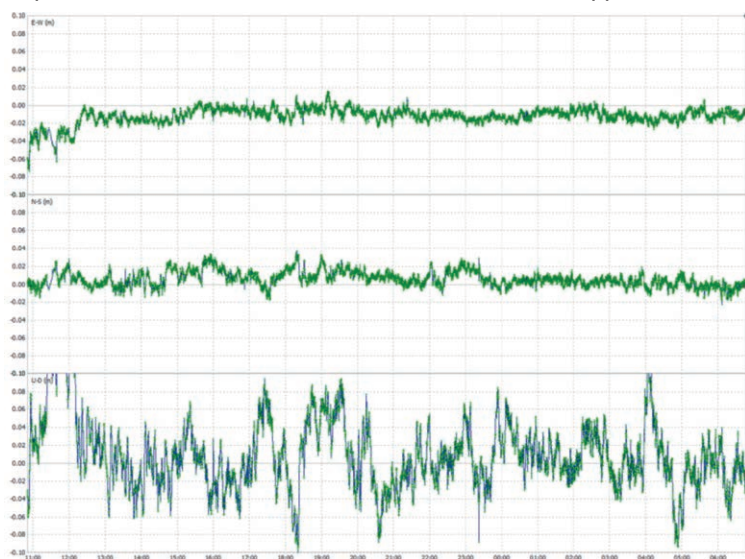


Figure 1. CREI

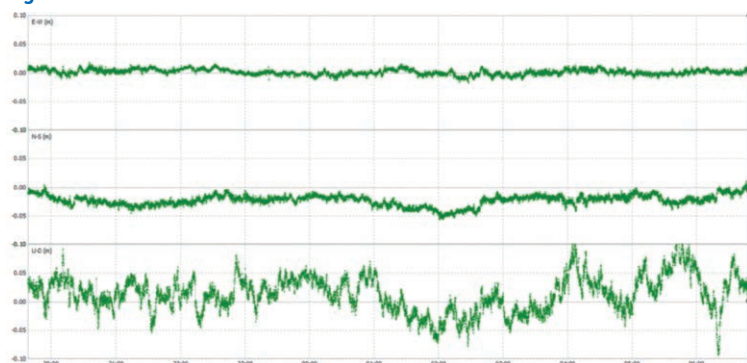


Figure 2. BRST

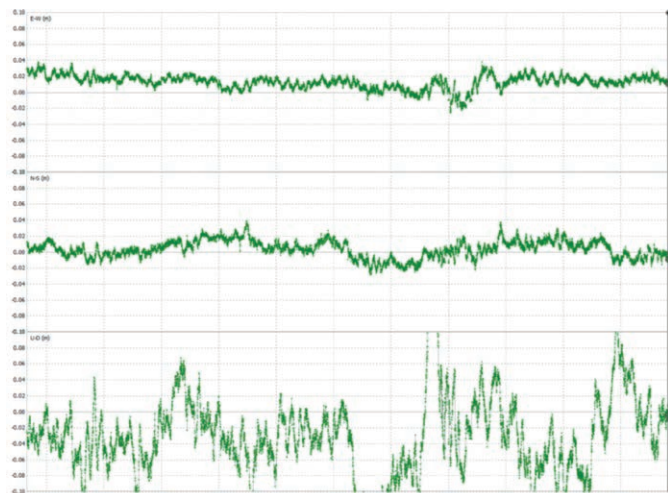


Figure 3. AXPV

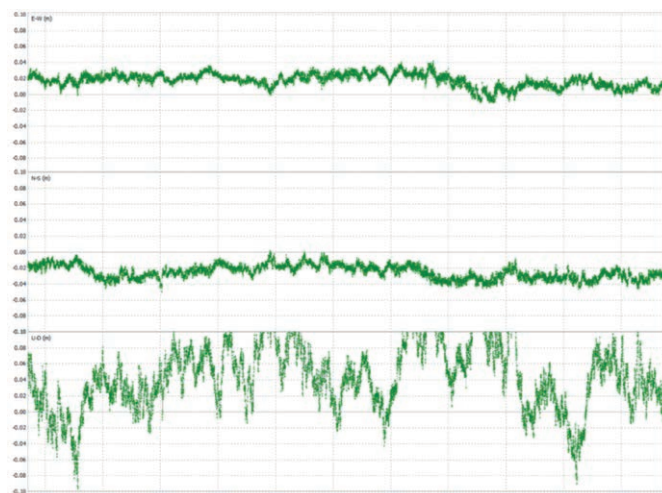


Figure 4. SOCA

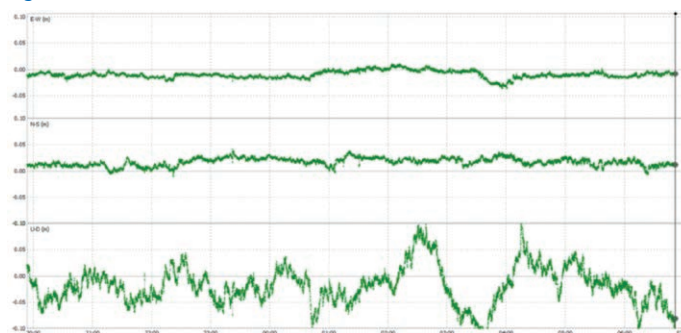


Figure 5. ENTZ

données propriétaires pour récupérer la position de leur récepteur. C'est aussi un changement de philosophie dans le sens où TERIA n'est plus seulement un opérateur de corrections GNSS, mais calcule également la position du mobile, ce qui n'est pas le cas en NRTK par exemple, où la position est calculée par le récepteur en utilisant les corrections du réseau.

Pour ces différentes raisons nous nous sommes donc orientés vers une solution à même de convertir les corrections PPP-RTK en corrections NRTK de type VRS. Cette solution nous a conduits à développer une *Library* TERIASat. Ce concept porte le nom de SSR2OSR évoqué dans le document http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf.

Ainsi à partir des corrections PPP-RTK envoyées nous reconstruisons des observables virtuelles. Pour permettre de revenir au standard évoqué plus haut en NRTK : VRS.

En fait il s'agit d'effectuer la transformation inverse du calcul des corrections, en effet nous utilisons les observations de nos stations pour décomposer les pseudo-distances mesurées en :

- pseudo-distance
- erreur d'orbite,
- erreur d'horloge,

- erreur sur les délais ionosphérique et troposphérique,
- mesure des biais de code et phase.

En transmettant les corrections PPP-RTK et en récupérant les éphémérides, notre *Library* est en mesure de reconstruire les pseudo-distances pour générer des observations virtuelles et ainsi fournir des corrections de type NRTK au mobile au format RTCM 3.1 ou 3.2, format reconnu par l'ensemble des appareils du marché mais issu initialement de corrections PPP-RTK.

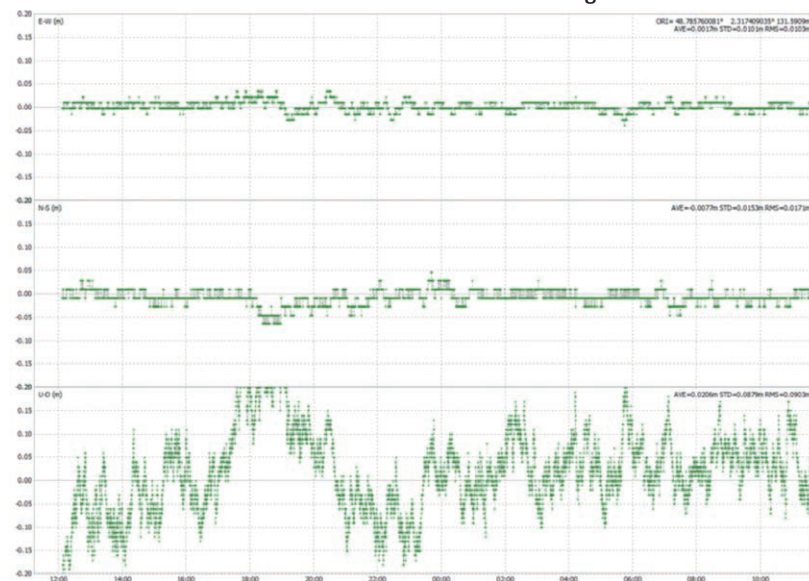


Figure 6. série temporelle : échelle +/- 20 cm

Pour cela, la *Library* récupère en temps-réel les corrections PPP-RTK, les éphémérides au format RTCM et la position du mobile au format NMEA de type GGA (Norme issue de la *National Marine Electronics Association*, la trame GGA permet notamment de transmettre la position GNSS). À partir de cette position nous récupérons l'heure GPS, afin de synchroniser le calcul des corrections avec le récepteur mobile et la position pour générer les observations de la station VRS.

Dans un premier temps la *Library* a été développée sous *Windows*. Et la troposphère n'était pas diffusée, mais seulement estimée en fonction de la position du mobile. Les premiers essais ont été effectués localement avec des modèles ionosphériques locaux sur une zone de 60 000 km². Voici les résultats des premiers essais avec un récepteur de marque TRIMBLE : les résultats (*figure 6*) ont été concluants sur le temps de convergence.





Pour la précision, en planimétrie celle-ci est bien conforme. Néanmoins en altimétrie on mesure des écarts relativement importants avec des variations allant jusqu'à 20 cm. Le fait que seule la composante altimétrique est impactée par des écarts importants nous a amenés à changer nos algorithmes. A présent, nous prenons en compte les erreurs de troposphère en diffusant des corrections pour cette couche atmosphérique.

Pour cela, nous avons fait le choix de diffuser les corrections troposphériques via une grille (figure 7). Le pas de la grille a été adapté en fonction des différents essais que nous avons effectués. Cette grille est utilisée par la *Library* en interpolant les valeurs de nœud de la grille à proximité de la position du mobile.

Pourtant au vu des résultats, les corrections ionosphériques semblent suffisamment précises et ne nécessitent pas d'ajustement.

Des résultats intégrant cette amélioration sont présentés par la suite (voir figure 10 et figure 11).

Pour résumer les corrections sont donc composées de :

- corrections d'orbites,

- corrections d'horloges,
- corrections des biais de code et de phase,
- modélisation ionosphérique,
- modélisation troposphérique (Grille).

Et la *Library* intègre ces corrections afin de fournir des corrections de type VRS au mobile.

En parallèle et afin d'être compatible avec le plus grand nombre d'équipement GNSS, nous avons fait le choix de partir sur une solution de communication satellitaire avec un boîtier externe dans un premier temps. Pour le développement, le choix s'est porté sur la société Viasat (figures 8 et 9).

Elle fut en mesure de nous fournir un boîtier de réception configurable afin d'intégrer notre *Library*. La nouvelle solution a pour spécificité d'offrir une communication en bande-L.

Cette bande de fréquence est intéressante, car elle permet de réceptionner les signaux avec des antennes de petites tailles. C'est d'ailleurs dans cette bande de fréquence que sont diffusés les signaux GNSS. La *Library* a été recompilée sous linux dans lequel nous avons ajouté des options supplémentaires



Figure 8. Essais dynamiques de réceptions des corrections en Bande-L



Figure 9. Le nouveau boîtier intégrant la *Library*

pour définir plus de choix sur la station VRS générée (longueur du vecteur, fréquence de rafraîchissement...).

Le POC (*Proof of Concept*) a été développé avec la première version du boîtier Viasat.

Par la suite, une nouvelle monture du boîtier nous a été livrée. Cette antenne de réception permettant de s'installer facilement, dans un sac à dos par exemple. Cette configuration a été testée dans différents domaines d'application (topographie, application agricole...).

La qualité du positionnement et le temps de convergence correspondaient bien à notre souhait (voir figures 10 et 11). Cependant, les résultats ont montré plusieurs limites telles que la nécessité d'orienter le sac à dos en direction du satellite géostationnaire lors d'une utilisation pédestre par exemple.

Pour contourner ces contraintes, nous nous sommes orientés vers les constructeurs de matériel GNSS. En effet certains récepteurs GNSS intègrent déjà un modem de réception L-Band. Ainsi ces équipements sont en mesure de réceptionner naturellement les signaux émis par le satellite géostationnaire.

Nous avons donc contacté plusieurs constructeurs afin de leur proposer d'intégrer la *Library* TERIASat directement dans le récepteur mobile. Le premier constructeur à avoir franchi le pas avec une solution commerciale a été Spectra Précision. Nous avons donc été en mesure de faire des tests (voir figures 10 et 11) avec deux récepteurs de leur gamme de produits :

- le SP90m,
- le SP60.

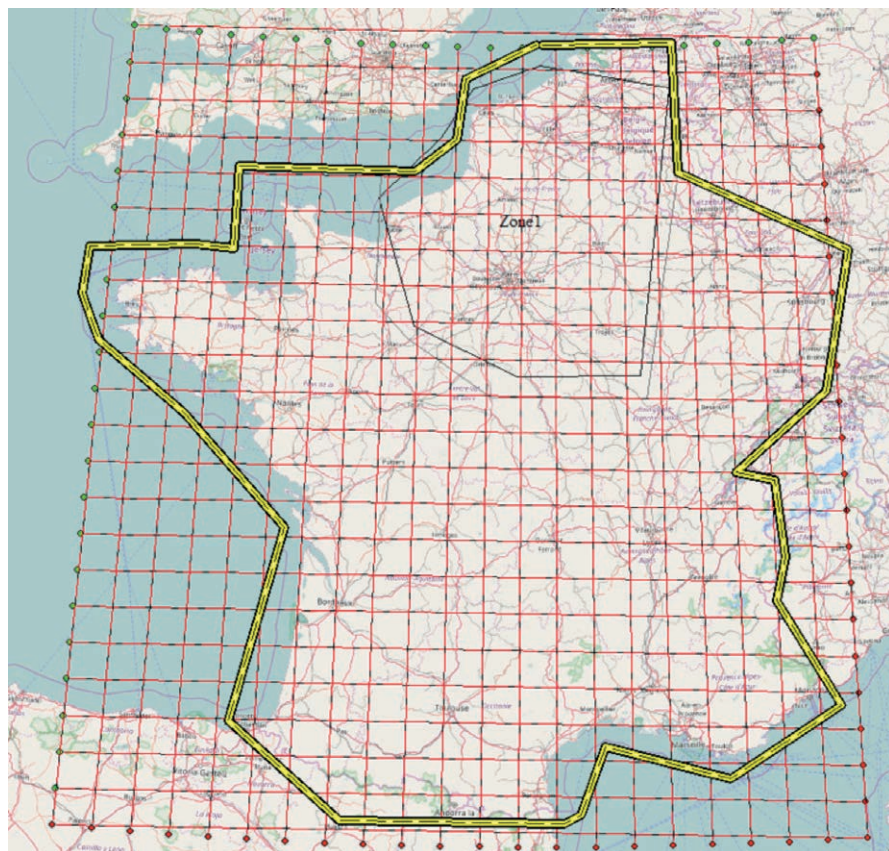


Figure 7. Grille troposphérique utilisée

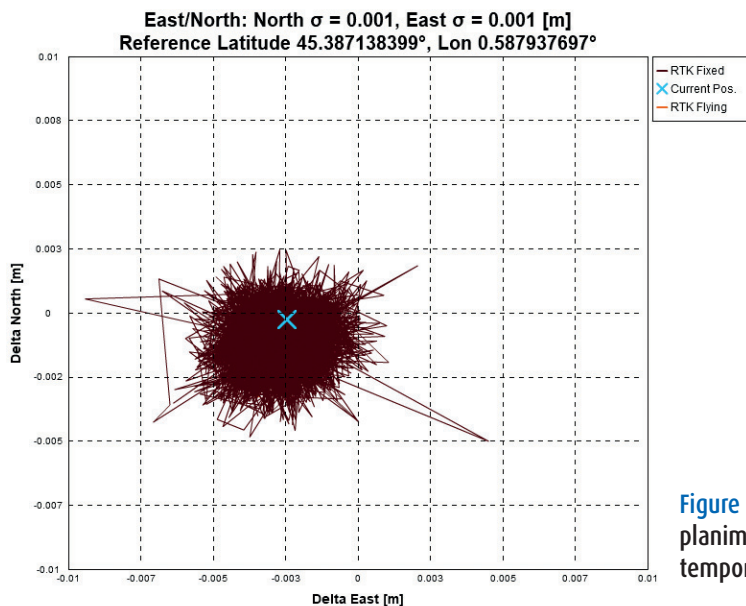


Figure 10. Précision planimétrique (série temporelle de 24h)

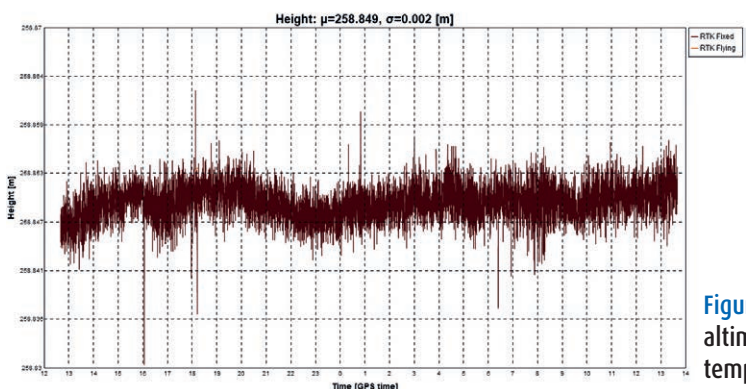


Figure 11. Précision altimétrique (série temporelle de 24h)

<http://www.geopp.de/pdf/geopp-rtcm-fkp59-1.1.pdf>

https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/general/general/tech_paper/brown_et_al_networkrtk_en.pdf

https://www.researchgate.net/publication/254250991_How_well_does_the_Virtual_Reference_Station_VRS_system_of_GPS_base_stations_perform_in_comparison_to_conventional_RTK
Le lexique GNSS : aftopo.org

ABSTRACT

TERIA is a NRTK service which enables the achievement of centimeter accuracy within a few seconds. The first limitation which is reported by the user at our assistance is that to have access to the service the customers need an Internet connection. Indeed the NTRIP protocol is based on http and need a TCP/IP connection to enable to connect to our server to receive the corrections. To be able to counter this limitation we have to work to change the format of the corrections. In NRTK our server needs the position of the rover to send the right corrections. Another approach consists to use PPP, which can be broadcasted but such services need 20 to 30 minutes to reach centimeter accuracy. So we work to combine PPP and NRTK to enable to have the NRTK performance with the advantage of PPP. For that we developed PPP-RTK corrections, which is PPP augmented with ionosphere and troposphere model. So we were able to broadcast all data to correct GNSS pseudo range in an area. Another limitation was that the rover is not able to use PPP-RTK corrections as it's not standardize. So we decided to counter also this limitation using a Library which can be installed in the rover and convert the PPP-RTK corrections in NRTK type VRS corrections which is fully standard in RTCM3. So our approach allowed us to broadcast corrections to enable GNSS rover to achieve centimeter accuracy in less than one minute. So we started a service transmitting such corrections through a geostationary satellite to cover area that are not covered by internet terrestrial networks (GSM, Wi-Fi ...). Also PPP-RTK has a lot of advantages to compared to NRTK and will certainly become a standard in the future, but as every new development it needs time for the industrial companies to agree on a standard...

Les résultats de tests étant probants, il a été décidé en 2018 de louer définitivement un canal satellite en bande L pour diffuser les corrections TERIASat.

TERIA est désormais en mesure de fournir un service commercial de corrections diffusées par satellite en utilisant la technologie PPP-RTK.

Le SP60 de Spectra Précision a été le premier appareil équipé de la *Library* TERIASat. Il propose une version intégrée du *Firmware* qui permet ainsi de gérer automatiquement les flux de corrections NRTK (via le réseau cellulaire) et PPP-RTK (via une réception satellitaire). L'intérêt est d'offrir à l'utilisateur la meilleure solution de positionnement en fonction de la ou les sources de corrections disponibles.

Pour les utilisateurs qui veulent accéder à la technologie TERIASat tout en conservant leur matériel GNSS, un boîtier en complément de dimensions réduites et se fixant sur la canne du mobile est en cours d'élaboration. Il sera compatible avec la majorité des

matériels en proposant de s'interfacer en Wifi, Bluetooth ou via un câble série. Aujourd'hui, de nouvelles applications se développent dans les domaines les plus divers et concernent tous les éléments structurants de la vie en société. Devant cette explosion et la prolifération des outils technologiques, une dominante se dégage, celle de la convergence de tous les besoins de géolocalisation vers une précision centimétrique. Ainsi, le PPP-RTK permet de répondre au besoin croissant du nombre d'utilisateurs. Et de nouveaux protocoles d'échange sont en cours de développement pour permettre d'augmenter la disponibilité multipliant les moyens de diffusion des corrections. ●

Contact

Paul CHAMBON, Directeur Technique TERIA.
paul.chambon@reseau-teria.com

Bibliographie

www.reseau-teria.com

Ajustement global d'un réseau géodésique classique étendu.

Application à un réseau test du réseau primordial Algérien

■ Bachir GOURINE

Par le passé, la compensation du réseau géodésique classique national se faisait par petits blocs et par fuseau suivant la projection UTM. Cela a engendré une propagation d'erreurs entre les blocs et des altérations linéaires au niveau des zones de jonction entre les fuseaux de la projection UTM. Cet article présente la démarche de traitement et calcul du réseau géodésique classique national Algérien, par un ajustement global (utilisant le programme CHABAKA) suivant un fuseau étendu (utilisant le programme TRANMERCAGE). L'application a concerné un réseau échantillon du réseau géodésique primordial de l'Algérie (réalisé par l'IGN, en 1955). Les résultats obtenus sont illustrés et discutés.

MOTS-CLÉS

Ajustement global,
Fuseau étendu,
CHABAKA,
TRANMERCAGE,
Nord Sahara 1959

Introduction

En règle générale, les réseaux géodésiques sont indispensables pour toute application utilisant des données localisées. Quelle que soit la technique d'observation utilisée (terrestre ou spatiale), le but recherché est de réaliser un canevas de points d'appuis homogène et précis qui servira de base pour toutes les études à caractère utilitaire et scientifique (cartographie, géodynamique, surveillance d'infrastructures...).

Les systèmes géodésiques locaux, limités aux territoires nationaux, issus des observations terrestres (angles et distances) et astronomiques (orientations) sont caractérisés par :

- un point fondamental, point origine à partir duquel le réseau est observé et ajusté,
- un ellipsoïde qui soit le plus possible confondu localement avec le géoïde,
- une projection cartographique et un méridien origine.

La réalisation de tels systèmes est basée sur un modèle d'estimation des positions de l'ensemble des points du réseau.

Si un de ces éléments est modifié, les coordonnées des points du réseau

le sont également : changement de système géodésique.

Le système géodésique actuellement utilisé en Algérie dénommé "Nord Sahara 1959 ou NS-59" a été réalisé par l'Institut Géographique National IGN (1959) et calculé sur l'ellipsoïde Clarke 1880 anglais. Ce système est issu d'un artifice de calcul basé sur deux différentes sources de données : un réseau géodésique (1^{er} ordre et 1^{er} ordre complémentaire) calculé dans le système ED50 (*European Datum 1950*) utilisant l'ellipsoïde international et un réseau astronomique. Pour concilier les deux canevas provenant de ces deux sources, un système de méridiens et parallèles a été établi sur l'ellipsoïde Clarke 1880 anglais tel que les discordances moyennes entre les coordonnées géographiques issues de la triangulation et de l'astronomie soient minimales. Le système de coordonnées résultant de cette approche a été appelé "système géodésique Nord Sahara 1959" qui est déduit du système ED50 par une simple transformation (translations en longitude et latitude) [Reyt, 1960].

La caractérisation d'un tel système géodésique (Nord Sahara) pose un

problème au niveau de la définition de l'origine (point fondamental mal défini ou sans réalité physique). En conséquence, la méconnaissance de la position et de l'orientation de l'ellipsoïde dans l'espace se répercute sur la qualité des résultats (réseau géodésique). D'autre part, les moyens de calculs utilisés lors de la réalisation du Nord Sahara 1959 étaient assez rudimentaires et les calculs d'ajustement ont été exécutés par petits blocs de quelques points s'appuyant les uns sur les autres. Pour un pays étendu comme l'Algérie, ce type d'ajustement peut altérer la précision et l'homogénéité du système Nord Sahara (problèmes d'échelle et d'orientation du réseau géodésique). D'autre part, l'utilisation de la projection UTM comme système cartographique du pays, pose le problème de limitation du champ d'application au-delà de 3° en longitude de part et d'autre du méridien central et d'existence des altérations importantes au niveau des zones de jonction entre les fuseaux. Dans ce contexte, le Centre des Techniques Spatiales (CTS) et l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) ont engagé un projet de coopération sur la situation actuelle du réseau géodésique national NS-59 et sur les aspects fondamentaux liés à sa refonte. L'étape clé de ce projet est l'établissement d'une démarche d'ajustement global du réseau géodésique national en se basant sur l'extension de fuseau. Ci-après, une description de la démarche adoptée et une présentation des résultats de l'application sur un réseau test du réseau géodésique primordial algérien.

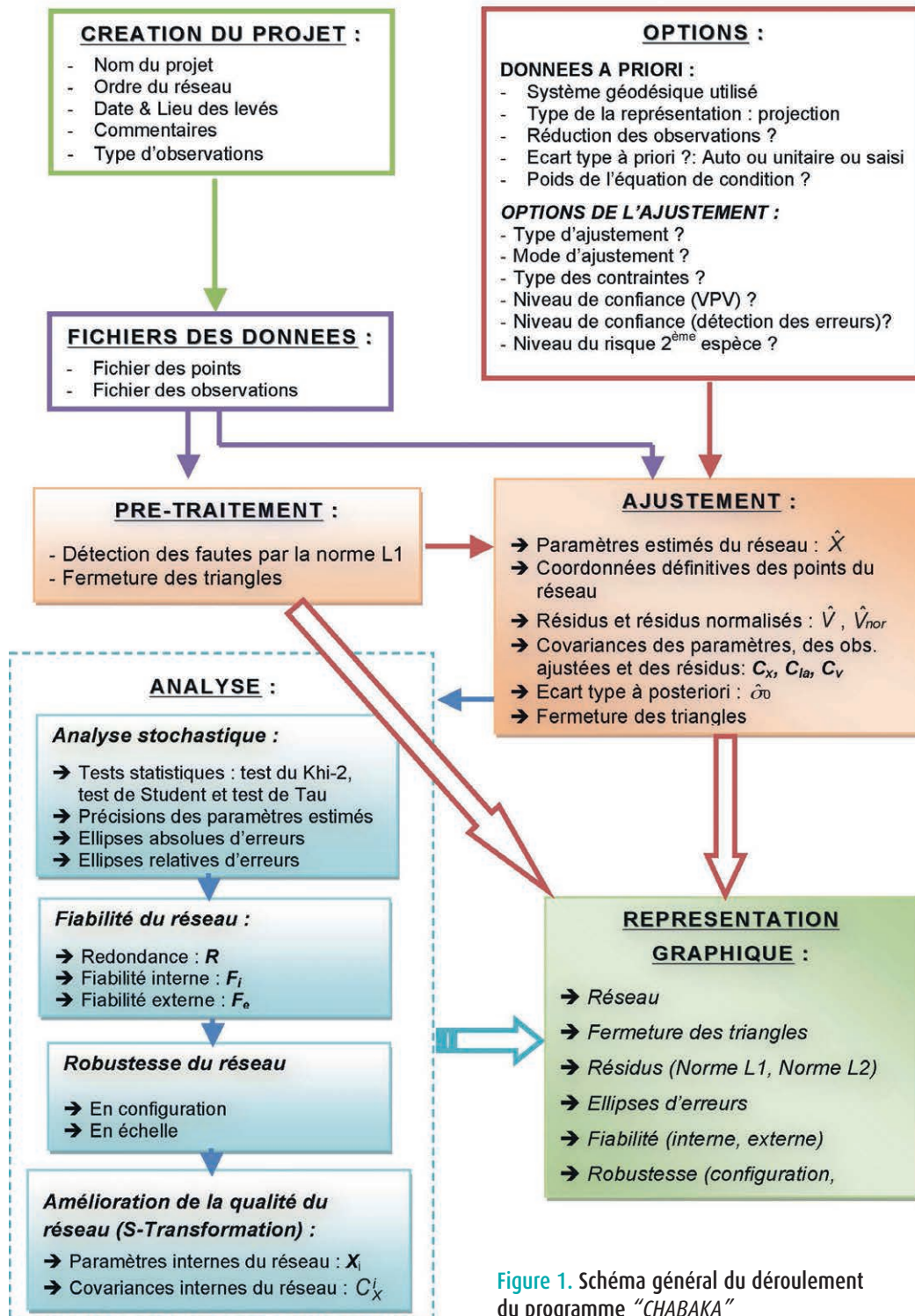


Figure 1. Schéma général du déroulement du programme "CHABAKA"

Méthodologie

L'approche méthodologique de ce projet se base essentiellement sur le développement de l'ajustement global du réseau géodésique primordial national, par utilisation du fuseau étendu. Ci-après, une description succincte des programmes réalisés.

■ Ajustement Global par le programme CHABAKA

Le programme d'ajustement et

d'analyse des réseaux géodésiques dénommé "CHABAKA" شبكة (désignant "réseau" en arabe), établi au niveau du Département de Géodésie Spatiale du CTS (ex. CNTS), est un programme écrit en IDL (*Interactive Data Language*). Il a été réalisé dans le cadre du mémoire de Magister de M. GOURINE Bachir (2004), [Gourine, 2004]. La version actuelle de ce programme est basée uniquement sur le

traitement des observations géodésiques classiques (angles et distances) et astronomiques (azimut de Laplace) pour l'établissement des réseaux géodésiques bidimensionnels (2D). Cet outil a l'avantage, d'une part, d'intégrer une gamme de modèles d'ajustement de canevas géodésiques, afin d'élargir son champ d'application (réseaux géodésiques et cadastraux, auscultation d'ouvrages d'art et de sites industriels,



surveillance sismique, etc.) et d'autre part, de présenter un caractère évolutif (possibilité d'enrichissement du logiciel par d'autres modules de traitement selon l'application).

Les différentes fonctionnalités du programme "CHABAKA", sont définies comme suit :

- **Filtrage des observations géodésiques** : détection des fautes et des mesures aberrantes pour s'assurer de la qualité des observations (norme L1 et fermeture des triangles).
- **Ajustement du réseau géodésique** : estimation des paramètres géodésiques (coordonnées des stations) par la méthode des moindres carrés (norme L2). Dans cette étape, la définition du DATUM (origine, mise à l'échelle et orientation du réseau géodésique) repose sur la technique des contraintes : contraintes classiques ou réseau fixé, contraintes minimales, contraintes internes ou réseau libre, contraintes pondérées, contraintes mixtes (classiques et pondérées).
- **Outils d'analyse statistique du réseau géodésique estimé** : évaluation de la qualité des observations et des paramètres, et de la fiabilité du réseau.
- **Analyse de robustesse du réseau géodésique estimé** : évaluation des effets des erreurs d'observations sur le réseau en utilisant le concept de

tenseur de déformation [Gourine & Ghezali, 2006].

- **Amélioration de la qualité du réseau géodésique estimé** par application de la S-transformation sur les paramètres du réseau et leur matrice de variance covariance.

La *figure 1* illustre le déroulement de la chaîne de traitement et d'analyse des observations géodésiques "CHABAKA". Pour de plus amples détails sur l'aspect théorique de l'ajustement et le déroulement du programme CHABAKA, se référer au rapport technique n°1 du projet [Gourine, 2014].

■ Transformation en fuseau étendu par le programme TRANMERCAFE

Cette partie a fait l'objet d'un article, dans la revue XYZ n°155 [Gourine et al., 2018]. Généralement, l'inconvénient principal des formules classiques de la projection UTM réside, d'une part, dans le calcul des coordonnées chaque fois que l'on travaille sur un réseau qui s'étale sur plusieurs fuseaux, car on utilise autant de systèmes de coordonnées que de fuseaux et d'autre part, dans la limitation du champ d'application à 3° de part et d'autre du méridien central. La résolution de ce problème revient donc à unifier le système de coordonnées, par l'utilisation du fuseau étendu.

L'étude menée, dans ce cadre, a abouti

à la réalisation d'un programme dénommé TRANMERCAFE (TRANSverse MERCator – Fuseau Étendu) [Daouadi, 2015]. Ce dernier permet d'effectuer le passage direct des coordonnées géographiques en coordonnées projection de Mercator Transverse et inversement, exprimées dans un fuseau étendu basé sur trois méthodes d'extension : projection de Mercator Transverse de l'IGN (MT_IGN), passage par la sphère de courbure moyenne (SCM) et la projection de Gauss-Krüger (GK).

Les résultats de cette étude ont montré que les méthodes d'extension de fuseau GK et MT_IGN fournissent une précision largement suffisante de l'ordre de $(10^{-6}\text{mm et } 10^{-3}\text{mm})$, respectivement, entre passages direct et inverse. Par contre, la 3^e approche, celle de SCM peut atteindre une précision décimétrique lorsqu'on s'éloigne du méridien central ($\Delta \lambda \geq 18^\circ$). Enfin, l'approche de la projection de Gauss-Krüger (GK) a été choisie pour la transformation des coordonnées UTM du réseau géodésique primordial suivant le fuseau étendu.

■ Stratégie de traitement

La stratégie de traitement adoptée consiste aux points suivants :

- transformation en fuseau étendu du réseau géodésique par la méthode de Gauss Krüger (GK), en utilisant le programme TRANMERCAFE ;

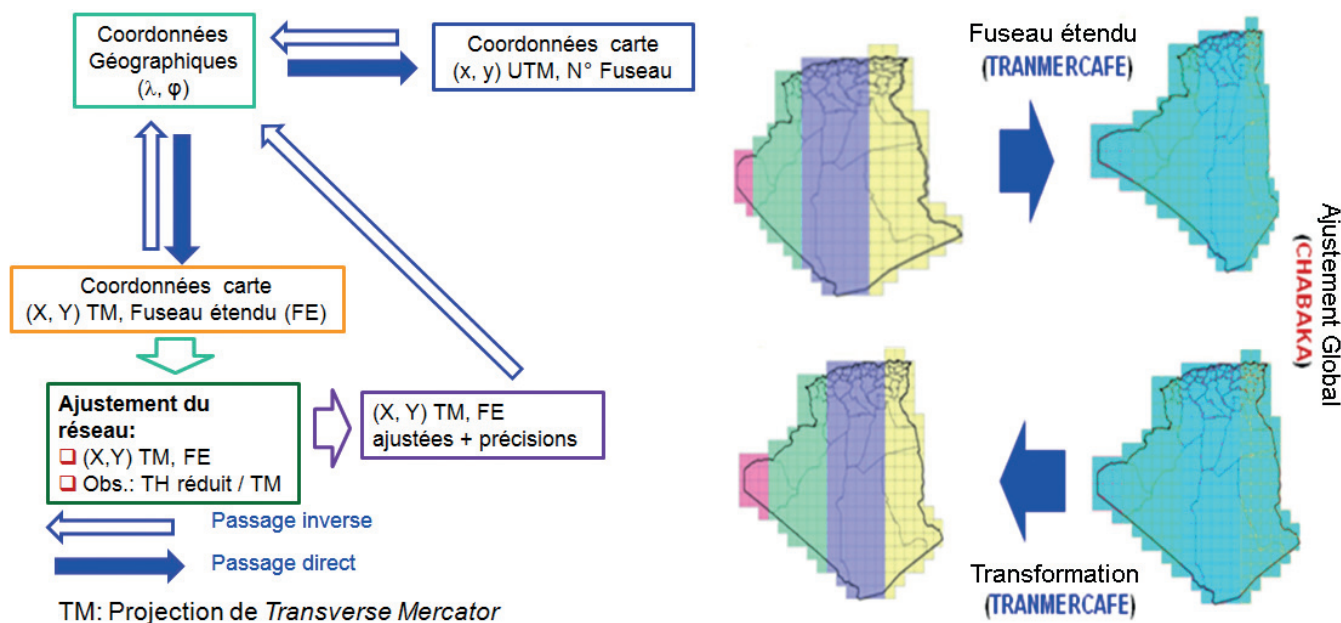


Figure 2. Démarche générale de l'ajustement global du réseau par l'utilisation du fuseau étendu



- ajustement du réseau, exprimé dans un fuseau étendu, par le programme CHABAKA. Les données d'entrée sont composées des coordonnées des points dans la projection choisie et des mesures des tours d'horizon observés et réduites ;
- conversion des coordonnées ajustées en coordonnées géographiques puis transformation en coordonnées UTM suivant le fuseau correspondant ;
- comparaison des coordonnées UTM ajustées et initiales.

En d'autres termes, la démarche entreprise pour l'ajustement global du réseau géodésique national consiste à effectuer la transformation des différents fuseaux en un fuseau étendu par le programme TRANMERCAFE puis à exécuter l'ajustement par le programme CHABAKA du réseau suivant le fuseau étendu et enfin, établir la transformation inverse des coordonnées ajustées vers leurs fuseaux UTM respectifs par le programme TRANMERCAFE (voir figure 2).

Application

■ Réseau géodésique test

Les données géodésiques utilisées, lors des traitements, sont constituées du réseau géodésique primordial national (réalisé par l'IGN en 1955) composé de 239 points, et d'un groupe de mesures composé de plusieurs centaines de lectures azimutales, effectuées sur le parallèle Nord de ce réseau (figure 3). Ces données, qui ont servi à la validation du programme TRANMERCAFE, ont été fournies par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT), en tant qu'organisme responsable des données géodésiques en Algérie.

Le réseau test contient 103 points de 1^{er} ordre, dont 6 points d'appui, s'étalant sur une zone de 2° Ouest au 7° Est en longitude et de 34° au 37° Nord en latitude (figure 4). Il est contenu dans trois fuseaux UTM (30, 31 et 32). Les mesures effectuées dans ce réseau, principalement, sont des tours d'horizon (424 lectures angulaires) et un azimut de Laplace (M'sabiha-Taфраoui).

Les observations azimutales ont été exécutées au théodolite Wild T3 à 20 couples. La mesure de chaque direc-

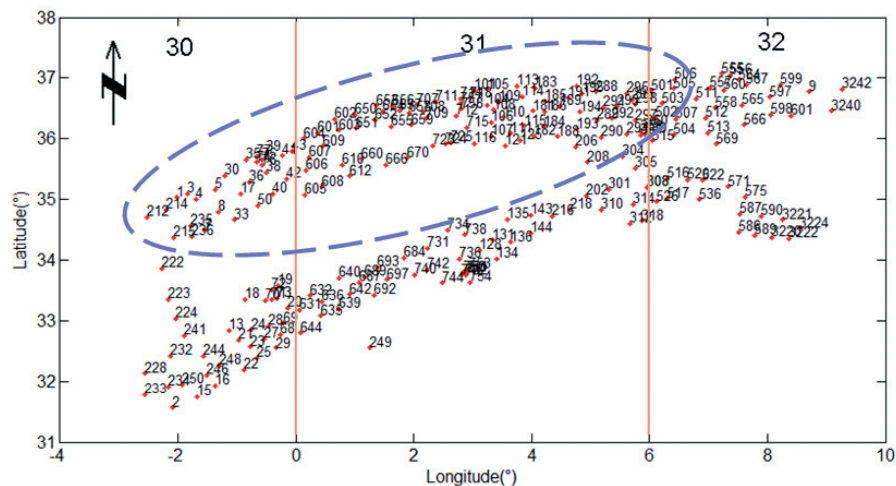


Figure 3. Réseau géodésique primordial national (en coordonnées géographiques). Le réseau test, utilisé dans l'ajustement global, est désigné par une ellipse.

tion est répartie sur 4 jours au moins. Chaque séance comprenant autant de cercles à gauche que de cercles à droite sur une même direction [INCT, 2007]. La précision du Wild T3 sur ces lectures azimutales est de 0.5 dmgr (ou 0.2'') [Barbier, 1969]. Généralement, la mise en station des théodolites a été faite suivant un centrage forcé sur les bornes du réseau de la triangulation en question, pour éviter l'erreur de centrage. La réduction à la corde dV de ces mesures a été effectuée, suivant la projection de Gauss-Krüger (GK), par la formule suivante :

$$dV = \frac{(y_B - y_A)}{2R^2 \sin(1'')} \cdot \frac{x}{3} \cdot \left(1 - \frac{x_B^2}{3R^2} \right)$$

Avec :

$x/3$: Abscisse qui correspond au tiers de la distance AB à partir de A.

R : Rayon de la sphère.

Avant de procéder à la compensation globale par CHABAKA du réseau test suivant le fuseau étendu, une phase de dépouillement de données géodésiques a été effectuée qui consistait aux tâches suivantes :

- élimination des fautes de transcription,
- vérification des tours d'horizon,
- identification des points sur la carte,
- les points, dont les coordonnées ne sont pas disponibles, ne sont pas considérés dans l'ajustement,
- élimination des mesures isolées,
- calcul des gisements de référence (V_0) de chaque station,
- réduction à la corde (dV) des lectures angulaires suivant la projection utilisée.

La figure 4 illustre la configuration du réseau test qui est représentée par la triangulation de 1^{er} ordre. On remarque

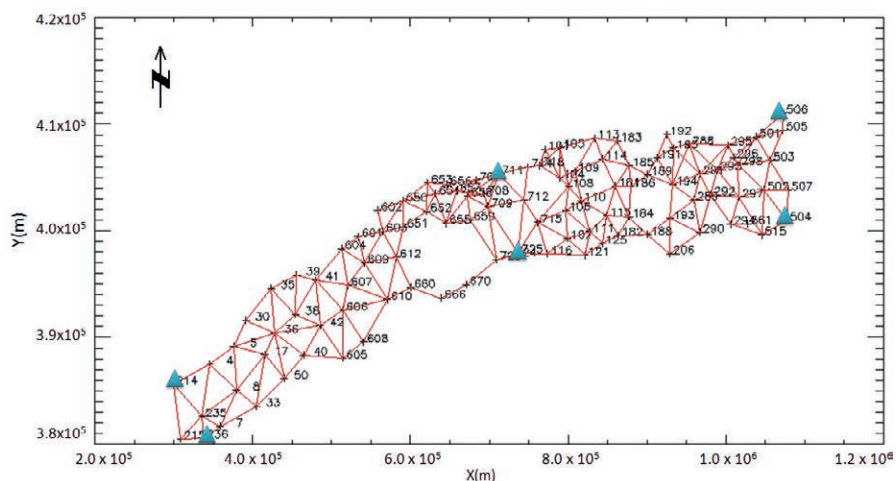


Figure 4. Triangulation du réseau test composé de 103 points de 1^{er} ordre. Les points d'appui sont désignés par des triangles.

Nombre des paramètres	Nombre des observations	Nombre de degrés de liberté	Nombre des points fixes	Écart-type a priori	Seuils de probabilité
293	424 (+1 Azimut)	132	6 (236, 214, 504, 111, 506, 105)	8.0 dmgr	$\alpha= 5\%$ $\beta= 20\%$
Écart-type a posteriori σ_0		Test du Khi-2		Test de Student	
4.9 dmgr		Positif		Tolérance [-2, +2] dmgr : 11 observations suspectes	

Tableau 1. Résultats relatifs à l'ajustement du réseau.

Paramètres Caractéristiques	Précision planimétrique σ_{2D} (m)	Ellipse d'erreur	
		Demi-grand axe a (m)	Demi-petit axe b (m)
Minimum	0.102	0.085	0.001
Moyenne	0.203	0.164	0.117
Maximum	0.334	0.302	0.216

Tableau 2. Statistiques de la qualité du réseau ajusté : précision et ellipse d'erreur absolue.

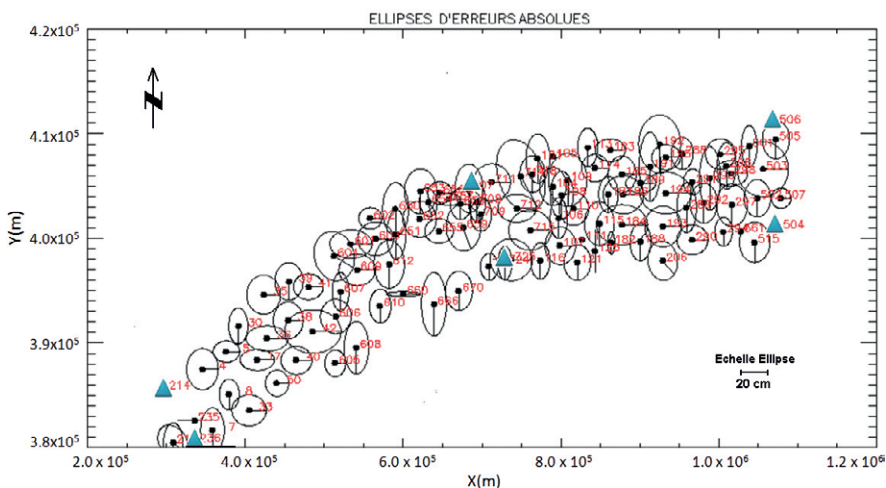


Figure 5. Les ellipses d'erreurs des points ajustés du réseau.

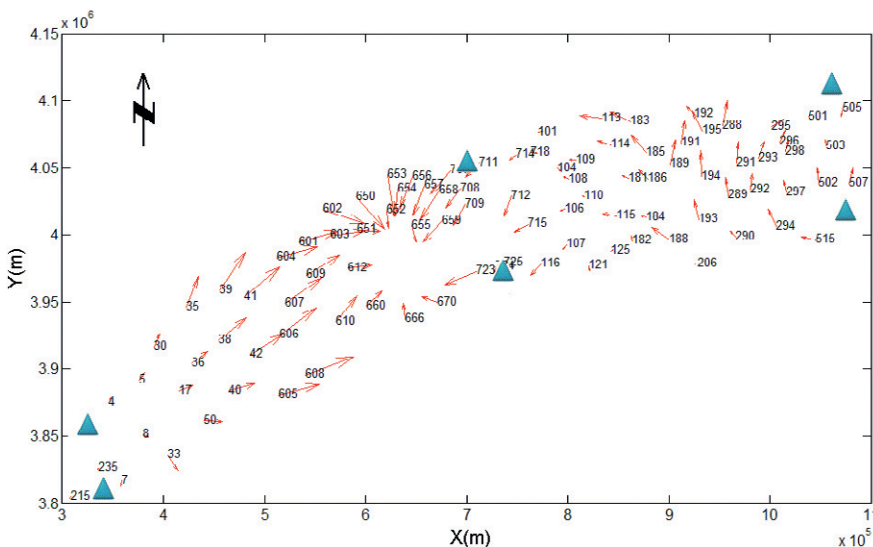


Figure 6. Différences de coordonnées UTM calculées et initiales en vecteurs de déplacements.

qu'il existe des trous dans cette triangulation, notamment, au milieu. Ceci est dû, principalement, à la non-disponibilité des données, soit des coordonnées des points, soit des tours d'horizons.

Ajustement du réseau échantillon

Le tableau 1 illustre les données et les résultats relatifs à l'ajustement par le programme CHABAKA du réseau test. Les résidus des observations varient de -9.8 à 7.8 dmgr, avec un écart-type de 1.1 dmgr. L'ensemble de ces résidus suit la loi normale comme il est indiqué par le test de KHI-2. Suivant le test de Student, il existe 11 mesures suspectes qui sortent de l'intervalle de confiance [- 2, +2] dmgr. Ces mesures sont écartées lors du traitement de la compensation.

Les paramètres estimés des coordonnées des points du réseau sont fournis par l'ajustement en termes d'appoints en coordonnées de projection et en orientation V_0 . La qualité de ces résultats est estimée à partir de la matrice variance covariance des inconnues. Les précisions sur les paramètres ajustés ainsi que les ellipses d'erreurs sont calculées. Le tableau 2 présente les statistiques de ces résultats. D'après ce tableau la précision estimée sur les coordonnées est de l'ordre de 20.3 cm en planimétrie. Compte tenu de la qualité exigée en géodésie classique (1^{er} ordre) et l'envergure du réseau, ces précisions sont acceptables.

La figure 5 illustre les domaines d'erreurs de l'estimation des paramètres inconnus. Ces domaines sont représentés par des ellipses d'erreurs absolues pour les points du réseau. La dimension moyenne de ces ellipses est de l'ordre de 16 cm, ce qui est satisfaisant en géodésie classique.

Enfin, l'analyse de l'ajustement a montré que l'estimation du réseau test est d'une précision acceptable et que les ellipses d'erreurs restent globalement dans la tolérance exigée. Par conséquent, le réseau ajusté est jugé de bonne qualité et sera projeté suivant la projection UTM par fuseau.

Projection du réseau test en UTM

Après l'obtention du réseau ajusté, exprimé dans un fuseau étendu suivant

GEODESEA : une expérience de positionnement géodésique en fond de mer

■ Pierre SAKIC - Jean-Yves ROYER - Valérie BALLU - Helen PIÉTÉ - Étienne POIRIER - Mickael BEAUVERGER

Étendre les réseaux géodésiques en mer devient une nécessité afin de surveiller des structures tectoniques sous-marines actives comme les zones de subduction, susceptibles de générer des séismes dévastateurs (Sumatra en 2004, Tohoku en 2011 par ex.). À cette fin, l'approche GNSS/Acoustique permet, comme le GNSS à terre, de déterminer avec une précision centimétrique la position de points matérialisés par des balises acoustiques déployées de manière pérenne sur le plancher océanique. Les résultats de la première expérience GNSS/A française réalisée en juin 2015 en mer Méditerranée (mission GEODESEA) sont présentés. Cette expérience s'est avérée très probante tant dans le protocole d'acquisition et les types d'équipement mis en œuvre, que dans la méthode de traitement mise au point.

MOTS-CLÉS

Géodésie fond de mer, GNSS/Acoustique, positionnement précis sous-marin

information aidant entre autres à l'évaluation du risque sismique.

Ce positionnement est réalisé à l'aide d'une "tête acoustique" intermédiaire qui communique avec les balises dans le milieu marin et qui est positionnée simultanément en surface par les satellites GNSS. Le protocole de positionnement GNSS/A peut ainsi se scinder en deux segments (Figure 1) :

- **Un segment surface** : il s'agit de positionner la tête acoustique (ou transducteur) embarquée sur un navire ou un drone marin de surface dans un référentiel absolu, au moyen de récepteurs GNSS embarqués à bord de la plate-forme et d'un traitement cinématique. Des observations complémentaires d'attitude (roulis, tangage) sont également acquises au moyen d'une centrale d'attitude couplée à la tête acoustique, et ce afin de corriger les bras de levier entre les différents instruments. Toutes les mesures sont ainsi ramenées au centre d'émission/réception de la tête acoustique.

- **Un segment sous-marin** : il s'agit de déterminer la position relative des balises (ou transpondeurs) déployées de manière pérenne sur le plancher océanique par rapport à la tête acoustique. Cette position est déduite de mesures de temps de propagation aller-retour de signaux acoustiques émis par la tête acoustique et retransmis par les balises. Leur conversion en distances nécessite de connaître la vitesse du son dans la colonne d'eau.

La combinaison de ces observations permet de transférer la position GNSS absolue de la tête acoustique aux balises acoustiques sur le fond (ou à leur barycentre). Les acquisitions se déroulent en deux phases, comme détaillé dans la section suivante. La première consiste

Introduction

Les systèmes spatiaux de navigation (GNSS) sont devenus depuis une vingtaine d'années un outil indispensable pour l'observation et l'étude des processus géodynamiques à grande échelle. Cependant, en environnement sous-marin, cette approche est inopérante, car les ondes électromagnétiques ne se propagent pas dans l'eau. Pourtant, plus de 70 % de la surface terrestre sont recouverts par les océans, qui sont le siège de nombreux phénomènes tectoniques parmi les plus dévastateurs. C'est notamment le cas des zones de subduction à l'origine des plus grands séismes et tsunamis (ex. Sumatra en 2004, Tohoku en 2011). La limitation des observations GNSS aux seules terres émergées empêche le suivi de l'accumulation des contraintes et l'évaluation de l'aléa sismique associé à ces frontières de plaques sous-marines. Il en est de même pour les segments de failles actives sous-marines dont certaines, comme la faille Nord-Anatolienne en mer de Marmara, sont situées à proximité de zones côtières très habitées.

Pour pallier ces difficultés, une approche consiste à combiner la géodésie spatiale au positionnement acoustique dans

la colonne d'eau. L'approche GNSS/Acoustique ou GNSS/A (parfois appelée GPS/A) permet de positionner une balise ou un ensemble de balises posées sur le fond de mer par l'intermédiaire d'une plate-forme de surface (typiquement un navire), elle-même repérée dans un référentiel terrestre tel que l'ITRF par géodésie spatiale. En laissant les balises acoustiques sur le fond plusieurs années de suite, on pourra caractériser leur déplacement par des mesures régulières de leur position, comme on le fait pour des monuments géodésiques à terre.

Principes du positionnement GNSS/A

L'objectif d'une expérience GNSS/A est de positionner dans un référentiel global et absolu un réseau de balises posées sur le fond de l'océan. La finalité est d'obtenir la/les vitesse(s) de déplacement d'un ou plusieurs points en mer dues à des causes tectoniques (de l'ordre du centimètre/an). Ces vitesses peuvent alors être directement comparées aux mesures de stations GNSS "classiques" réalisées à terre. Ceci permet de déduire un gradient de déformation, et donc un taux de couplage,



à obtenir une position préliminaire de chaque balise qui sera utilisée comme *a priori* dans le traitement, et la seconde consiste à interroger le réseau simultanément en se positionnant à la verticale de son barycentre.

Comme pour toute propagation d'ondes dans un milieu naturel, la conversion de temps de parcours en distance implique de bien caractériser la vitesse de propagation et donc les propriétés physiques du milieu. La célérité du son dans l'eau est fonction de la température, de la salinité et de la pression (profondeur) et peut être affectée par des phénomènes transitoires comme les courants, les ondes internes ou simplement la météo. Positionner un objet ou engin sous-

marin en combinant acoustique sous-marine et positionnement aérien par GNSS est une application courante dans le domaine industriel et pétrolier. Cependant, pour obtenir une précision centimétrique nécessaire pour caractériser des mouvements de l'ordre de quelques mm/an ou cm/an, il est nécessaire de s'affranchir de l'incertitude sur la vitesse de propagation du signal acoustique. La stratégie proposée par Spiess et al. (1998) est de ne pas travailler sur les trois composantes, mais de ne déterminer précisément que la composante horizontale (planimétrique) d'un polygone de balises, en se situant à l'aplomb du barycentre du polygone et en utilisant le fait qu'en première

approximation, l'océan est stratifié horizontalement. Ainsi, si l'on est parfaitement au centre du dispositif, les rais acoustiques vers chacune des balises du polygone traversent les strates horizontales avec les mêmes angles d'incidence et passent donc le même temps dans chaque couche. Dans un modèle parfaitement stratifié et homogène latéralement, l'erreur commune sur chaque rai liée à la méconnaissance du profil de célérité est parfaitement compensée sur la composante planimétrique du barycentre des balises et ne se traduit que par une translation verticale du réseau.

La mission GEODESEA

La mission GEODESEA est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire Géosciences Océan (Brest), le laboratoire Littoral Environnement et Sociétés (La Rochelle), et la société Sonardyne Ltd (Royaume-Uni). Elle s'est déroulée du 17 au 22 juin 2015 à bord du N/O *Téthys II*, au large de Nice (Figure 2). L'objectif était de tester/valider un positionnement géodésique par GNSS/A par grande profondeur afin de valider un protocole expérimental, notamment tester le matériel proposé par la société Sonardyne, valider les méthodes de traitement et quantifier les différentes sources d'erreur dans un cas réel.

Le dispositif d'acquisition GNSS/A était composé (Figure 3) :

- de quatre balises Compact Sonardyne interrogées de manière répétée par une tête acoustique intégrée à une centrale d'attitude (GyroUSBL Sonardyne), immergée au bout d'une perche d'environ 7 m de long sur le flanc du navire ;
- de quatre antennes GNSS disposées à la proue du navire, au sommet de la perche, à bâbord et tribord, en acquisition continue. Le GNSS au sommet de la perche était intégré au système de positionnement Sonardyne en mode RTK ;
- d'un dispositif de mesure des paramètres environnementaux nécessaires pour caractériser la célérité du son dans l'eau (CTD ou salinité, température, pression) ; 5 profils CTD ont été acquis au cours de la campagne. Ces profils peuvent être réalisés plus direc-

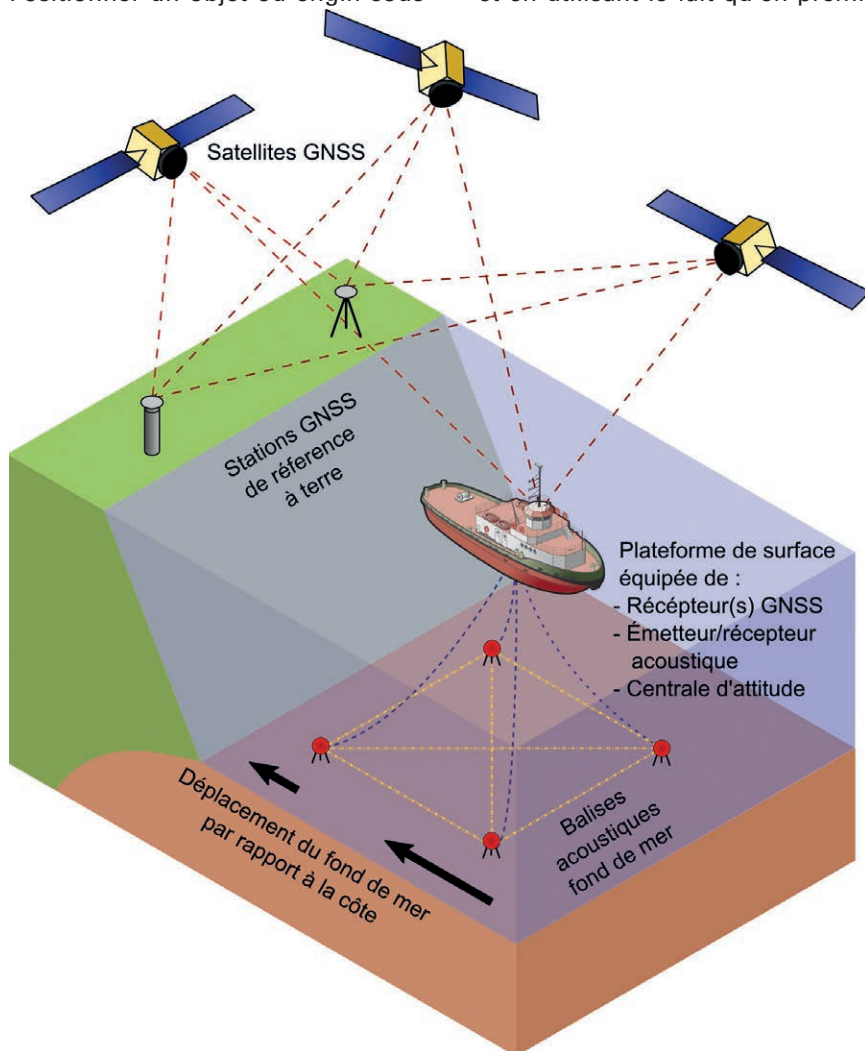


Figure 1. Principe d'un positionnement GNSS/Acoustique. Il s'agit de combiner le positionnement par acoustique de balises fond de mer fixes par rapport à une plate-forme de surface avec le positionnement GNSS absolu de cette dernière. La finalité est d'obtenir la position des balises dans un référentiel global, et plus encore celle du barycentre immatériel du polygone que dessinent les balises. Le point de référence en surface choisi est la tête acoustique communiquant avec les balises fond de mer. Le positionnement cinématique de la plate-forme est complété par des mesures d'attitude (tangage, roulis, cap).



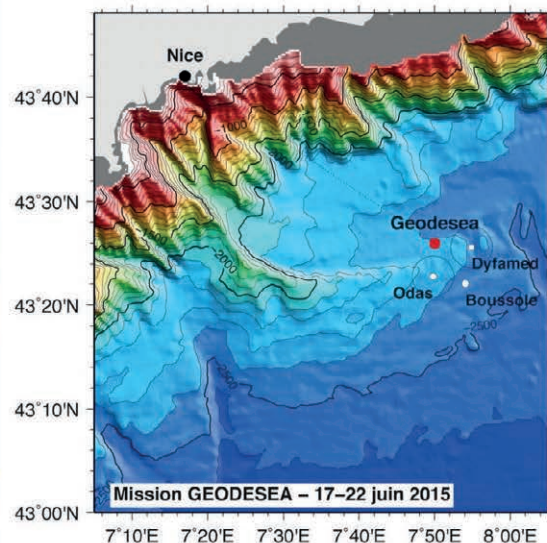


Figure 2. Navire océanographique du CNRS/INSU Téthys II et site de déploiement de la mission GEODESEA, à proximité de mouillages permanents DYFAMED, Boussolle (Obs. de Villefranche-sur-Mer) et ODAS (Météo France)



tement à l'aide d'une sonde SVP (pour Sound Velocity Profile), toutefois non disponible à bord lors de la campagne.

Trois balises acoustiques ont été installées par 2 400 m de profondeur au sommet d'un triangle équilatéral inscrit dans un cercle d'environ 1 500 m de diamètre (~2 600 m inter-balises), avec une quatrième balise au centre du dispositif. Les balises ont été déployées sur des trépieds lestés par des sacs de sable pour permettre une remontée à la surface par largage acoustique. Ce montage léger, choisi en raison de la nature temporaire de l'expérience, ne serait cependant pas adapté pour un déploiement long terme. Un premier positionnement de chacune des balises est obtenu par une méthode classique dite de "boxin" : le navire effectue un

cercle de 800 m de rayon autour de la balise à positionner tout en l'interrogeant. Les coordonnées ainsi estimées, fondées sur un positionnement GNSS en temps-réel RTK serviront comme information *a priori* dans l'inversion (section *traitements et résultats*). À cette étape, les écart-types des distances déterminées entre le navire et chacune des balises sont métriques. Ces opérations de calibration permettent également de déterminer différents biais instrumentaux (notamment bras de levier du montage du gyroUSBL). À l'issue de ces opérations de calibration, 37 h 20 d'acquisition conjointe de données acoustiques et GNSS ont été réalisées, répartie en 4 sessions de 3 h à 15 h.

L'acquisition a débuté en maintenant le navire au centre du dispositif. En raison du bruit de l'hélice, la communi-

cation acoustique s'est avérée de trop mauvaise qualité pour espérer des résultats probants. Une solution alternative a alors consisté à réaliser les interrogations en laissant le navire dériver à travers le réseau, moteur débrayé, tout en tentant de passer au plus près de la balise centrale, en tirant au mieux parti des courants et du vent, à la manière décrite par Fujita et al. (2006). En fin de profil, les moteurs étaient remis en route pour repositionner le navire en début de profil de dérive. Les profils de dérive, de direction O-E à NO-SE, étaient de l'ordre de 200 à 500 m de long, avec une vitesse variable au cours du temps (< 1 nœud).

Positionnement de surface et rattachements topométriques des instruments à bord

Le positionnement de surface s'est basé sur quatre récepteurs GNSS avec antennes de type Leica, Topcon et Ashtech réparties sur le navire et rattachées par topométrie en début et fin de mission. Cependant, pour des questions de simplicité, seul le GNSS en sommet de perche a été exploité dans le traitement des données ci-après. Le positionnement en temps réel est assuré en RTK à partir de la station permanente de la ville de Nice (NICA). En post-traitement, nous avons utilisé une approche PPP avec NRCAN (Kouba et Héroux 2001). Compte tenu du fait que



Figure 3. Équipements utilisés lors de la campagne GEODESEA, avant déploiement : balises acoustiques fond de mer insérées dans leur bouée et montées sur des trépieds lestés et tête acoustique associée à une centrale d'attitude (à droite).



les coordonnées RTK sont exprimées dans le système national RGF93, et les coordonnées PPP dans l'ITRF à l'époque des mesures (ITRF2008@2015.46), la solution RTK a été ramenée dans l'ITRF à partir des paramètres de transformation de Boucher et Altamimi (2011). Malgré cette correction, d'importantes différences résiduelles de l'ordre de la dizaine de centimètres ont été observées entre positions PPP et RTK ramenées dans l'ITRF, en raison de la distance à l'unique station de base (~40 km).

Pour définir les vecteurs de rattachement entre les instruments embarqués, il est nécessaire au préalable de définir un repère orthonormé solidaire du navire. Cette opération s'effectue à l'aide de techniques de topométrie classique. Réaliser de la topométrie à bord d'un navire est plus complexe qu'un levé standard à terre. Premièrement, si l'on souhaite pouvoir exploiter les instruments déployés à demeure sur le bateau (centrale d'attitude, GPS de navigation), il faut se rattacher sur un référentiel interne et donc réaliser les mesures à partir des points matérialisant ce repère. L'alternative, si ce n'est

pas possible, est de définir un nouveau référentiel. Ceci exige alors de déployer de manière temporaire un ensemble de points d'appui permettant de matérialiser ou de densifier le référentiel interne.

Deuxièmement, il faut composer avec le fait que le navire est non seulement mobile, mais également soumis au roulis et tangage, ainsi que, dans une moindre mesure, à une déformation structurale interne. Ce constat simple a des implications notables pour les observations topométriques : le tachéomètre est particulièrement sensible aux mouvements, ce qui a pour effet de bruiser les mesures. D'autre part, l'axe vertical du tachéomètre est à terre perpendiculaire à une équipotentielle du champ de pesanteur. À bord, on souhaite que ce même axe vertical du tachéomètre soit cette fois-ci parallèle à l'axe des Z du navire, qui n'est pas forcément parallèle à la verticale locale. Dans la mesure où il n'existe pas de moyen simple d'accéder à cet axe Z, une approximation doit être faite sur la verticalité du tachéomètre, en réalisant un bullage grossier lorsque le navire est à quai et relativement stable.

Une stratégie spécifique a donc été mise au point : à chaque session de mesure, on réalise au tachéomètre sur chaque point de station un double tour d'horizon par double retournement. Cependant, on enregistre non pas une, mais dix mesures, avec réajustement de la visée après cinq, ceci pour compenser la gîte qui perturbe la stabilité de l'instrument. Ces 5+5 mesures seront ensuite moyennées lors du traitement. Deux sessions de mesures ont été réalisées au début et à la fin de la mission, avant l'appareillage et au retour au port, lorsque le navire est stable. Ceci permet également d'interchanger facilement les antennes avec des prismes de visée, le positionnement GNSS n'étant alors pas nécessaire.

Compte tenu de la relative petite taille du navire (24.90 m), une seule station de visée, choisie judicieusement, a été nécessaire pour viser tous les points. Le N/O *Téthys II* ne disposant pas de référentiel interne préalablement observé, nous avons défini un référentiel *ad hoc* pour repérer tous les emplacements des antennes GNSS. Les points matérialisés et mesurés sont représentés sur la *figure 4*.

Les points Mx désignent des marqueurs autocollants, les Px des supports à prisme ou antenne GNSS, et le point T1 représente la station du tachéomètre. Le marqueur M1 constitue l'origine, la ligne de foi (axe X) est définie comme étant la droite passant par M1 et P2, et l'axe Y est matérialisé par les points P1 et P3. En phase opérationnelle d'observation acoustique, les points P1, P2, P3 et P5 ont été équipés d'une antenne GNSS (P4 n'a pas été utilisé). L'antenne en P5 est une antenne "maître" dans le prolongement de la tête acoustique, afin de positionner cette dernière avec un bras de levier moindre. Les antennes en P1, P2, P3 ont pour vocation de se substituer à la centrale d'attitude pour des tests supplémentaires, mais également de remplacer l'antenne "maître" P5 en cas de défaillance.

Une répétabilité millimétrique est obtenue pour la plupart des points entre les deux sessions de mesure. Cependant, certains points présentent des différences de plusieurs millimètres entre les deux sessions. Ceci peut s'expli-

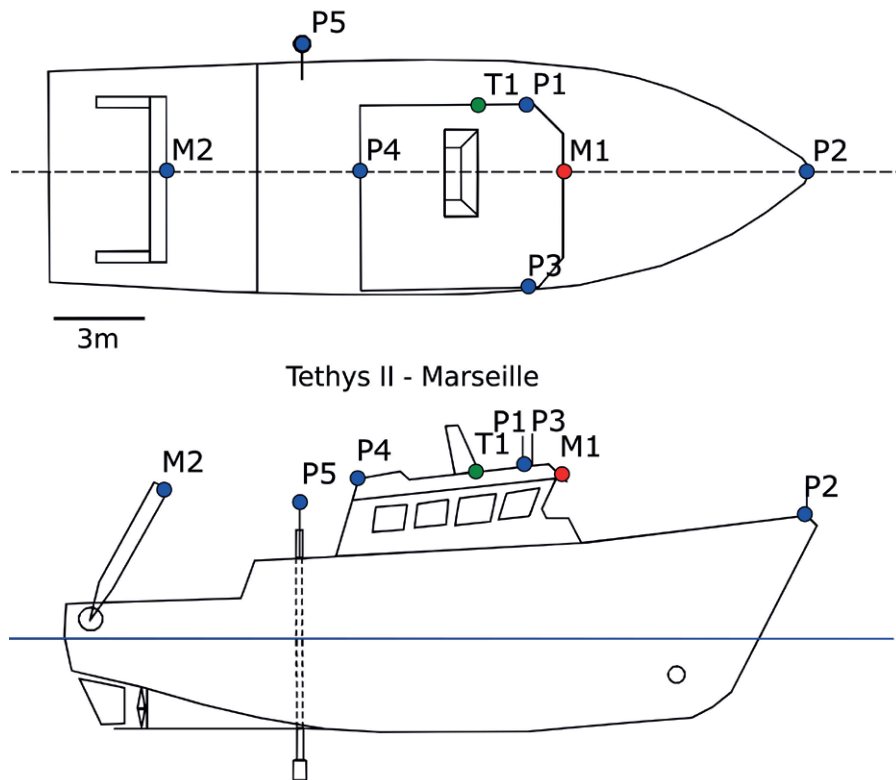


Figure 4. Emplacement des points de topométrie sur le N/O *Téthys II*. Le point commun de visée est situé en T1, les points P marquent la position des prismes de visée lors des sessions de topométrie, et des antennes GNSS lors de la phase d'acquisition (à l'exception de P4), les points M sont des repères autocollants.



quer par une déformation interne du navire, ainsi que la présence de points sur des batayoles mobiles qui ont dû être déplacés en cours de mission. Cette expérience de topométrie à bord, bien que partiellement concluante, milite en faveur d'une miniaturisation de la plateforme d'acquisition (voir *perspectives*).

Traitement et résultats

La procédure de traitement des données GNSS/A, résumée sur le schéma de la figure 5, comprend le positionnement de la tête acoustique dans un repère global externe et une inversion des temps de parcours acoustiques. Les données acquises en continu sont :

- Les positions de l'antenne GNSS principale, dans un référentiel terrestre, typiquement WGS84 ou ITRF (ITRF2008@2015.46 dans notre cas) aux instants d'échantillonnage t_{GNSS} .
- Les angles de roulis, de tangage et de cap, aux instants d'échantillonnage t_{INS} .
- Les temps d'aller-retour (*two-way travel times*) τ entre la tête acoustique et chacune des balises fond de mer, réceptionnés à l'instant $t_{ASM, rec, i}$. L'instant d'émission $t_{ASM, emi, i}$ du ping correspondant est déterminé par la relation $t_{ASM, rec, i} = t_{ASM, emi, i} + \tau + T_{TAT}$, le TAT étant le *Turn Around Time*, un délai de réponse de la balise précisément calibré.
- Les vecteurs de rattachement des différents instruments dans le référentiel interne du navire (voir *section précédente*). On considère le point de référence de la centrale d'attitude comme l'origine de ce repère. Les coordonnées du centre de phase de l'antenne GNSS et du centre de phase de la tête acoustique sont donc exprimées en fonction de la centrale d'attitude.

L'objectif est tout d'abord d'obtenir la position de la tête acoustique aux instants $t_{ASM, rec, i}$ et $t_{ASM, emi, i}$. On considère de manière générale le problème dans un référentiel topocentrique dont l'origine est définie arbitrairement comme le centre de gravité de la trajectoire du navire. Les coordonnées ITRF GNSS sont alors transférées dans ce repère. Les positions GNSS aux instants

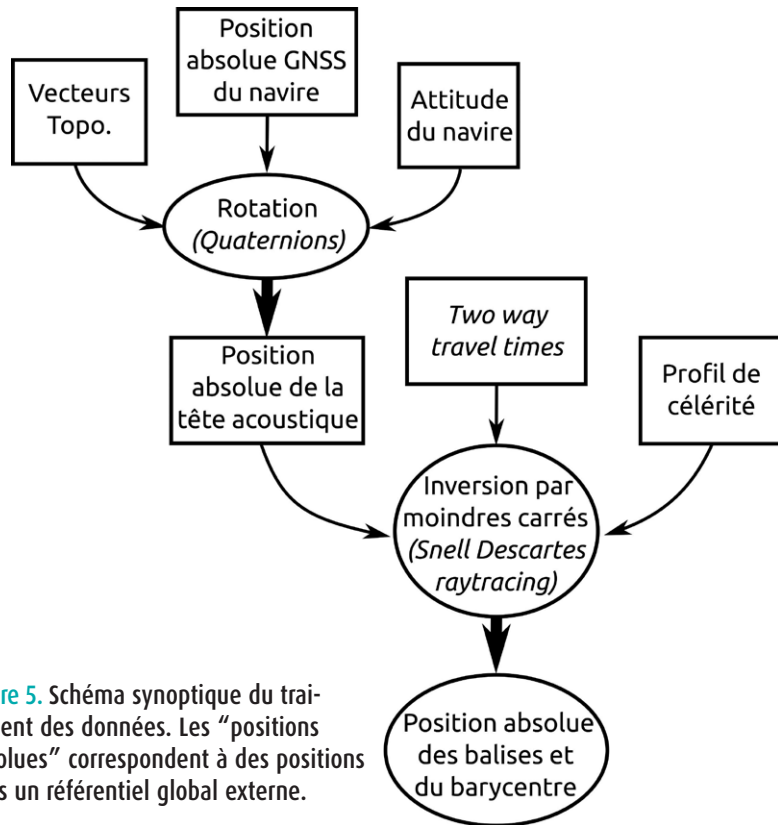


Figure 5. Schéma synoptique du traitement des données. Les "positions absolues" correspondent à des positions dans un référentiel global externe.

$t_{ASM, rec, i}$ et $t_{ASM, emi, i}$ sont obtenues par interpolation linéaire, le pas d'échantillonnage étant important (1 Hz) et les mouvements relativement faibles. Ces positions sont ensuite transférées à la tête acoustique au moyen des vecteurs de rattachement et des angles d'attitude, préalablement convertis en quaternions et interpolés au moyen de l'approche *Slerp* (e.g. Dam et al. 1998).

Une fois la position de la tête acoustique déterminée, le calcul des positions des balises est réalisé au moyen d'une inversion par moindres carrés. La fonction d'observation utilisée est une fonction dite de tracé de rai ou *raytracing* (Sakic et al. 2018) qui associe à la position instantanée de la tête acoustique en surface dans un repère topocentrique X_S , un profil vertical de célérité C et la position des balises X_{Ri} , un temps de propagation aller-retour τ tel que :

$$f_{ASM}(X_S, X_{Ri}, C) \rightarrow \tau$$

Durant le laps de temps entre l'émission et la réception du ping acoustique, la plate-forme en surface bouge. En première approximation, ce déplacement de l'ordre du mètre peut être négligé devant la taille du chantier de l'ordre de plusieurs kilomètres, cepen-

dant cette hypothèse peut entraîner une erreur conséquente sur la restitution des positions des transpondeurs. Pour pallier ce problème, il faut affiner la fonction d'observation f_{ASM} . En supposant connues les positions de la plate-forme $X_{S, emi}$ et $X_{S, rec}$ à l'émission et à la réception du ping, la nouvelle fonction d'observation $f_{ASM, F/B}$ est alors :

$$\tau_{F/B} = \tau_{emi} + \tau_{rec} = f_{ASM}(X_{S, emi}, X_{Ri}, C) + f_{ASM}(X_{S, rec}, X_{Ri}, C) = f_{ASM, F/B}(X_{S, emi}, X_{S, rec}, X_{Ri}, C)$$

Dans la mesure où nous cherchons principalement la position du barycentre du réseau de balises (voir *section principe*), nous estimons également la position de ce point. Cependant, comme il s'agit d'un point virtuel, il est estimé en ajoutant une contrainte de nullité des différences entre les coordonnées individuelles des balises et celles du barycentre. Le détail de la méthode est décrit dans Sakic et al. (en révision). Les écarts-types à l'issue de l'inversion sont de l'ordre du centimètre ; un test de *bootstrapping* (méthode d'inférence statistique par rééchantillonnage des données) par 250 tirages aléatoires sur 50 % des observations puis restitution de la position du barycentre donne



un écart-type de l'ordre de 2 cm sur chacune des composantes horizontales (Tableau 1).

Si ces résultats sont satisfaisants et montrent *a priori* que la méthode d'inversion fonctionne, ils sont toutefois vraisemblablement optimistes au regard des résidus et de leur variation temporelle. Les résidus observés (Figure 6) présentent des variations à courtes périodes (~15 min) liées aux mouvements du navire qui n'est pas toujours exactement à l'aplomb du centre du dispositif. Cela montre l'influence des hétérogénéités latérales de la tranche d'eau : les rais vers chacune des balises ne sont pas affectés exactement de la même façon par la tranche perturbée de surface, car l'angle d'émission vers chaque balise n'est

pas exactement le même. On observe également des variations à plus longue période (plusieurs heures). Le fait que les résidus puissent atteindre plusieurs décimètres sur les distances obliques vers chacune des balises n'est pas un problème en soi si ces résidus sont du même ordre pour chaque balise et sont donc compensés lors du calcul du barycentre. De tels résidus ont déjà été observés lors d'expériences similaires (Osada et al. 2003 ; Spiess et al. 1998). Même si leurs causes et leur amplitude ne sont pas totalement expliquées, ils sont attribués à l'effet des marées ou d'ondes internes sur la célérité du son et sont éliminés en moyennant sur un temps d'acquisition suffisamment long.

Point	Balise 5203	Balise 5305	Balise 5307	Barycentre	Barycentre, bootstrapping
σ_N (m)	0.012	0.012	0.027	0.009	0.019
σ_E (m)	0.011	0.010	0.010	0.010	0.022
σ_D (m)	0.007	0.007	0.007	0.007	0.009

Tableau 1. Écart-types sur les positions obtenues à l'issue de l'inversion et du test de bootstrapping sur les composantes horizontales (nord et est) et la distance oblique (D).

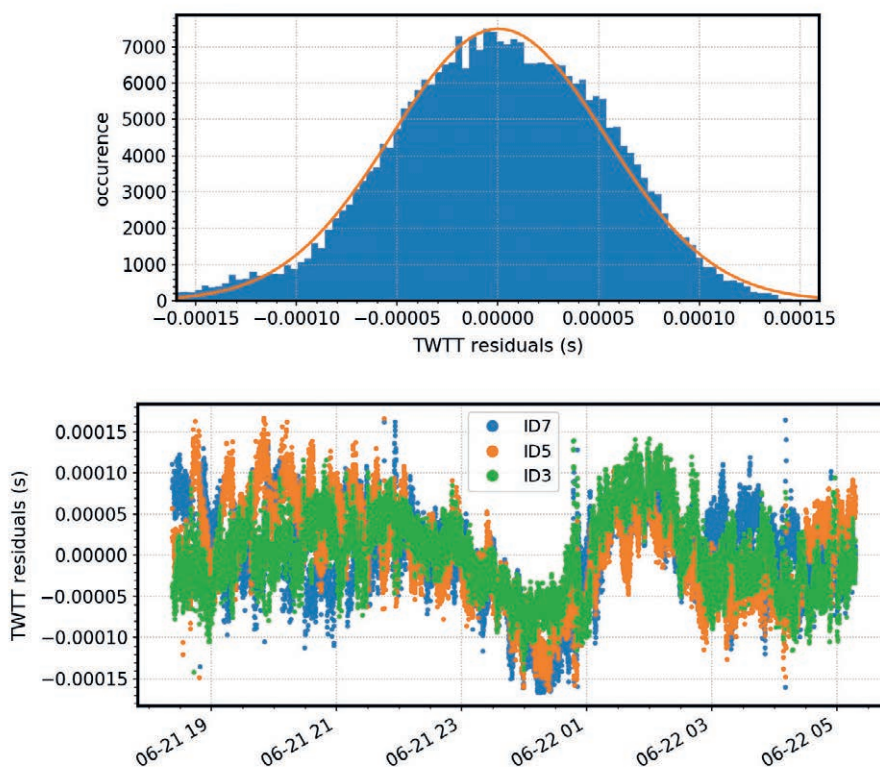


Figure 6. Résidus des temps de parcours acoustiques (*Two Way Travel times*) par rapport au modèle : histogramme et représentation temporelle pour chacune des balises (ID 3, 5 et 7). Une erreur sur le temps de parcours (aller-retour) de 0.05 ms équivaut à une erreur sur la distance oblique de l'ordre de 4 cm.

Perspectives

Cette première expérience de positionnement géodésique fond de mer française a permis de tirer plusieurs enseignements. En premier lieu, cette campagne a testé et validé pour une application scientifique exigeante, par grands fonds (2 400 m), des équipements initialement conçus pour des besoins industriels. Elle a permis d'acquérir des observations réelles pour tester notre méthode de restitution des positions par moindres carrés, jusqu'alors testée uniquement à partir de simulations. Parmi les améliorations à apporter, il faut une meilleure prise en compte des variations temporelles de la célérité dans la colonne d'eau, en intégrant par exemple un paramètre estimé supplémentaire représentant cette variation. Enfin la complexité de rattachements topométriques multipoints sur un navire incite à réduire les distances entre les différents capteurs afin de minimiser les erreurs systématiques sur les bras de levier.

En termes de mise en œuvre, une amélioration significative serait donc la miniaturisation de la plate-forme de surface avec l'utilisation d'un drone téléopéré (ASV, *Autonomous Surface Vehicle*) plutôt qu'un navire, telle la plate-forme PAMELI récemment acquise par l'Université de La Rochelle (Coulombier et al. 2018). L'utilisation d'un drone présente de nombreux avantages : limiter les bras de levier entre tête acoustique/centrale d'attitude et antenne(s) GNSS, maintenir une position centrale en limitant le bruit acoustique (propulsion électrique), et optimiser la phase d'acquisition (le navire porteur pouvant procéder à d'autres opérations, comme la mesure de profils de célérité). Pour des opérations répétées dans le temps, afin de caractériser le déplacement des fonds marins, l'avantage est aussi de s'affranchir du navire-support (rattachements topométriques, perche pour immerger la tête acoustique) et donc de pouvoir répéter les mesures dans des conditions d'acquisition identiques. ●

Remerciements

Nous tenons à remercier le Capitaine et l'équipage du N/O *Téthys II* pour leur





concours au succès de l'expérience GEODESEA. Nous tenons également à remercier la société Sonardyne Ltd pour la mise à disposition de leur matériel et la participation de leurs ingénieurs Chris Hammersley et Mat Pow à leur mise en œuvre. Nous remercions l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) pour la mise à disposition et l'installation de la CTD SBE 911, le laboratoire GéoAzur pour la fourniture d'une grille bathymétrique détaillée de la zone de travail, et le Service géomatique de la ville de Nice et la Société Exagone/Teria pour la mise à disposition des corrections de positionnement GNSS. Ce projet a été financé par le CNRS (INSU), l'Infrastructure de Recherche EMSO-France (INSU-CNRS), le laboratoire d'excellence Labex Mer (Brest), et les laboratoires participants (LGO, LIENSs).

Contacts

Pierre Sakic^{1,2,*} pierre.sakic@gfz-potsdam.de

Jean-Yves Royer²

Valérie Ballu¹

Helen Piété²

Étienne Poirier¹

Mickael Beauverger²

1 Laboratoire Géosciences Océan, Université de Brest et CNRS, Plouzané, France,

2 Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés, Université de La Rochelle et CNRS, La Rochelle, France

* Désormais au GFZ, Centre allemand de Recherche en Géosciences, Section 1.1 – Géodésie Spatiale, Helmholtz-Zentrum Potsdam, Potsdam, Allemagne

Bibliographie

Boucher, C., & Altamimi, Z. (2011). *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. Observatoire de Paris. <http://etrs89.ensg.ign.fr/>

Coulombier, T., Ballu, V., Pineau, P., Lachaussée, N., Poirier, E., Guillot, A., et al. (2018). *PAMELi, un drone marin de surface pour étudier le littoral de façon interdisciplinaire*. In Paralia (Ed.), XV^e Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. La Rochelle.

Dam, E. B., Koch, M., & Lillholm, M. (1998). *Quaternions, interpolation and animation*. Technical Report DIKU-TR-98/5, 103. : Technical Report DIKU-TR-98/5

Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato,

M., Toyama, S., Katayama, M., et al. (2006). *GPS/Acoustic seafloor geodetic observation : method of data analysis and its application*. Earth, Planets and Space, 58(3), 265-275. doi:10.1186/BF03351923

Kouba, J., & Héroux, P. (2001). *Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products*. GPS Solutions, 5(2), 12-28. doi:10.1007/PL00012883

Osada, Y., Fujimoto, H., Miura, S., Sweeney, A. D., Kanazawa, T., Nakao, S., et al. (2003). *Estimation and correction for the effect of sound velocity variation on GPS/Acoustic seafloor positioning : An experiment off Hawaii Island*. Earth, Planets and Space, 55(12), 17-20.

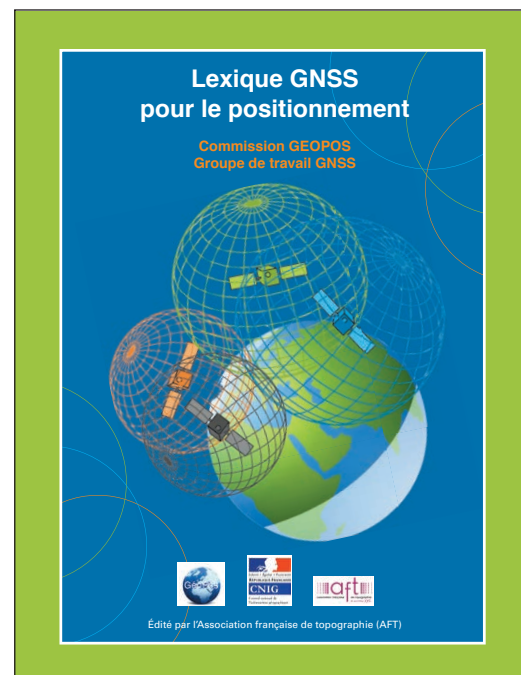
Sakic, P., Ballu, V., Crawford, W. C., & Wöppelmann, G. (2018). *Acoustic ray tracing comparisons in the context of geodetic precise off-shore positioning Experiments*. Marine Geodesy, 41(4), 315-330. doi:10.1080/01490419.2018.1438322

Sakic, P., Ballu, V., & Royer, J.-Y. (2019). *GNSS-Acoustic seafloor positioning simulations using a multi-observation least-squares inversion*. In revision for Journal of Geodesy.

Spiess, F. N., Chadwell, C. D., Hildebrand, J. A., Young, L. E., Purcell, G. H., & Dragert, H. (1998). *Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 108(2), 101-112. doi:10.1016/S0031-9201(98)00089-2

ABSTRACT

Extending geodetic networks at sea is becoming a necessity in order to monitor active underwater tectonic structures such as subduction zones, which can generate devastating earthquakes (Sumatra in 2004, Tohoku in 2011, for example). To this end, the GNSS/Acoustic approach makes it possible, like GNSS on land, to determine with centimetric accuracy the position of points materialized by acoustic beacons permanently deployed on the sea floor. The results of the first French GNSS/A experiment carried out in June 2015 in the Mediterranean Sea (GEODESEA Experiment) are presented. This experience proved to be very successful both in the acquisition protocol and the types of equipment used, as well as in the processing method developed.



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

M/Mme Nom : _____

Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal :

Ville : _____

Tél. :

Fax :

Courriel : _____

Date : _____

Signature _____

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

Achat également sur Internet : www.aftopo.org



NDLR : Avec sa rubrique "Art et géométrie" dont la première remonte au n° 85, Jean-Pierre Maillard apporte une touche culturelle au sommaire scientifique et technique d'XYZ. Les œuvres et les artistes présentés font suite aux coups de cœur de l'auteur liés à ses découvertes dans le domaine de l'art concret et de l'art cinétique. La motivation des 74 articles "Art et géométrie" déjà parus étant aléatoire, la revue accueille avec reconnaissance la contribution académique de Laurent Reynès qui présente et ordonne historiquement l'expression artistique fondée sur la géométrie, jusque dans sa composante Land Art et sa dimension topographique.

Ce faisant Laurent Reynès fait référence à de très nombreux artistes dont une œuvre a déjà été un sujet d'"Art et géométrie" Le lecteur pourra utilement, au fil de la lecture, se reporter successivement aux XYZ n° 126 pour Piet Mondrian, n° 122 pour Josef Albers, n° 121 pour Theo Van Doesburg, n° 102 pour Auguste Herbin, n° 94 pour Victor Vasarely, n° 106 pour Felice Varini et n° 135 pour Jesús Rafael Soto.

Op Art, Land Art, et topographie

■ Laurent REYNÈS

Introduction

L'art, la topographie – par l'intermédiaire de la géométrie – et le paysage ont toujours fait bon ménage. Tout au long de l'Histoire de l'art, les artistes se sont servis de la géométrie et, consciemment ou inconsciemment, de la topographie. Pour certains, ils ont mis au point certaines manières mathématiques afin de mieux servir leur art, notamment à la Renaissance¹, au XVII^e siècle², et au XX^e siècle avec l'*Op art*. Ils les ont également appliquées au paysage, dans le jardin à la française³ à partir du XVII^e siècle, puis dans la deuxième moitié du XX^e siècle, avec le *Land Art*.

Depuis les années 1960, un mouvement artistique a développé à nouveau une logique géométrique uniquement dans un but visuel et optique : l'*Op art*. Le propos était de mettre au point une sorte de jeu géométrique, afin de dévoyer et perturber la vision du spectateur.

Depuis les années 1970, un autre mouvement artistique est apparu, prônant l'œuvre d'art à l'échelle du paysage : le *Land Art*. Les artistes de ce mouvement ont voulu prendre en charge de nombreuses notions relatives au paysage et à l'environnement, en combinant consciemment la topographie, la géométrie et l'environnement.

Peu à peu, ils ont mêlé l'*Op art* et le *Land Art*, réalisant des œuvres dans

lesquelles l'effet d'optique se lit à l'échelle du paysage. De fait, la topographie croise la géométrie et le paysage. Il semble donc qu'elle peut croiser le *Land Art* et l'*Op art*.

Conceptuellement et pratiquement, comment ces deux mouvements artistiques recoupent-ils la topographie ? Qu'ont-ils de commun avec elle ?

La topographie puise ses règles également dans la géométrie. C'est par la géométrie que des relevés de terrain ou de bâtiments sont rendus possibles. La ligne, le tracé, les codes régulateurs, les codes de couleur, la volumétrie, les dimensions et l'échelle sont autant de notions topographiques que l'on peut dénombrer et ensuite croiser avec l'*Op art* et le *Land Art*.

Nous allons essayer de comprendre comment la topographie peut se rapprocher de l'*Op art*. Puis nous essaierons de réfléchir aux rapprochements possibles entre la topographie et le *Land Art* et de quelle façon les trois disciplines se complètent.

L'Op art

L'*Op art*, ou Art optique, voit officiellement le jour aux États-Unis en 1965 à New York, avec l'exposition au MOMA : "The responsive eye"⁴. En premier lieu, il sollicite la vision. Il fait partie des arts cinématiques.

Il implique une vision méthodique, systémique, mathématique de la part du concepteur aussi bien que du spec-

tateur. Il exige une grande rigueur tant dans le concept que dans la réalisation. Pour parvenir à son but, il fait appel à la vision dans l'espace, au relief, au tracé, à la géométrie, à la couleur. La précision est récurrente dans tous les travaux issus de ce mouvement artistique de la deuxième moitié du XX^e siècle.

Certes l'optique dans l'art n'est pas née avec l'*Op art*. Ces notions sont présentes à tous les âges de la peinture, à compter du fait qu'une œuvre picturale est déjà une illusion de la réalité retraduite en deux dimensions. On la retrouve déjà dans les fresques antiques, au Moyen Âge. Mais elle verra un grand tournant à la Renaissance avec l'apparition de la perspective, discipline qui obéit à des tracés géométriques et mathématiques, modifiant totalement la perception du monde. L'illusion, un des fondamentaux de l'art dit "figuratif", va utiliser ce type de représentation jusqu'à l'approche cubiste qui en modifiera la vision, au début du XX^e siècle.

Il semble que la topographie peut avoir quelques points communs avec cette forme d'art, car ils convoquent tous deux des disciplines semblables. En effet, pour simuler des reliefs sur une surface en deux dimensions, il existe plusieurs façons. Mais certaines de ces disciplines semblent incontournables comme la géométrie, les tracés, la couleur, la volumétrie, les dimensions, les échelles (qui impliquent directement la mesure). La topographie fait appel à des tracés qui doivent être précis et irréprochables demandant ainsi une connaissance de la géométrie assez approfondie, les notions d'échelle et de

1 Voir tous les peintres de la Renaissance italienne, comme Della FRANCESCA, MASSACIO, MANTEGNA...

2 Voir le peintre LEBRUN et ses schémas de composition.

3 Voir MARIAGE Thierry, *L'univers de Le Nostre*, Mardaga, Bruxelles, 1990.

4 FERRER Mathilde, *Groupes mouvements tendances de l'art contemporain depuis 1945*, ENSB-A, Paris, 2001, p 188.





dimension sont récurrentes. Quant à la couleur, elle est utilisée comme code, ce qui lui confère une valeur qui n'est pas des moindres.

L'*Op art* simule des volumes, la topographie les représente.

De ce fait, il semble assez facile de développer des connivences entre cet art et cette science.

Le Land Art

Il apparaît dans les années 1970, aux États-Unis d'Amérique et en Angleterre⁵. Les artistes veulent fuir le contexte urbain des galeries et des musées et veulent confronter leur art directement au paysage. Ils s'en vont donc travailler dans le désert de l'Utah comme Walter de Maria, Robert Smithson, Michael Heizer, Nancy Holt... Ils seront vite rejoints par les artistes anglais comme Richard Long, David Nash, Andy Goldsworthy... qui utilisent, eux – et contrairement aux artistes états-unis – les matériaux issus du lieu dans lequel ils se trouvent. Ces artistes choisissent les paysages les plus désertiques et les plus sauvages afin d'avoir le moins possible de repères humains. Ils réalisent des travaux à l'échelle et aux dimensions du paysage avec les matériaux qu'ils y trouvent, essentiellement la pierre, la terre, le bois, l'eau... Les conditions atmosphériques et les saisons entrent aussi en ligne de compte. Ces travaux ont plusieurs fondamentaux : la géométrie, l'occupation du champ visuel, l'utilisation des matériaux en place, la temporalité. Le *Land Art* perdure aujourd'hui avec de nombreuses manifestations partout dans le monde. Il fait souvent appel à la composition géométrique dans le paysage par des travaux en anamorphose.

De 1999 à 2016, dans le cadre d'un atelier de *Land Art*⁶, les étudiants de 3^e année de l'ENSAS⁷ ont mis en œuvre des projets dans lesquels la géométrie et l'anamorphose ont souvent été de mise.

⁵ Idem, p 155.

⁶ Voir REYNES Laurent, *Land Art*, ENSAS, Strasbourg, 2014.

⁷ École Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg.



Atelier Land Art, ENSAS, 2008 et 2009.

Pour ces travaux, les artistes utilisent directement la topographie, souvent de manière réflexe et intuitive : les terrains sur lesquels les œuvres sont réalisées tiennent compte de son relief et de ses particularités. Mais également, les artistes utilisent des cartes topographiques afin de mieux percevoir les mouvements de terrain, les altitudes, de prendre en compte des situations qui peuvent être parfois inaccessibles, et donc appréhendables par le document cartographique.

Géométrie

Elle est omniprésente. Tous les travaux de l'*Op art* et du *Land Art* font appel à elle, car les artistes ont besoin d'une régularité et d'une progressivité absolue. Le carré, le cercle, le triangle et tous leurs dérivés géométriques comme le losange, le rectangle, l'ellipse, le trapèze... sont les formes de base de toutes les représentations plastiques de ces mouvements. C'est un des points fondamentaux qui va conduire les artistes dans leur démarche de simu-



Richard Long, *Walking a line*, Pérou, 1972.



Michael Heizer, *Double negative*, Nevada, USA, 1969.

lation du relief pour l'*Op art*, et dans l'implantation dans le paysage pour le *Land Art*. Pour simuler l'illusion d'optique, le carré est peu à peu modifié en divers losanges qui vont s'amenuisant ou s'aplatissant très régulièrement selon le besoin de la figure finale escomptée. Idem pour le cercle qui va s'aplatissant en passant par diverses ellipses d'ampleur méthodiquement variable. Toutes les œuvres de Vasarely demandent une exactitude d'exécution et une progression mathématique prédéfinie à l'avance. Il n'y a aucune place pour le hasard. Les œuvres de Michael Heizer et de Richard Long font appel à la ligne ou au rectangle qui s'implante de manière hiératique dans leur environnement.

Tracé

Le tracé est indissociable de l'Histoire de l'art et de l'architecture. Les exemples antiques égyptiens et grecs sont les exemples flagrants. À la Renaissance, la géométrie/perspective entre dans le monde. On se met à obéir à des décisions rationnelles de tracés régulateurs qui sont régis par des règles issues de la géométrie. Dès lors, cette géométrie

dessine les bâtiments et l'environnement qui les entoure. Elle voit une des formes exemplaires dans le dessin du château de Vaux-le-Vicomte et de son jardin, qui prend ensuite son apothéose dans le château et le jardin de Versailles. Académiquement, une composition picturale se base sur un ou plusieurs types de tracés. L'*Op art* et le *Land Art* ne dérogent pas à cette règle. Et lorsque le projet est lancé, sa mise au point est méticuleuse, elle est mesurée précisément ; les progressions sont mathématiques et calculées avec grand soin ; les implantations dans le paysage sont bornées avec grande précision comme le "*Lightning Field*" de Walter de Maria. Plus que tous autres travaux picturaux, l'*Op art* et le *Land Art* se basent sur des tracés exacts et n'en dérogent pas. Ainsi la topographie fait partie de leurs modes de penser, de projeter, et de réaliser, sans pour autant que les protagonistes en soient réellement conscients.

Le tracé et la ligne dans l'approche actuelle

L'*Op art* et le *Land Art* ne font appel qu'à des surfaces géométriques abstraites, à des surfaces géométriques planes qui,

par leurs juxtapositions, donnent l'illusion d'une profondeur et d'un volume en trois dimensions. La combinatoire des lignes et des plans est une des sources puissantes d'invention. Les tracés *Op art* et *Land Art* sont d'une précision sans faille. Actuellement, ils peuvent d'ailleurs être complètement programmés informatiquement, ce qui n'était pas le cas dans les années 60 et 70.

Dès qu'elle est entrée dans le cortège de la science, c'est le tracé qui a caractérisé la topographie. Pour une retranscription planimétrique, pour un relevé de relief quel qu'il soit, le tracé est l'élément essentiel de la retranscription. En ce sens, il a quelque chose de commun à l'*Op art* et au *Land Art*.

Couleur

Progressivité mathématique des dosages de la couleur, dégradés et contrastes.

Avec les travaux scientifiques de Chevreul⁸ au XIX^e siècle, la couleur



⁸ CHEVREUL Michel Eugène, *De la loi du contraste simultané des couleurs*, Gauthier-Villars et fils, Paris, 1839.



Walter de Maria, *Lightning Field*, Nouveau Mexique, USA, 1977.

© Jean Brasille Adagp



Josef Albers, l'«*Homage to the square*»

▶ devient scientifique. Les artistes abstraits, comme Mondrian, Itten, s'en sont emparés donnant naissance à «*l'Abstraction géométrique*», dans les années 1930. Par son travail pictural et dans son enseignement au Black Mountain Collège aux États-Unis, Josef Albers magnifie et illustre au mieux cette tendance. Le rapport des couleurs entre elles donne l'illusion de profondeur. Uniquement par leurs combinaisons et leurs rayonnements, certaines couleurs qui «*avancent*», ou d'autres «*reculent*», d'autres «*s'anulent*», selon leur température, leur rayonnement, leur intensité et leur quantité. C'est par le dosage la proportion, la progression des couleurs, obéissant à un tracé et à des proportions qu'Albers nous donne les illusions optiques géométriques qu'il souhaite. Les artistes de l'*Op art* vont s'emparer de ces réflexions dans un but exclusivement visuel, purement optique, en se basant sur un langage pictural et sculptural abstrait.

La palette de couleurs utilisées est sobre, en aplats très réguliers, sans laisser entrevoir un seul coup de pinceau, à l'image des peintres de l'Abstraction géométrique⁹. Certains peintres pratiquent d'ailleurs l'aplat coloré à la machine afin d'obtenir un fini «*parfait*».

En cartographie, la couleur est utilisée comme un code. Chaque couleur a un sens et désigne un objet bien précis complétant ainsi visuellement l'information à transmettre au lecteur du plan ou de la carte. Le bleu, le vert, le brun, le rouge, le jaune, sont des couleurs utili-

9 MONDRIAN Piet, Van DOESBURG Theo, HERBIN Auguste, ALBERS Josef, etc.

sées comme code en topographie et en cartographie. Leur sens est très rationnel, leur signification est réfléchie afin d'être rendu perceptible par le lecteur du plan ou de la carte. En ce sens, il y a quelque chose de commun avec l'*Op art* car la couleur n'est là que pour suggérer une forme dans la plus grande austérité. La couleur est un code mathématique, géométrique. Aucune suggestion de sensibilité n'est à voir dans l'*Op art* et l'utilisation de la couleur. La couleur «*sert*» la cause de l'optique, et voilà tout ! Le retour à la couleur a le mérite d'amener un peu plus près du cœur des choses¹⁰. Et pourtant, au final, une carte est un art, propice à la rêverie : «*Il y a donc les chenilles sépia des montagnes ; des traits rouges pleins, qui sont des sentiers méprisables puisqu'ils ont été déjà suivis, et des traits rouges pointillés qui marquent à l'aventure les routes ouvertes, inexistantes peut-être. Des traits bleus qui dessinent les fleuves ; des traits verts représentant les limites des provinces ou des états. Quelle sera la possibilité de franchir l'un ou de sauter l'autre ? Le fleuve a peut-être un pont ici ; et la frontière politique un prétexte à n'être pas enjambée. Enfin il y a le problème de pure longueur dans l'espace que tout ce chemin représente.*»¹¹

Volumétrie

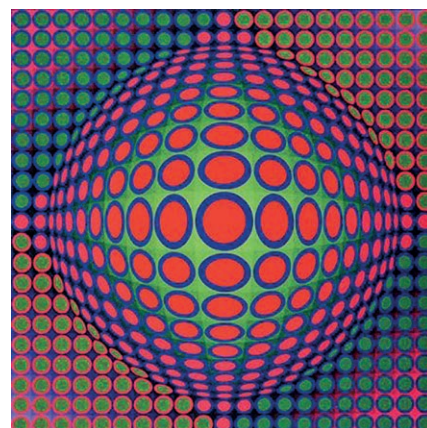
Passage de la 2^e dimension à la 3^e dimension

Les peintures de Vasarely semblent les meilleures illustrations de cette combinaison de tracés, de géométries et de couleurs qui donnent à voir un relief, qui, du fait de sa représentation en deux dimensions, n'existe pas. Les peintures de Vasarely ne sont pas en relief, elles sont des illusions de relief. Pourtant, il est à s'y méprendre tellement l'illusion est là. Et un relief est bel et bien rendu, alors qu'aucune aspérité n'est à constater sur le support.

Les volumes semblent «*reculer*» ou «*avancer*» vers le spectateur alors qu'il n'en est rien.

10 MERLEAU-PONTY Maurice, *L'œil et l'esprit*, Folio, Gallimard, Paris, 1964, p 67.

11 Victor Segalen, *Equipée*, in *Voyage au pays du réel*, éditions Complexe, Paris, 1995, p 986.



Victor Vasarely, *Vega 200*, 1968.

Dans ce même sens, une carte, un relevé topographique peut avoir au final cette illusion d'optique dans les ombres d'un relief, ou dans l'accumulation régulière de courbes de niveaux.

Passage de la 3^e dimension à la 2^e dimension

À l'inverse, l'optique peut également se lire dans l'autre sens : en faisant un passage de la 3D à la 2D. Le passage de la troisième dimension à la deuxième dimension se vérifie avec tous les travaux de Georges Rousse et de Felice Varini. Les illusions d'optique auxquelles ils aboutissent sont déstabilisantes : elles mettent le spectateur en présence d'œuvres que l'on croit en deux dimensions, alors qu'elles sont, en fait, présentées dans des espaces qui sont en trois dimensions. À l'inverse de Vasarely, Rousse et Varini «*aplatissent*» la troisième dimension laissant au spectateur croire que leurs travaux ne sont qu'en 2D. La morphologie du lieu se trouve complètement transfigurée par uniquement un jeu géométrique tracé à la couleur dans l'espace. Une fois de plus, le spectateur est déstabilisé par une illusion d'op-



Georges Rousse, *Sargadelos*, 2001.



Felice Varini, *Anamorphose*, Carcassonne, 2018.

tique à l'échelle du paysage. La perte de la profondeur de champ est également due à un jeu géométrique. Une série de figures simples mobilisant un tracé simple et un jeu de couleur mettent le spectateur en déséquilibre par rapport à sa perception habituelle de la perspective. La perte des lignes fuyantes liées à l'horizon brouille la vision "classique", et rabat la profondeur de champ sur un tableau fictif en deux dimensions.

La topographie des lieux s'en trouve complètement perturbée et presque inversée. Rousse et Varini, tendent

à annihiler la topographie par cette illusion d'optique. Faire disparaître le relief dans le paysage est une gageure pour le topographe, car cela semble difficile, voire impossible à obtenir. Mais c'est aussi, et surtout, un non-sens pour le topographe. Le relief et les aspérités du paysage sont la raison d'être du topographe. Hors ces artistes jouant de l'illusion d'optique semblent aller à l'inverse du sens fondamental de la topographie. Ils semblent vouloir inverser la vision du monde. Mais il n'en reste pas moins que pour ce faire, ils ont besoin de la topographie !

Perte de la 2D et de la 3D

L'Art optique trouve aussi un moyen d'expression par le volume et la sculpture avec le travail de Jesús Raphaél Soto. Ses tracés se font donc dans l'espace, dans la matière, et dans la troisième dimension, avec des reliefs spécifiques. Soto utilise la géométrie en trois dimensions pour développer un art cinétique qui fait intervenir le déplacement du spectateur pour brouiller les pistes de la vision simultanément en 2D et 3D. Sortes de bas-reliefs réalisés avec des matériaux du commerce, alternant brillance et matité, Soto donne à voir des effets d'optiques dans lesquels le relief n'est plus, mais l'optique cinétique prime, perturbant et déstabilisant la vision de celui qui regarde l'œuvre. On peut parfois associer ses travaux aux dièdres de la géométrie descriptive, faisant appel aux projections verticales et horizontales, rendant ainsi visible dans la matière ce qui est uniquement appréhendable sur le papier. Il est sûr que la géométrie descriptive n'est pas étrangère aux artistes de l'*Op art*, comme elle est nécessaire à la topographie. Il faudrait là une autre réflexion pour tenter de rapprocher l'art et la géométrie descriptive. L'exemple est particulièrement frappant dans les œuvres que Soto nomme ses "Pénétrables", sortes de sculptures



© Adagp Paris 2013



© Adagp Paris 2013

Jesús Rafael Soto, *Pénétrable bleu*, 1999.

▶ spatiales où le spectateur est invité à entrer. Sa vision se trouve alors modifiée par une multitude de verticales souples qui divisent la vision, et fractionnent l'image. La vision se trouve divisée par un effet d'optique dans lequel le spectateur se déplace. Il parcourt un volume qui est lui-même un effet d'optique. Le spectateur se promène dans une "forêt" de lignes parallèles, multitudes de courbes de niveau en trois dimensions, qui perturbent la vue et le relief.

Dimension et échelle

Land Art et topographie

Le paysage est aussi un support d'investigation et d'intervention artistique. Nombreux sont les artistes qui croisent la logique du *Land Art* avec celle de l'*Op art*, en jouant avec les matériaux du site associés à un dispositif géométrique lié à une topographie et un relief du lieu.

La topographie d'un site devient alors prépondérante et fondatrice pour l'intervention artistique. L'œuvre d'art est totalement issue des mouvements de terrain sur lequel elle prend place. C'est le relief qui détermine la place de l'œuvre d'art qui elle-même fait corps avec le site choisi. Les notions de géométrie, de tracé, de couleur, de volumétrie se voient alors complétées par celles de dimension et d'échelle. Les cartes topographiques sont très souvent utilisées par les artistes pour la mise au point de leurs projets. C'est par cet aller/retour constant entre la carte et la réalité du terrain que les projets sont mis au point. Le fait d'avoir choisi de positionner sa "*Spiral Jetty*" dans le lac salé de l'Utah est, pour son auteur Robert Smithson, partie intégrante du projet. L'élément Eau est complètement intégré au projet et à l'idée même de



Robert Smithson, *Spiral Jetty*, Utah, 1970.



Géoglyphe Nazca, *Le singe*, Pérou, -200 av. J.-C.

cette "jetée" qui n'est rien d'autre qu'une forme géométrique posée dans le paysage extrêmement ouvert et plat du lac et du désert. Tant par sa forme que par son échelle et sa situation dans un paysage désertique, cette spirale a un lien de parenté avec certains tracés des indiens Nazcas du sud du Pérou,

tracés dont on sait très peu quant à leur signification.

Le paysage et la topographie entrent en jeu dans le sens où la platitude et la sobriété des lieux et du site sont les premières composantes pour que ces travaux artistiques puissent avoir lieu. Avec la "*Spiral Jetty*" et les travaux



Michael Heizer, *City*, désert du Nevada, depuis 1972.



Onformative, Google faces, *searching for faces on earth*, 2013.

Nazcas qui ne sont visibles que d'une distance assez conséquente du sol, nous abordons une autre échelle de la forme artistique dans le paysage : celle qui dépasse le champ visuel de l'homme. Certains travaux demandent en effet une vision beaucoup plus éloignée de la surface terrestre pour avoir la perception complète de l'œuvre. Ainsi la "City" de Michael Heizer qui s'étend sur plusieurs hectares et dont on ne peut avoir une vision totale, si ce n'est vu d'avion.

Dans un même état d'esprit mais à une échelle plus large, certains artistes vont jusqu'à repérer des œuvres d'art "Ready made"¹² à l'échelle du paysage. Ils vont même jusqu'à composer des programmes qui retrouvent analogiquement des formes à l'échelle de la planète. C'est le cas d'Onformative¹³, un groupe d'artistes qui recherche des analogies anthropomorphes avec le relief terrestre, à partir d'une distance satellitaire.

Pour être plus précis, ce groupe d'artistes s'est donné comme but de rechercher et de trouver des reliefs terrestres présentant des similitudes avec le visage humain. A partir de photographies aériennes, de programmes d'images de satellites, ils ont en effet repéré des

formes de visages dont les dimensions dépassent la perception de l'œil niveau du sol. On voit donc notre planète à des distances d'astronaute, repérant des formes, essayant de les rattacher à des traits humains connus. Art à l'échelle du relief planétaire, que l'on peut identifier à notre vision de la Lune depuis la Terre. Qui n'a pas vu un visage dans les formes de la pleine Lune ? Les cratères lunaires ne fabriquent-ils pas un visage ?

Conclusion

Toutes les notions qu'impliquent ces deux mouvements artistiques se voient donc assujetties à celles du relief et des mouvements terrestres. La topographie imposée par le paysage stimule l'action artistique dans un but d'illusion ou de modification du relief. L'œil croit une chose que la réalité ne reflète pas. L'anamorphose dans le paysage tend à faire croire, à simuler, à aplatir le relief ou au contraire à le créer, sans que celui-ci n'existe vraiment. Hors la réalité est tout autre que ce que perçoit notre œil lorsqu'il croise des travaux de *Land Art* qui impliquent la déformation géométrique.

Tant que la géométrie, comme science ou art, reste sur le papier ou sur l'écran, elle n'est qu'une abstraction, qu'une "supposée" réalité qui est ailleurs, ou qui existera plus tard. Lorsqu'elle se trouve transposée du papier – ou de l'écran – dans la nature, elle devient

"réalité". Réalité de ligne, de tracé, de géométrie, de volume, de couleur, de matière, de dimensions... *l'endroit où notre cerveau et l'univers se rejoignent*¹⁴.

Cette "réalité", par le biais de la topographie, devient alors une illusion que la perception déforme. Et en ce sens, La perception est une hallucination vraie¹⁵. Et il faut bien avoir présent à l'esprit que, de toute façon, la perception se tient à l'intérieur du cadre sensoriel, que c'est par nos sens que nombre de choses adviennent, nombre de choses sont jugées par les uns et les autres. Et que ce même cadre sensoriel – l'art – et rationnel – la topographie – est indissociable de notre condition humaine. Il faut que la pensée de science (...) se replace (...) dans le sol du monde sensible¹⁶. ●

Contact

Laurent REYNÈS

Enseignant-chercheur - Département architecture - INSA de Strasbourg.
laurent.reynes@insa-strasbourg.fr

12 Référence à Marcel Duchamp et ses œuvres d'art "Ready made" ou "Déjà faites", à partir de 1913.

13 Voir les visages à l'échelle de la planète. Onformative, Google faces, *searching for faces on earth*, 2013. <https://onformative.com/work/google-faces>

14 KLEE Paul, cité par MERLEAU-PONTY Maurice, *L'œil et l'esprit*, Folio, Gallimard, Paris, 1964, p 67.

15 BRETON André, cité par PASSERON René, dans *Pour une philosophie de la création*, Klincksieck, Paris, 1989, p 35.

16 MERLEAU-PONTY Maurice, *L'œil et l'esprit*, Folio, Gallimard, Paris, 1964, p 12.



■ La science au présent 2019 Revivez les temps forts de l'actualité scientifique et technique !

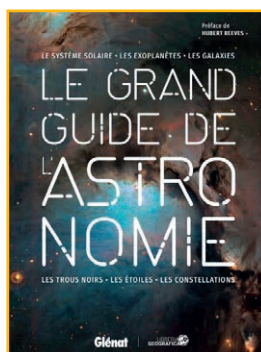
La science au présent, rendez-vous annuel depuis 1997, a pour ambition de répondre à cette nécessité : dresser, avec rigueur, une synthèse des avancées, mutations et innovations que la science nous aura apportées dans l'année écoulée, mettre le lecteur en phase avec son temps, et lui permettre de tenir son rôle de "citoyen éclairé" en inscrivant le fait scientifique dans la vaste histoire des idées.

Les meilleurs spécialistes dans leur domaine ont rédigé cet ouvrage divisé en cinq parties : étapes, la science en marche et le point sur quelques avancées récentes ; prix et distinction de l'année, Nobel, médaille Fields... ; controverses, science et société, débats et questions d'actualité ; panoramas, des dossiers de fond pour savoir et comprendre ; anniversaires, l'histoire des sciences à travers les anniversaires célébrés en 2019.

À lire, l'article "GALILEO" de Jonathan Chenal, ingénieur des travaux géographiques et cartographiques de l'État, Bernard Bonhoure, ingénieur expert au CNES, "GALILEO, système européen de navigation par satellite", Encyclopædia Universalis (en ligne), URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/galileo-systeme-systeme-europeen-de-navigation-par-satellite/>

Ce bel ouvrage de 320 pages regroupant une centaine d'articles, bénéficie de bibliographies à jour et d'une iconographie foisonnante avec 147 documents, photographies, tableaux, cartes, dessin et schémas en couleur.

► ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS
sap@universalis.fr
ISBN : 9782-34101-214-0



■ Le grand guide de l'astronomie

"Grâce à l'astronomie, nous connaissons maintenant plusieurs des étapes qui ont marqué la transformation du cosmos tout au long des 13,7 milliards d'années de son existence. Le Grand Guide de l'Astronomie aborde, avec de somptueuses images, le déroulé de cette histoire tel que nous le connaissons aujourd'hui..."

Hubert Reeves, astrophysicien

Ce grand guide de l'astronomie comporte : des images satellites provenant de la NASA, une impressionnante documentation d'archives qui intègre les recherches spatiales les plus récentes (la détection d'ondes gravitationnelles, les dernières découvertes d'exoplanètes comme Ross 128...), une section répertoriant 88 constellations avec pour chacune d'entre elles une carte précise indiquant leur localisation dans l'espace ainsi que leur magnitude stellaire, une liste des observatoires de France et du monde, ainsi qu'un glossaire complet.

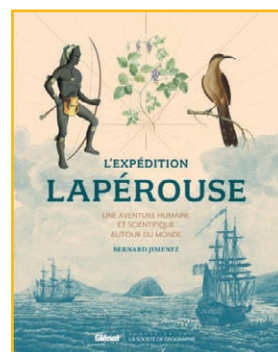
► GLÉNAT
LIBRERIA GEOGRAFICA
30 € - 288 pages
ISBN : 9-782344-035634

■ L'expédition Lapérouse Une aventure humaine et scientifique autour du monde

Bernard JIMENEZ

Dans le sillage d'une des plus illustres expéditions maritimes, revivez cette exceptionnelle aventure humaine et scientifique du départ du port de Brest jusqu'au tragique naufrage à Vanikoro au milieu de l'océan pacifique sud.

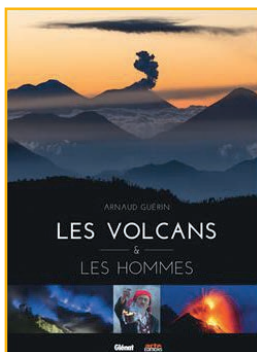
En 1785, Louis XVI lance sur les mers la plus formidable expédition



scientifique de l'histoire de France, commandée par le comte de Lapérouse. Sur les frégates "Boussole" et "L'Astrolabe" embarquent les meilleurs officiers, une dizaine de savants – astronomes, physiciens, naturalistes – et des artistes qui peindront paysages, animaux et plantes. C'est à cette "académie flottante", si caractéristique du Siècle des Lumières, que le lecteur est invité à se joindre. Escale après escale, le lecteur accompagnera les savants cartographier et inventorier le monde, faire des expériences de physique et de chimie au niveau de la mer comme au sommet des volcans et aussi vivre les premiers pas de l'anthropologie et de l'ethnologie. Durant plusieurs années, l'auteur, Bernard Jimenez, s'est rendu précisément sur les lieux visités par l'expédition Lapérouse, afin d'ajouter aux sources historiques sa compréhension des lieux et des événements qui s'y sont déroulés. Il a observé les fleurs étudiées par les botanistes du Jardin du roi, contemplé la même moue dubitative des statues de l'île de Pâques et aussi interrogé les descendants des "Naturels" qu'a rencontrés Lapérouse.

Voyageur, historien, photographe, Bernard Jimenez parcourt le monde depuis quarante ans, et a entrepris de suivre tout autour du monde l'expédition Lapérouse, natif d'Albi, comme lui. Du Pacifique Nord aux mers du Sud, il a nourri son récit des choses vues, et mélangé des tranches de sa vie avec celles de ces explorateurs partis de Brest il y a plus de 200 ans.

► GLÉNAT LIVRES
Collection La Société de géographie
La Société des explorateurs
35 € - 208 pages
ISBN : 978-2344-031650



■ Les volcans et les hommes

Textes et photographies :

Arnaud GUÉRIN

L'auteur nous emmène sur les lieux des plus fascinants volcans du monde. De l'Islande à Hawaï, en passant par l'Indonésie ou le Japon, il nous fait également découvrir la vie des hommes à l'ombre de ces géants en sommeil.

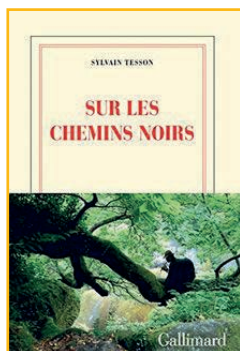
Depuis 15 ans, Arnaud Guérin parcourt les volcans du monde à la rencontre de celles et de ceux qui vivent au plus près d'eux. Dans ce livre, il relate le quotidien des hommes qui vivent là. Au-delà des images d'Épinal de spectaculaires éruptions, coulées de lave et autres panaches de cendres, il explore la formidable diversité des sujets liés aux phénomènes volcaniques. Sciences de la terre, climatologie, biodiversité, océanographie, géographie, agronomie, archéologie... pour la partie scientifique. Mythologie, religion, philosophie, traditions populaires et artistiques, architecture, cuisine ou art de vivre pour la partie humaine. Chaque volcan est unique. Un paysage, un climat, un contexte géologique et des rencontres pour comprendre à quel point le volcanisme est un livre ouvert sur l'histoire dynamique de notre planète et de ses habitants.

L'auteur, photographe et géologue, **Arnaud Guérin**, est devenu photographe professionnel pour faire le lien entre la science et le grand public. Raconter la terre et la nature est ce qui l'anime. Il est l'auteur de nombreux livres, dont le dernier "Islande, les clés pour bien voyager" aux éditions Glénat.

► COÉDITION ARTE ÉDITIONS / GLÉNAT

35 € - 200 pages

ISBN : 9782344032824



■ Sur les chemins noirs

Sylvain TESSON

Avec cette traversée à pied de la France réalisée entre août et novembre 2015, Sylvain Tesson part à la rencontre d'un pays isolé, sauvage et méconnu. C'est aussi l'occasion d'une reconquête intérieure après la terrible chute qui a failli lui coûter la vie en août 2014. Le voici donc en route, par les petits chemins que plus personne n'emprunte, en route vers ces vastes territoires non connectés, qui ont miraculeusement échappé aux assauts de l'urbanisme et de la technologie, mais qui apparaissent sous sa plume habités par une vie ardente, turbulente et fascinante.

Lire aussi : l'article consacré à Sylvain Tesson, dans IGN Magazine Hiver 2019 "On devrait toujours répondre à l'invitation des cartes".

Sylvain Tesson est le fils de Philippe Tesson, journaliste français de presse écrite, chroniqueur de radio et de télévision qui a fondé en 1974 le journal *Le Quotidien de Paris*, dont il est resté le propriétaire et le directeur de publication jusqu'en 1994. Sylvain Tesson est né en 1972, aventurier et écrivain, passionné d'escalade et de cartographie, il est président de la *Guilde européenne du Raid*. Auteur de nombreux essais et récits de voyage, dont "L'axe du loup", son recueil de nouvelles "Une vie à coucher dehors", s'inspirant de ses pérégrinations, reportages et documentaires, a reçu le prix Goncourt de la nouvelle 2009. "Dans les forêts de Sibérie" a été couronné par le prix Médicis essai 2011, et "Berezina" par le prix des Hussards 2015.

► GALLIMARD COLLECTION FOLIO

6,80 € - 178 PAGES

ISBN : 9-782072-823428

LE COIN DES REVUES

■ Cartes et géomatique n° 238 - 12/2018

Revue du Comité français
de cartographie CFC

Ce numéro est l'aboutissement
d'une journée d'études intitulée
"faire la carte et restituer les
paysages"

Une première partie, consacrée
aux "Mutations de la topographie
au seuil du XIX^e siècle", reprend
les communications sur les cartes en
courbes de niveau, le cadastre et se
termine par un article supplémentaire
sur le devenir des courbes de niveau
dans la cartographie du dépôt
de la guerre.

Une seconde partie, intitulée
"De la carte aux paysages,
les apports du numérique", présente
des expériences ou programmes
de numérisation de cartes anciennes
à des fins de restitutions
géo-historiques, dont en premier lieu
le plan de Barcelone.

► 128 PAGES - 15 €

ISSN : 2119-9825



■ Grande Galerie

Le journal du Louvre
Printemps 2019 - n° 47

La pyramide -
histoire d'une icône

La pyramide - Modernité et
symbole du Grand Louvre

Le trentième anniversaire de
la Pyramide sera célébré tout au long
de l'année. Le premier président-
directeur du Louvre, Michel Laclotte,
se remémore l'origine et les débuts
du projet Grand Louvre. Un portfolio
retrace les grandes étapes de
la création de la Pyramide, monument
iconique dont l'architecture est
ensuite analysée et interprétée.

► 15 PAGES - 7,50 €

ISSN : 1959 - 1764



► ■ **Qui fut le grand architecte de Khéops ?**

Pourquoi la grande pyramide de Khéops, qui demeure une énigme, est-elle la seule de toutes les pyramides du monde à être creuse : 2 000 m³ de vide se trouvent recensés à l'intérieur ?

Comment Khéops, le plus grand pharaon d'Égypte, fut-il à l'origine de la maîtrise des crues du Nil et surtout le premier monothéisme des religions ?

Comment, sous Khéops, il y a 5 000 ans, une telle situation politique a-t-elle été possible : d'abord, la notion d'État, un État fort, puissant, autonome dans sa gestion ?

Et surtout, qui fut le grand Architecte qui conçut cette architecture mégalithique, unique dans le monde que nous connaissons ?

L'auteur explore certaines pistes, retrouve d'autres traces et justifie, en partie, l'existence de cette grande pyramide et du Sphinx qui lui est accolé.

Voici donc les principaux points qu'étudie et que vous présente Jacques Rolland dans cet ouvrage.

Jacques Rolland est reconnu comme l'un des meilleurs spécialistes français et le plus documenté sur l'Ordre du Temple indépendamment de son intérêt pour l'Égypte Ancienne. Il est l'auteur d'ouvrages de référence sur ce sujet et donne de nombreuses conférences.

► **CÉPADUÈS-ÉDITIONS**

12 € + 5 € de frais de port - 204 pages
ISBN : 9791090138551



■ **OVERVIEW**
Benjamin GRANT

Ce livre réunit plus de 200 images originales de paysages, de villes ou de monuments, toutes réalisées en assemblant des photographies satellites en haute résolution. Chaque "vue d'en haut" offre une nouvelle perspective et permet une meilleure compréhension de l'impact humain sur notre planète.

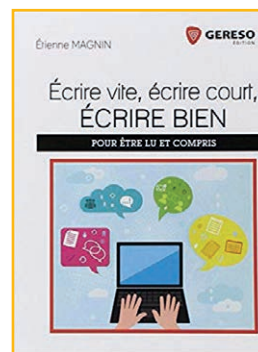
Des champs de tulipes néerlandais aux échangeurs routiers émiratis, en passant par une ville fantôme chinoise ou un cimetière d'avions californien, les images se succèdent et se combinent pour dresser un portrait de notre planète comme vous ne l'avez jamais vue.

Overview vous offre un voyage photographique autour de la Terre vue d'en haut. Il met en évidence la beauté et la singularité de notre planète, mais aussi sa fragilité. Il permet une compréhension de l'interconnexion de toute vie, de l'impact de l'homme sur son environnement et du désir accru d'en prendre soin.

OVERVIEW est né de Daily Overview, un compte Instagram créé en 2013 par Benjamin Grant. Cet esthète new-yorkais, diplômé de l'université de Yale, y publie quotidiennement de spectaculaires vues aériennes de notre planète.

► **CHÈNE**

35 € - 287 pages
ISBN : 9-782812-319921



■ **Écrire vite, écrire bien, écrire court**
Courriers, courriels, SMS... pour être lu et vraiment compris !
Etienne MAGNIN

L'écrit est partout, dans l'entreprise et dans la vie privée : courriels, lettres, SMS, notes, rapports, procédures...

Chacun connaît le grand principe pour mieux communiquer par écrit : être clair et concis. Pourtant, dans la pratique, peu sont capables de l'appliquer ! Alors, vous souhaitez savoir comment rédiger vite, court et bien ?

Vite, car vous êtes souvent dans l'urgence, vous avez beaucoup d'autres tâches à réaliser ou de nombreux courriels à envoyer.

Court, parce que votre destinataire a peu de temps à vous accorder.

L'auteur vous invite à découvrir des exercices simples et variés, des astuces et des conseils qui vous aideront à écrire vite, court et bien, pour être vraiment lu et compris.

Etienne Magnin est expert dans la conception de supports documentaires et spécialisé en ingénierie pédagogique. Il accompagne les professionnels sur les techniques de communication écrites et visuelles.

► **GERESO ÉDITION**

20 € - 179 pages
ISBN : 978-2-37890-119-6

RÉPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 159

COVADIS GEOMEDIA	4° de couv.	REIS STOLZEL	32
FARO (publireportage)	9	SIG 2019	3° de couv.
GEODATADAYS 2019	2° de couv.	TOPCON (publireportage)	30
LEICA GEOSYSTEMS	2		

SIG 2019



Conférence Francophone Esri 16 & 17 octobre - Les Docks de Paris

Devenez acteur du premier événement consacré
à la dimension géographique.

Venez prendre la parole et échanger avec vos pairs !

<https://sig2019.esrifrance.fr>

Un événement organisé par



avec le soutien de



Conférence organisée en partenariat avec :



GEOMAP-IMAGIS
Geo-Solutions Professionnelles



AUTODESK® - when it has to be right





BIM

Infrastructure c'est nous !

Groupe GEODESIAL

Logiciels métiers d'étude et de conception
Géomatique - Urbanisme - Infrastructure - BIM

COVADIS **1/7**

AUTOPISTE

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