

# xvz

**aft**  
association francophone de topographie



n°173



**Relevé 2D & 3D  
du marégraphe  
de Marseille**  
page 55

"Une décade d'innovation,  
une nouvelle référence en RTK"  
**N2 PALM IMU RTK**



Le PALM N2 IMU RTK est l'un des récepteurs les plus compacts du marché avec seulement **48 mm** de rayon et un poids de **0,67 kg**, batterie comprise.

Dispose de **1590 canaux**. Toutes les constellations GNSS et fréquences sont disponibles. En compensant jusqu'à **60° l'inclinaison de la canne**, le N2 élimine les problèmes associés à la topographie des points cachés et maintient une précision de **2,5 cm en 3D**.

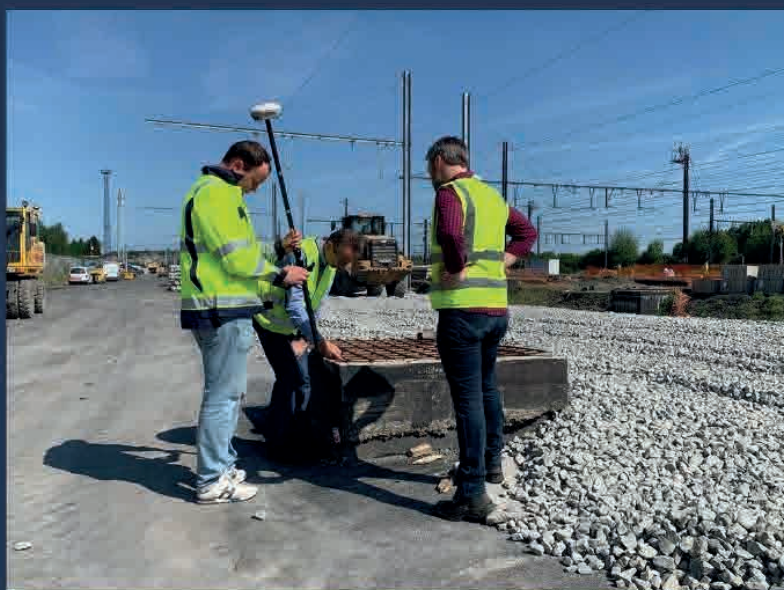
Modem UHF intégré de **410 à 470 MHz portée jusqu'à 15 km** avec des scénarios de travail largement étendus.

Résiste aux perturbations et permet les levés sous couvert forestier.

Piloté par l'application gratuite SURVEY MASTER qui supporte les connexions NTRIP (Client et Serveur), les systèmes de coordonnées nationaux ainsi que les modèles de géoïde, le N2 rivalise sur tous les terrains.

Mode RTK, PPK et PPP.

Carte OEM propriétaire développée par ComNav Technology Ltd.



**DISTRIBUTEUR ET SUPPORT EUROPE**

**CGEOS SPRL**

Rue du Tienne de Mont, 11 5530 MONT

Belgique

[www.cgeos.be](http://www.cgeos.be)

**DISTRIBUTION FRANCE**

Direct Topo SAS 303 allée des platanes

31230 ANAN

[www.directopo.fr](http://www.directopo.fr)

**SinoGNSS<sup>®</sup>**  
By ComNav Technology Ltd.

**LA NOUVELLE RÉFÉRENCE EN GNSS**

# SOMMAIRE

**Directeur des publications**  
Tania Landes  
Maître de conférences INSA de Strasbourg

**Directeur des publications adjoint**  
Flavien Viguier  
Ingénieur topographe, SNCF

**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  
Ingénieur topographe, retraité

**Rédacteur en chef adjoint**  
Flavien Viguier

**Comité de rédaction**  
André Bailly  
Ingénieur géomètre ETP, retraité  
Françoise Duquenne  
Ingénieur général des Ponts honoraire  
Ghyslain Ferré  
Enseignant en topographie, ESGT Le Mans  
Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités  
INSA de Strasbourg  
Michel Kasser  
Professeur des universités, retraité  
Jean-Pierre Maillard  
Géomètre-expert foncier, retraité  
Emmanuel Natchitz  
Ingénieur géomètre, ESITC Paris  
Elodie Sissler  
Enseignant en topographie et foncier,  
Lycée Dorian

**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**  
4<sup>e</sup> trimestre 2022 ISSN 0290-9057  
Tirage de ce numéro : 800 ex  
CPPAP : 0324 G 80866

**Abonnement pour les agences**  
Contactez info@aftopo.org pour tarifs

**Adhésion à l'AFT comportant l'abonnement et le téléchargement gratuit du PDF.** Visitez <http://www.aftopo.org/> rubrique Pour adhérer

**Vente au numéro** Téléchargez le PDF pour 17 € ou achetez le numéro papier pour 25 € contact info@aftopo.org

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 : Marégraphie de Marseille © ENSG  
Vignette : FIG 2028 © TERIA

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

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres)   
Membre de la FGF (Fédération des géomètres francophones)

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

Courriel : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) - Site Internet : <http://www.aftopo.org>

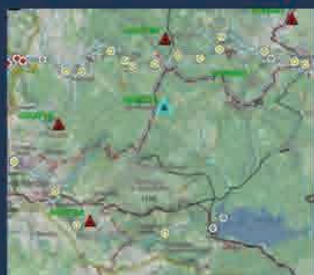
<b>Éditorial</b> .....	3	<i>Zuheir ALTAMIMI - Paul REBISCHUNG</i> <i>Xavier COLLILIEUX - Laurent METIVIER</i> <i>Kristel CHANARD</i> .....	35
<b>Infotopo</b>		> Référentiels géodésiques africains : de la géodésie traditionnelle à l'ère spatiale <i>Diogoye DIOUF - Laurent MOREL</i> <i>Françoise DUQUENNE</i> .....	39
> Les informations de la profession .....	4		
<b>Hommage</b>			
> Hommage à Robert Chevalier .....	7		
<b>Manifestation</b>		<b>Patrimoine</b>	
> Le XXVII <sup>e</sup> congrès de la FIG à Varsovie du 11 au 15 septembre 2022 <i>Bernard FLACELIÈRE</i> .....	8	 	
> Retour sur les Journées de la topographie 2022 .....	10	> Valorisation du patrimoine culturel à travers la photogrammétrie et l'intégration de la réalité augmentée - Musée de l'Histoire et des Civilisations de Rabat, Maroc <i>Hajar OUHSINE - Naoual SARDI - Kenza AIT ELKADI</i> <i>Ithri AIT HOU - Adam BOURAMDANE</i> <i>Anas SEDRATI</i> .....	51
> Geodatadays 2022 <i>Françoise DUQUENNE</i> .....	11	> Relevé 2D & 3D du marégraphe de Marseille <i>Emmanuel CLEDAT - Clovis BERGERET - Marius DAHURON - Lilian WECKER - Frédéric YE</i> .....	55
> Le 46 <sup>e</sup> Congrès des géomètres-experts lance le projet transformatif "géomètre-expert 2030" <i>Tania LANDES</i> .....	12		
<b>La vie des écoles</b>		<b>Topo vécue</b>	
> Retour sur la 18 <sup>e</sup> édition du Cercle Géo à l'ESGT <i>Lucien SANCEREAU - Max GUINCHARD</i> .....	14	> Des mesures hors du commun <i>Paul COURBON - Claude JACQUES</i> .....	63
<b>Environnement</b>		<b>Voyage</b>	
> Antarctique 2.0°C, pourquoi localiser des manchots ? <i>Lana LENOURRY - Paul CHAMBON - Julia GRONDIN - Cédric BOTELLA - Synthèse et mise en forme par Bernard FLACELIÈRE</i> .....	15	> Les aventuriers du tachéo perdu .....	67
<b>Cartographie</b>		<b>Art et géométrie</b>	
> Premier atlas IGN des cartes de l'anthropocène <i>Jean-Pierre MAILLARD</i> .....	19	> Charles Pollock à l'ombre de Jackson <i>Jean-Pierre MAILLARD</i> .....	68
<b>Compensation</b>		<b>Ouvrages</b>	
> Détermination des coordonnées de station sur plan cote <i>Nicolas VAN CRANENBROECK</i> .....	21	<i>André BAILLY</i> .....	70
<b>GNSS</b>		<b>Foncier international</b>	
> Galileo High Accuracy Service (HAS) ou le service de haute précision de Galileo <i>Bernard FLACELIÈRE</i> .....	28	> Continuer de plaider pour l'équité et l'égalité homme femme en Afrique de l'Ouest : quelques constats <i>Claire Galpin</i> .....	72
<b>Géodésie</b>		Pour la recherche de nos annonceurs, consulter la p. 71	
> Détermination de la déviation de la verticale sur le barrage de Plan d'Aval, sans aucune instrumentation spéciale, avec une précision de 0,4 mgon <i>Thomas TOUZÉ</i> .....	30		
> ITRF2020 : Un référentiel augmenté affinant la modélisation des mouvements non linéaires des stations			

**PROCHAIN XYZ - n° 174**  
Quelles données pour étudier la pollution lumineuse

- SinoGNSS N2 et N5 au sommet de la Margeride en Lozère, France.
- Le signal géodésique de Randon culmine à 1 551 mètres d'altitude.
- Positionnement en mode RTK et PPP vérifiés en temps réel.



## LE N5 ET LE N2 AU SOMMET



Doté des technologies les plus avancées, N2 est un récepteur GNSS IMU leader de l'industrie pour les professionnels de l'arpentage, de la cartographie et de la construction.



IMU intégré, carte GNSS K8 pour un suivi complet des constellations, UHF à longue portée, d'un écran OLED, d'une grande batterie Li de 6800 mAh, le récepteur GNSS N5 offre une expérience plus pratique, fiable et efficace sur le terrain en particulier lorsqu'il travaille avec le logiciel de collecte de données Survey Master.

Le lundi 7 novembre 2022, un membre de l'équipe de la société belge CREATIVE GEOSENSING SPRL est parti vers le signal de Randon au sommet de la Margeride sur la borne géodésique de l'IGN. Objectif : vérifier les coordonnées obtenues en utilisant le mode RTK avec les corrections du réseau PREMIUM POSITIONING ainsi que le mode PPP Hypergeolocation de la société GEOFLEX France.

Mission accomplie puisque les écarts constatés en temps réels étaient de 3,4 cm en X et 6,6 cm en Y pour une précision renseignée par l'IGN < 10 cm. Le signal surplombant la borne est renversé.

Parmi les utilisateurs des solutions GNSS de ComNav Technology Ltd. nous retrouvons les bureaux d'études, les organisations gouvernementales, les géomètres experts ainsi que les sociétés spécialisées dans l'auscultation numérique automatique des ouvrages d'art et de nombreux professionnels qui souhaitent réaliser des levés topographiques de qualité avec un prix abordable leur permettant un retour sur investissement aux premiers projets. Les mises à jour des récepteurs et de l'application SURVEY MASTER sont gratuites.

Contactez nous pour une présentation et vous serez conquis !



### DISTRIBUTEUR ET SUPPORT EUROPE

**CGEOS SPRL**

Rue du Tienne de Mont, 11

**5530 MONT**

**Belgique**

[www.cgeos.be](http://www.cgeos.be)

### DISTRIBUTION FRANCE

**Direct Topo SAS**

303 allée des platanes

**31230 ANAN**

[directopo.fr](http://directopo.fr)

La société ComNav Technology Ltd. Shanghai RPC, fête cette année ses 10 ans. En 2012, elle conçoit et produit la première carte OEM GPS et BEIDOU K501. Depuis, les générations se succèdent pour qu'en 2022, la carte OEM K803 devienne un standard en matière de traitement des signaux GNSS multi-constellations et multi-fréquence avec un IMU et plus de 1500 canaux.

Sur base de ses propres cartes OEM, la société ComNav Technology Ltd. décline des récepteurs GNSS de haute précision permettant le positionnement dans les différents modes (RTK, PPK et PPP) ainsi que son nouveau carnet de terrain R60 sous Android avec l'application SURVEY MASTER gratuite.

## De nouveaux rendez-vous

Il y a des jours où on a plaisir à annoncer des nouvelles. La vignette de la couverture et l'article sur le congrès de la FIG (Fédération internationale des géomètres) à Varsovie mettent en exergue le 150<sup>e</sup> anniversaire de cette institution internationale. Fondée en 1878 à Paris, il semblait normal d'y fêter cet anniversaire. Les instances de la FIG, l'assemblée générale et le conseil, ont ainsi attribué l'organisation de **la semaine professionnelle de la FIG (ou FIG Working Week) de 2028 à Paris**, et plus précisément aux deux membres français, l'Ordre des géomètres-experts et l'Association francophone de topographie. Ce numéro n° 173 de la revue XYZ s'associe à la revue Géomètre n° 2207 de novembre 2022 où Jean-François Dalbin annonce également la nouvelle. Il ne m'en voudra pas si j'emprunte sa conclusion, car elle doit être largement partagée : *"Cette semaine de travail sera l'occasion de mettre en avant une profession peu connue et pourtant à l'origine de nombreux projets et de confronter ses connaissances avec le monde entier. Sans compter la richesse incontestable de s'ouvrir sur le monde et de faire des rencontres inoubliables. Alors mobilisons-nous pour 2028 !"*

Dans l'attente de cette mobilisation, parcourez *"Le XXVII<sup>e</sup> congrès de la FIG à Varsovie"* en page 8 pour humer et apprécier ces senteurs internationales.

À un horizon beaucoup plus proche, voici une autre agréable nouvelle : suite à deux forums automnaux, après les reports et décalages successifs liés à la pandémie de la COVID19, le forum 2023 redevient printanier. **La section topographie de l'INSA Strasbourg se propose de nous accueillir le jeudi 13 avril 2023.** Prenez déjà date pour venir ou revenir en ce pôle de l'enseignement de la topographie où le thème du forum portera forcément sur des techniques de pointe chères à ses enseignants.

Ces rendez-vous pris, revenons à ce numéro qui termine cette année pleine de reprises. Nous y rendrons tout d'abord un hommage appuyé à Robert Chevalier qui a œuvré au sein de l'AFT, notamment comme rédacteur en chef et chargé de la communication. Le lecteur parcourra les manifestations et événements variés, la FIG de Varsovie déjà nommée, le congrès de l'OGE du Havre, les GeoDataDays de Poitiers, les JDT de Strasbourg pour terminer par le Cercle Géo du Mans. Sans vouloir tout dévoiler en détail dès l'éditorial, j'invite chaque lecteur à découvrir la riche rubrique géodésie (ITRF2020, Afrique, déviation de la verticale), puis il remettra à niveau ses notions de compensation par les moindres carrés. Celle dédiée au GNSS proposera une actualisation de la constellation Galileo. Le voyage continuera avec l'atlas de l'anthropocène de l'IGN pour se rendre ensuite en Antarctique et localiser les manchots. La rubrique relative au patrimoine visitera le marégraphe de Marseille et les musées marocains. Finalement, vous apprendrez la remontée sur corde pour aller poser vos cibles. Nos fidèles rubriques les arts et la géométrie et les ouvrages concluront votre lecture.

À l'heure où nous mettons sous presse, le forum 2022 au lycée des métiers Gaudier-Brzeska à Saint-Jean-de-Braye est juste terminé. Il fera l'objet d'une restitution dans le prochain numéro. Nous souhaitons ici remercier pour leur fidélité nos partenaires présents lors de nos forums ainsi qu'au détour de nos pages, par annonces interposées.

Pour terminer, le conseil de l'AFT ainsi que la rédaction d'XYZ vous souhaitent, chers adhérents et chers lecteurs, une très bonne année 2023, personnelle autant que professionnelle.

Bernard Flacelière, vice-président et rédacteur en chef.

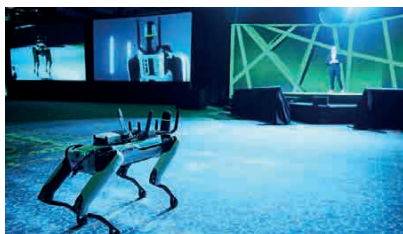
## ■ Le conseil national de l'information géographique rebaptisé en conseil national de l'information géolocalisée (CNIG)



Cette évolution permet au CNIG de s'intéresser à toute donnée contenant une composante localisée (position géographique, identifiant de commune, adresse figurant sur la base adresse nationale...), champ plus vaste que la seule description topographique du territoire. Une donnée qui comporte une composante géolocalisée respectant des standards et des règles communes voit sa valeur fortement accrue en termes de qualité, d'usage et d'opérabilité. C'est l'un des rôles du CNIG que de définir ces standards et règles communes.

► **Plus d'informations :** <https://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2022/09/Communiqu%C3%A9-de-presse-d%C3%A9cret-CNIG-1-sept-2022-V-CNIG.pdf>

## ■ Un voyage dans la nouvelle réalité



Dans quelle direction va l'industrie géospatiale ? Sur quelles activités principales les entreprises se concentreront-elles ? Comment les avancées technologiques en progression rapide, façonneront-elles l'avenir ? La récente édition de HxGN Live Global à Las Vegas a constitué une plaque tournante importante pour les professionnels qui souhaitaient avoir une image claire de ce qui nous attend dans le domaine de la cartographie et de l'arpentage – et aussi, comme cela est devenu évident lors de l'évènement, de plus en plus en dehors de celui-ci.

► **Plus d'informations :** <https://www.gim-international.com/content/article/a-journey-into-the-new-reality>

## ■ Habiter une planète qui se réchauffe : abécédaire de la transition de la construction et des matériaux

Face au réchauffement climatique et à l'urbanisation galopante, faut-il développer des bureaux et habitations à haute efficacité énergétique et technologies intelligentes, intégrant climatisation et végétalisation, retourner à des matériaux traditionnels comme la terre, décarbonée et locale, ou les deux ? Abécédaire...

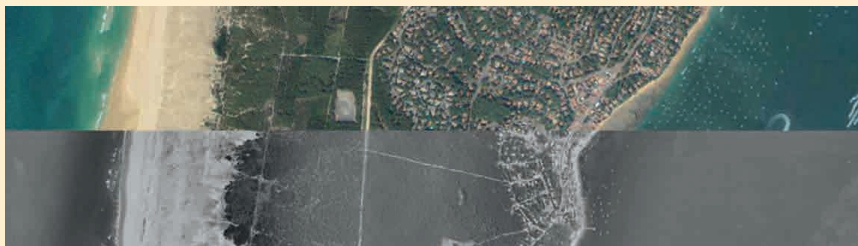
► **Plus d'informations :** [https://batinfo.com/actualite/habiter-une-planete-qui-se-rechauffe-abecedaire-de-la-transition-de-la-construction-et-des-materiaux\\_22223](https://batinfo.com/actualite/habiter-une-planete-qui-se-rechauffe-abecedaire-de-la-transition-de-la-construction-et-des-materiaux_22223)



## ■ Embarquez dans notre machine à remonter le temps

Vous avez toujours rêvé de voyager dans le temps ? C'est ce que vous propose l'IGN... vu du ciel. Grâce à *Remonter le temps*, découvrez et observez les transformations de votre quartier ou de n'importe quel territoire français au cours des dernières décennies, voire des derniers siècles, à l'aide de nos cartes et photographies aériennes.

► **Plus d'informations :** <https://www.ign.fr/reperes/embarquez-dans-notre-machine-remonter-le-temps>



## ■ Paroles de géomètre : 5 raisons de se lancer dans la numérisation laser 3D et comment démarrer

La technologie de numérisation laser 3D permet de capturer précisément des millions de points de données 3D en quelques minutes. Ces points de données combinés, les nuages de points fournissent un compte-rendu numérique complet, clair et précis : le "jumeau numérique". En disposant d'un jumeau numérique fondé sur des données exactes, il est possible de mesurer tout ce que l'œil voit et ne voit pas, mais aussi de visualiser les données de diverses manières.

► **Plus d'informations :** <https://leica-geosystems.com/fr-fr/industries/pure-surveying/expert-insights/five-reasons-to-get-into-laser-scanning-and-how-to-get-started>



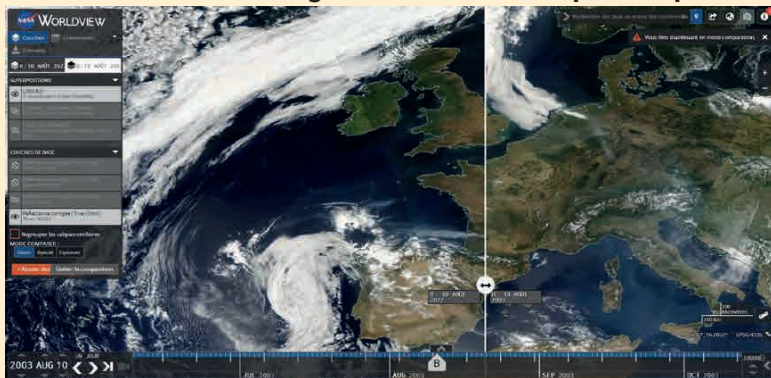
## ■ Tout ce que vous devez savoir sur la façon dont le drone LiDAR révolutionne la cartographie et les données géospatiales

Les drones équipés de caméras offrent aux entreprises une paire d'yeux supplémentaire dans le ciel, offrant une nouvelle perspective sur les opérations qui se déroulent au sol. Dans des secteurs aussi variés que la construction, les services d'urgence, l'agriculture et les services publics, les drones ajoutent de la valeur.

► Plus d'informations : <https://enterprise-insights.dji.com/blog/lidar-equipped-uavs>



## ■ Un site de la NASA pour comparer les images satellite d'une zone du globe à deux dates quelconques

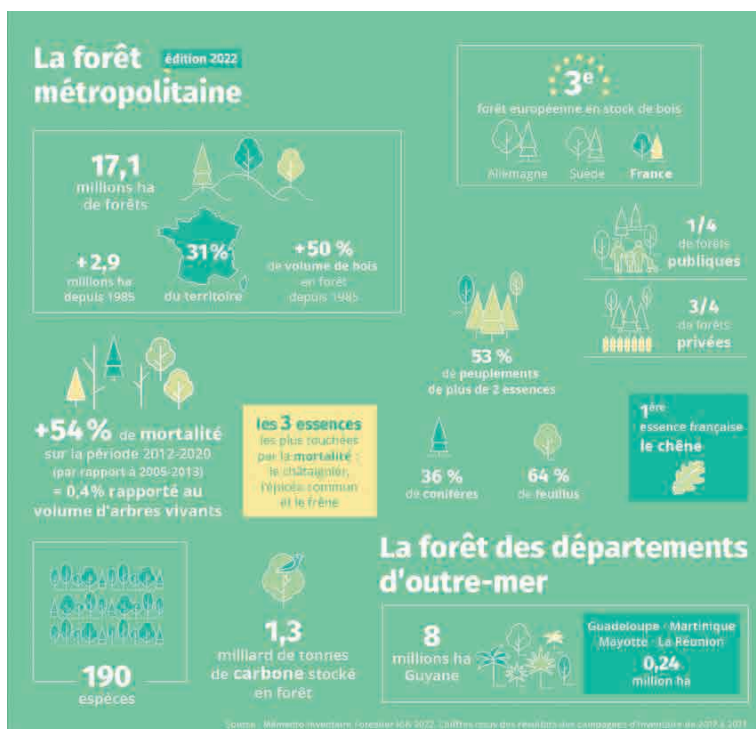


► Plus d'informations : <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

## ■ La forêt en France : portrait-robot

Près d'un tiers du territoire métropolitain est couvert de forêt. Ce patrimoine d'une grande diversité biologique place la France quatrième dans le classement des États européens les plus boisés. Mais que sait-on vraiment de l'état de nos forêts ? Et comment produit-on les données de référence à leur sujet ? Entrez dans les coulisses des statistiques forestières...

► Plus d'informations : <https://www.ign.fr/reperes/la-foret-en-france-portrait-robot>



## ■ FARO acquiert le pionnier de la cartographie mobile : GeoSLAM

FARO a annoncé l'acquisition de l'un des leaders mondiaux du marché de la numérisation mobile : GeoSLAM. Avec un logiciel propriétaire de localisation et de cartographie simultanées à haute productivité (SLAM) pour créer des modèles 3D à utiliser dans des applications de jumeau numérique, l'ajout de GeoSLAM placera FARO dans une excellente position pour étendre et accélérer considérablement les opportunités de croissance du marché dans l'espace de numérisation mobile.

► Plus d'informations : <https://www.gim-international.com/content/news/faro-acquires-mobile-mapping-pioneer-geoslam>



## ■ Intégrité : Pouvez-vous vraiment faire confiance à votre position GPS ?



Un vignoble français dans la vallée de la Loire est une belle vue, mais la ferme a du mal à recruter des ouvriers pour désherber ses raisins issus de l'agriculture biologique. La jeune génération s'est déplacée vers les villes, laissant les communautés urbaines à court de main-d'œuvre. Solution : un tracteur entièrement autonome, développé par une société française basée à Sitia, travaillant sans relâche pour désherber les rangs étroits entre les vignes.

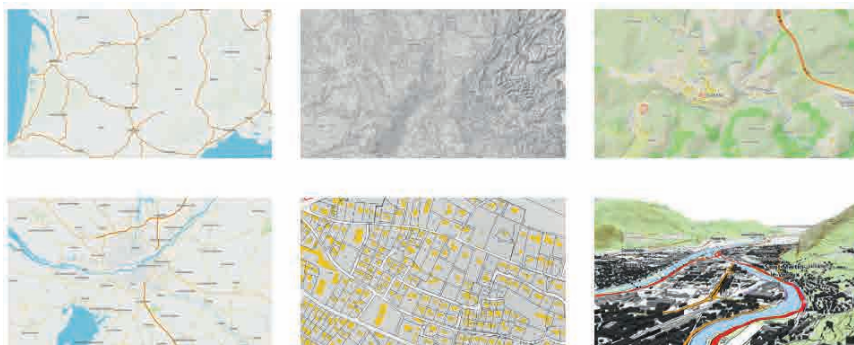
► Plus d'informations : <https://www.septentrio.com/en/learn-more/insights/integrity-can-you-really-trust-your-gps-position>



## ■ SOGEFI met ses APIs au service des professionnels du foncier

Plus besoin d'être expert des données pour avoir des solutions riches en informations géographiques ! SOGEFI met à disposition ses APIs pour enrichir les solutions des professionnels du foncier. Grâce à une simple requête, les APIs questionnées renvoient immédiatement des informations à jour et complètes.

► Plus d'informations : <https://www.sogefi-sig.com/geoservices-apis-wms/>



## Agenda des manifestations 2023

- Du 17 au 19 janvier 2023, 50<sup>e</sup> congrès ATEC ITS France, transports, environnement, circulation, Paris, beffroi de Montrouge  
<https://congres.atec-its-france.com/>
- Du 14 au 16 mars, Colloque merIGéo, la géomatique appliquée au milieu marin, au Havre - <https://www.merigeo.fr/>
- Les 5 et 6 avril, BIM World, Paris Expo, porte de Versailles - <https://bim-w.com/>
- Le 13 avril, Forum de l'AFT, INSA Strasbourg - <https://www.aftopo.org/>
- Du 28 mai au 1<sup>er</sup> juin, FIG Working Week, Orlando, Floride, USA - <https://www.fig.net/fig2023/index.htm>
- Du 5 au 9 juin, Spatial Analysis and GEOmatics 2023, Québec, Canada et hybride - <https://crdig.ulaval.ca/SAGEO2023/>

## COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

**BOSSER Pierre**, professeur associé,  
ENSTA Bretagne, Brest

**BOTTON Serge**,  
ingénieur, ENSG, Marne-la-Vallée

**CLÉDAT Emmanuel**, enseignant-chercheur,  
ENSG, Marne-la-Vallée

**DURAND Stéphane**  
maître de conférences, ESGT, Le Mans

**HULLO Jean-François**,  
dr. ingénieur, EDF, Paris

**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. ingénieur géomètre, EDF, Grenoble

**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 sommaire*.

Alain Coulomb

## Le marégraphe de Marseille

De la détermination de l'origine des altitudes  
au suivi des changements climatiques  
130 ans d'observation  
du niveau de la mer



## COMMANDEZ "LE MARÉGRAPHE" au prix de 85,50 €

640 pages, 400 illustrations  
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 francophone 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](http://www.aftopo.org)

## Robert Chevalier 15 janvier 1931 - 17 août 2022

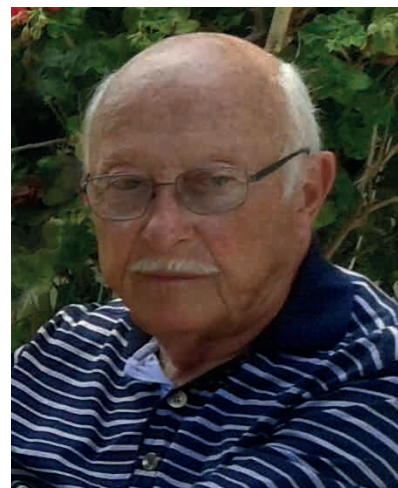
**U**n acteur de l'AFT vient de disparaître dans sa quatre-vingt-douzième année. L'association doit beaucoup à Robert Chevalier, d'autant qu'il en a longuement porté deux fonctions vitales, à savoir la recherche des recettes de publicité d'une part, et celle de rédacteur en chef d'XYZ, d'autre part. Il a été pendant dix ans, de 1993 à 2003, un démarcheur téléphonique assidu, persuasif et efficace auprès des entreprises de la topographie afin de placer des encarts publicitaires pour XYZ. C'était alors la deuxième ressource de l'AFT. De même, il a piloté le comité de rédaction de 1996 à 2000, Jack Biquand s'en souvient :

*"J'étais son équipier en ce temps historique où XYZ était "fait-main" avec ciseaux et papiers découpés. Sans arrêt sur le métier il remettait l'ouvrage pour le perfectionner, œuvrant en tous sens pour compléter où exploiter une information. J'ai souvenir de sa ténacité peu commune pour une précision (due au métier sans doute) et tenir en temps et heure une parution "à bout de bras", jamais lassé, toujours efficace. Les parutions de cette époque lui doivent beaucoup. Un vrai modèle de travail, en plus d'un collègue agréable et sympathique sur qui l'on pouvait toujours compter. Je suis triste, salut Robert !"*

Né en 1931, Robert Chevalier a obtenu son diplôme du gouvernement de géomètre-expert foncier le 22 octobre 1954. Depuis, sa principale occupation professionnelle a été au service de la société TRANSEL dont l'activité est centrée sur la construction de réseaux électriques et de télécommunications. Chargé de relevés topographiques et d'implantation de réseaux, s'est qualifié lui-même de "lignard". Les lecteurs d'XYZ n'ont pas tous oublié ses nombreuses contributions aux rubriques "Carnet de voyage" ou "Topo vécue", comme *"Mais où donc est passée la borne"* ou encore *"Un sacré bout de boa"*, dans lesquelles il restituait avec humour et un peu de dérision ses missions africaines.

Passionné par les voyages, les déplacements professionnels ne lui suffisaient pas et, chaque année, plutôt deux fois qu'une, il parcourait le monde. Cela peut expliquer son goût pour les trains électriques miniatures et son grand intérêt pour les automobiles.

Comme de nombreux géomètres-experts qui ne sont pas installés, il s'est rapproché de l'AFT pour maintenir des contacts professionnels et trouver, au moyen de la revue et de ses publications, un cadre de formation permanente. Cela l'a conduit à adhérer, puis à siéger au conseil de l'association durant presque trois mandats, de 1992



à 2008. Au-delà de ses fonctions de membre très actif, il a aidé au recrutement d'Évelyne Mesnis en tant que permanente (1999/2007) et proposé, en 2001, de retenir le concours de Dorothee Picard et son équipement informatique comme maquettiste, une façon d'en finir définitivement avec le papier, la colle et les ciseaux. Il fallait changer de siècle. Appréciée, cette collaboration avec Dorothee qui dure depuis vingt-trois ans rappelle cette proposition judicieuse de Robert Chevalier.

L'AFT et XYZ gardent le souvenir attristé de Robert Chevalier. Elles adressent leurs sincères condoléances à son épouse Jacqueline, à son fils Éric et à ses trois petits-fils. ●

### Olivier Reis

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

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

### Reinhard Stölzel

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

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

**Des topographes traducteurs d'expérience à votre service**

# Le XXVII<sup>e</sup> congrès de la FIG à Varsovie du 11 au 15 septembre 2022

■ Bernard FLACELIÈRE

*La Fédération internationale des géomètres, comme de nombreuses autres organisations, a traversé les années COVID en s'adaptant. Des rendez-vous ont été décalés, Accra au Ghana passant de 2021 à 2024, le Cap en Afrique du Sud passant de 2022 à 2026, voire transformé en réunion virtuelle, comme celui des Pays-Bas en 2021. Lors de cette dernière semaine professionnelle virtuelle néerlandaise, l'Association des topographes polonais (SGP Stowarzyszenie Geodetów Polskich) a accepté au pied levé de remplacer l'Afrique du Sud avec seulement une année pleine de préparation. Le défi a été gagné avec la tenue à Varsovie de ce 27<sup>e</sup> congrès sur le thème "Volunteering for the Future – Geospatial Excellence for a Better Living" autrement dit "Soyons volontaires pour l'avenir, l'excellence géospatiale pour une vie meilleure". Le congrès a été hébergé au DoubleTree by Hilton Hotel & Conference Centre Warsaw assez excentré, mais de taille raisonnable.*

## Un aperçu du congrès et des actes des conférences

Le lecteur trouvera le rapport du congrès à l'adresse suivante :

[https://www.fig.net/news/news\\_2022/10\\_congress\\_report.asp](https://www.fig.net/news/news_2022/10_congress_report.asp)

Les actes sont accessibles sous le lien suivant :

[https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2022/techprog.htm](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2022/techprog.htm)

Parmi ceux-ci, ont été plus particulièrement suivies par le rédacteur, les sessions :

- TS01C: *Providing a Reference Frame for Geospatial Products ;*
- TS02C: *Photogrammetry and UAV in Engineering Surveying ;*
- TS04G: *Efficient GNSS Integration with Other Sensors ;*
- TS05D: *History Session ;*
- TS06G: *Providing Vertical Control for Hydrographers, Coastal Managers and other Disciplines ;*
- les francophones TS07E: *French Session 1* et TS08E: *French Session 2* ont, bien sûr, fait le plein d'auditeurs.

## Le 52<sup>e</sup> parallèle et le monument de la géodésie européenne

La ville de Varsovie a pris des dispositions pour restaurer le pilier géodésique appartenant à la chaîne de triangulation du parallèle 52° N dans le centre de la ville de Varsovie et le transformer en monument de la géodésie européenne (figure 1). Ce monument restauré a été inauguré le mercredi 14 septembre avec des représentants de la ville de Varsovie et de l'association nationale, la SGP. La FIG était représentée par son président honoraire, Stig Enemark et le représentant de sa section Histoire, John Brock. La cheville ouvrière de cet événement, Mariusz Meus, géomètre topographe, vulgarisateur scientifique et contributeur

## Impressions de congressiste

Certes, tous les professionnels ne sont pas au rendez-vous : la peur de s'engager dans cette période politiquement troublée, la proximité des marches orientales de l'Europe secouées par les bruits de bottes, les visas Schengen non accordés pour certains citoyens, africains surtout.

Cependant, les présents se sont retrouvés avec bonheur après ces années successives de visioconférences. Quel plaisir d'échanger à nouveau les nouvelles du monde de la profession.

La participation a donc été moindre que celle des années fastes : le nombre total de participants a été de 1 021 dont 815 étaient sur site à Varsovie, les autres en visioconférence, alors qu'un congrès habituel compte environ 2 000 participants. Il est clair, dit Louise Friis-Hansen, directrice de la FIG, "que la plupart des participants sont Européens, alors que des Américains et les Asiatiques manquent à l'appel, sans parler des Africains handicapés par les problèmes de visa. Le nombre de pays présents était cependant de 82".

Vingt sociétés seulement exposaient, les trois stands de la FIG, FIG WW Orlando 2023 et FIG WW Accra 2024 devant être ajoutés.

## Les élections de deux vice-présidents et du président

À chaque congrès, les élections animent l'agenda et apportent une touche de suspense. Cette année, la méthode du vote en ligne a été appliquée, un produit de la société canadienne *Simplyvoting*. C'est donc la fin des enveloppes et du passage physique devant l'urne. Le représentant de l'association membre de la FIG reçoit un courriel d'instructions avec la durée du vote, en général plus de 12 heures et un lien de connexion. Les élections de deux vice-présidents ont été des luttes homériques. Nous partons des quatre candidats : Daniel Steudler, Suisse, QinYan, Chine, Winnie Shiu, USA et Brian Davies, Canada, pour arriver, au bout de quatre rounds, aux vainqueurs. Daniel Steudler et Winnie Shiu sont élus.

Deux rounds ont été nécessaires pour départager les candidats à la présidence 2023-2026, Diane Dumashie, Royaume-Uni, Orhan Ercan, Turquie et Abbas Rajabifard, Australie.

Diane Dumashie l'a finalement remporté contre Orhan Ercan avec le score serré de 51,7 % des voix.

L'AFT regrettera la présidence de Rudolf Staiger, de 2018 à 2022, lui qui était si à l'écoute du monde francophone.

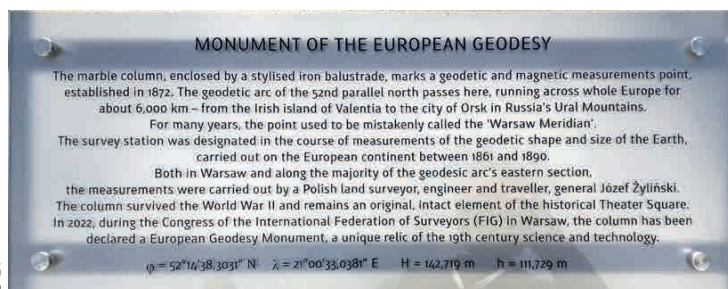


Figure 1. Plaque explicative du monument de la géodésie européenne.



Figure 2. Inauguration du monument de la géodésie européenne.

à XYZ<sup>1</sup>, était évidemment présent avec le rédacteur en chef de XYZ.

## Monument de la géodésie européenne (traduction de la figure 1)

Le pilier de marbre, entouré d'une balustrade en fer stylisée, matérialise un point de mesures géodésiques et magnétiques et a été établi en 1872. L'arc géodésique du 52<sup>e</sup> parallèle nord passe ici, traversant toute l'Europe sur environ 6 000 km, de l'île irlandaise de Valentia à la ville d'Orsk dans les montagnes russes de l'Oural. Pendant de nombreuses années, le point a été appelé à tort le "méridien de Varsovie". La station de triangulation a été créée au cours de mesures géodésiques de la forme et de la taille de la Terre, effectuées sur le continent européen entre 1861 et 1890. Tant à Varsovie que le long de la majeure partie de la section orientale de l'arc géodésique, les mesures ont été effectuées par un géomètre, ingénieur et voyageur polonais, le général Józef Żyliński. La colonne a survécu à la Seconde Guerre mondiale et reste un élément original et intact de l'historique place du théâtre. En 2022, lors du congrès de la Fédération internationale des géomètres (FIG) à Varsovie, la colonne a été déclarée monument européen de la géodésie, vestige unique de la science et de la technologie du XIX<sup>e</sup> siècle (figure 2).

## La FIG WW 2028 à Paris

La FIG (Fédération internationale des géomètres) a été fondée par les Allemands, Belges, Britanniques,

Espagnols, Français, Italiens et Suisses le 18 juillet 1878 à Paris. Le 150<sup>e</sup> anniversaire sera donc fêté en 2028. Quoi de plus naturel que d'envisager cet anniversaire à Paris, sur les lieux mêmes de la fondation ?

La première assemblée générale tenue en ligne le 4 septembre 2022 a proposé aux membres connectés la candidature des membres français, l'Ordre des géomètres-experts et l'Association francophone de topographie. Une vidéo de plus de deux minutes animée par Joseph Pascual, président du Conseil supérieur de l'Ordre des géomètres-experts, a été suivie par 12 diasscopes. La deuxième assemblée générale du 11 septembre a dévoilé, entre autres, les résultats des votes relatifs à l'organisation de la FIG WW 2028. Par 71 votes pour, un vote contre et une abstention, la proposition donnant au conseil de la FIG le pouvoir de choisir la destination de l'année anniversaire 2028 est adoptée. Par la suite, le choix de Paris pour la FIG WW 2028 est validé. Les professionnels français sont donc encouragés à planifier cet événement dans leur calendrier et soutenir l'action des membres organisateurs, l'OGE et l'AFT. Rendez-vous en 2018 à Paris (figure 3) !

## Les autres rendez-vous de la FIG

Voici l'agenda des prochaines années, en attendant Paris en 2028 :

- FIG Working Week 2023, Orlando, Florida, USA du 28 mai au 1<sup>er</sup> juin, l'hôte est la *National Society of Professional Surveyors* (NSPS) ;
- FIG Working Week 2024, Accra, Ghana en mai, les hôtes sont les *Ghana Institution of Surveyors* (GhIS) & *Licensed Surveyors Association of Ghana* (LiSAG) ;

- FIG Working Week 2025, Brisbane, Australia du 1<sup>er</sup> au 5 juin, l'hôte est le *Surveying & Spatial Sciences Institute* (SSSI) ;
- FIG Congress 2026, Cape Town, South Africa ;
- l'appel à candidatures vient d'être lancé pour 2027.

## En guise de conclusion

Voici un extrait de la FIG en bref, tiré du site Internet, qui résume l'intérêt d'une telle organisation internationale.

La topographie est une profession moderne qui agit dans le monde entier en faveur d'une meilleure infrastructure pour notre société et notre planète Terre. La Fédération internationale des géomètres (FIG) souhaite conserver, voire améliorer, son rôle de première organisation non gouvernementale qui représente les intérêts des géomètres topographes du monde entier.

... La FIG coopère étroitement avec les organes compétents des Nations Unies, de la Banque mondiale et de ses associations sœurs. Elle est reconnue mondialement comme la principale organisation internationale non gouvernementale en matière d'information géospatiale et de gestion de l'environnement "terrestre", "maritime" et "bâti". Les géomètres ont pour mission de déterminer la taille et la forme de la terre, de cartographier sa surface et de la gérer de manière durable... ●



Figure 3. Rendez-vous à Paris en 2028.

<sup>1</sup> XYZ n° 167, pp. 10 à 15, "L'honorable méridien de Cracovie, comment la géodésie est popularisée en Pologne".



## Retour sur les Journées de la topographie 2022

Après deux années perturbées par la crise sanitaire, les Journées de la topographie (JDT) étaient de retour, entièrement en présentiel, à l'INSA Strasbourg. Elles se sont déroulées du 21 au 23 septembre 2022 : retour sur cette 19<sup>e</sup> édition des JDT.

### Soutenances des Projets de fin d'études (PFE) des étudiants

La 19<sup>e</sup> édition des JDT a mis en avant les soutenances des PFE, dernière étape d'un parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie. Pendant les trois journées, 32 étudiants ont soutenu leur projet devant un public composé d'étudiants, de membres de leur famille et de professionnels. Retrouvez les vidéos de synthèse des PFE réalisées par les étudiants en scannant le QR code ci-contre.



### Un salon des exposants de retour à l'INSA

Le salon des exposants a fait son grand retour dans les locaux de l'INSA après deux années d'absence (figure 1). Il a accueilli, cette année, 22 entreprises et deux invités d'honneur : l'Associa-

tion francophone de topographie et l'Ordre des géomètres-experts, fidèles partenaires des JDT. Le salon des exposants constitue un lieu d'échanges privilégié entre les professionnels et les étudiants. Les étudiants, qu'ils soient au début de leur cursus ou aux portes de la vie active, ont pu profiter de cet événement pour découvrir la pluralité des activités en topographie et les nombreuses offres d'emploi proposées par les entreprises. Un grand merci aux entreprises participantes : Abot, Capture4Cad, Ecartip Groupe Fondasol, ESRI France, FARO, Geofit Group, Geolux 3.14, Geosat, Geotopo, Groupe Parera, JSInfo, Leica Geosystems, Mire SAS, Opsia, Positics, Sitech France, Sites, Sixsense, Sogelink, Spie batignolles valérian, Teria et Topocenter.

### Une conférence sur le thème "Open data et topographie"

Cette année, la conférence avait pour thème "Open data et topographie : des



Figure 2. Conférence sur le thème "Open data et topographie".

données géographiques accessibles à tous !". Que ce soit en topographie ou dans d'autres domaines, l'ouverture et la mise à disposition des données produites et collectées, notamment par des services publics, se développent ces dernières années. Des experts ont présenté, lors de la conférence des JDT 2022, les données ouvertes à disposition des topographes et des cas d'usages de ces données. Les supports de présentation sont disponibles sur le blog de la topographie de l'INSA.

À l'échelle de la collectivité, Luc Fromm, responsable du département Atelier de géomatique, Ville et Eurométropole de Strasbourg, a présenté la plateforme de mise à disposition de données géographiques proposée par la ville



Figure 1. Salon des exposants des Journées de la topographie 2022.

de Strasbourg (figure 2). À l'échelle nationale, Terry Moreau, consultant cartographique à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a expliqué quelles données sont mises à disposition par l'IGN et a présenté la campagne de mesures LiDAR HD en cours. Enfin, Maximilien Brossard, directeur et cofondateur de URBS, a présenté un outil qui exploite des données géographiques ouvertes dans le cadre des transitions énergétique, climatique et sociale des territoires.

## À bientôt pour une nouvelle édition des JDT

Le comité d'organisation des Journées de la topographie souhaite remercier l'ensemble des participant·e·s, des diplômé·e·s, des professionnel·le·s et de l'équipe enseignante ayant participé de près ou de loin à ces journées. Un merci particulier aux entreprises, aux directeur·trices de PFE, aux président·e·s de jurys, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de l'INSA impliqué dans le bon déroulement de ces Journées de la topographie. Nous vous donnons rendez-vous l'année prochaine pour une nouvelle édition des JDT, tout en félicitant les nouveaux



Figure 3. Félicitations aux étudiantes et étudiants diplômés !

diplômés (figure 3) ! ●

**Pour ne rater aucune information sur la prochaine édition des Journées de la topographie, 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>

**L'équipe organisatrice des Journées de la topographie** [jdt2022@insa-strasbourg.fr](mailto:jdt2022@insa-strasbourg.fr) et [helene.macher@insa-strasbourg.fr](mailto:helene.macher@insa-strasbourg.fr)

# Geodatadays 2022



Figure 1. Dans le grand amph.

*La 5<sup>e</sup> édition des journées nationales géonumériques de l'Afigéo et Décryptagéo s'est déroulée les 14 et 15 septembre 2022 au palais des congrès de Poitiers (figure 1) situé à deux pas du fameux Futuroscope.*

L'évènement a eu un succès remarquable avec plus de 1 000 participants, 80 conférenciers et 70 exposants. L'AFT disposait d'un espace de présentation au sein du village des associations.

Articulés en grands thèmes, grands défis et ateliers, les débats et présentations ont abordé de nombreux sujets dans des domaines divers et variés.

De grands débats ont porté sur l'importance d'une donnée géolocalisée fiable dans des sujets d'actualité comme les risques sanitaires, la défense et sécurité, le changement climatique, les espaces maritimes et côtiers, en donnant la parole aussi bien à des experts, des politiques qu'à des blogueurs.

Les ateliers ont permis de faire le point sur les nouveautés dans l'acquisition et la gestion des données, en mettant l'accent sur la mise à disposition des données de référence en *open data* et sur les modèles collaboratifs, tout en soulignant la nécessaire coordination régionale ou nationale (occupation du sol à grande échelle, PCRS). Une place particulière a été réservée à l'imagerie spatiale, qui avec la résolution inframétrique de Pléiades, ouvre de nouveaux horizons.

Avec l'arrivée dans la production de la 3D et des jumeaux numériques ou de l'intelligence artificielle dans les traitements des données, on a pu constater que la science-fiction d'hier rejoignait la réalité d'aujourd'hui.

Enfin, les exposants ont eu l'opportunité d'organiser des sessions de démo.

Organisées en simultané, toutes ces présentations de grand intérêt ont fait regretter de ne pas avoir le don d'ubiquité. Heureusement, en allant sur le site de l'évènement <https://www.geodatadays.fr/ressources>, on pourra revivre les débats en vidéo et consulter les présentations. Vous pourrez aussi retrouver certaines présentations sous forme d'articles dans les prochaines revues XYZ.

Un tel évènement est aussi l'occasion de discuter et d'échanger entre participants, chacun s'enrichissant de la connaissance de l'autre, et de nouer des collaborations.

Cerise sur le gâteau, les participants ont pu profiter de trois attractions du Futuroscope (figure 2). ●

Françoise Duquenne



Figure 2. En direction du Futuroscope.

## Le 46<sup>e</sup> Congrès des géomètres-experts lance le projet transformatif "géomètre-expert 2030"

■ Tania LANDES

*Cette année, le 46<sup>e</sup> Congrès des géomètres-experts s'est tenu en la ville du Havre, du 13 au 15 septembre 2022 sur la thématique : "Une profession face aux défis de la société" (figure 1).*

*En dehors des séances plénières, les géomètres pouvaient déambuler dans la salle d'exposition, qui comptait une trentaine de stands de matériels et de solutions logicielles (figure 2). Dans une ambiance survoltée par moments, du fait de la présence d'un DJ (Vinz Olsen), les participants au congrès se sont laissés prendre au jeu. Le DJ a su chauffer la salle avant de laisser place à des prises de parole tout aussi enthousiasmantes.*

Le thème du congrès fut cette année "la profession face aux défis de la société". Des séances avec des intervenants de divers horizons ont débattu, par exemple, de la question de "réinventer la performance", "performer au quotidien", comment s'engager dans une démarche RSE, quelles solutions adopter pour évaluer la qualité de la prestation par retour de l'expérience client, etc.

Pour inclure les spectateurs au débat, l'animatrice du congrès, Sophie Gastrin, invitait les géomètres-experts à répondre à des Quizz en direct, via une application spécifique. Certaines personnalités ont été invitées à témoigner de leur parcours et de leur position face aux enjeux sociétaux auxquels les entreprises devront faire face.

Claudie Haigneré, astronaute et ambassadrice auprès du directeur de l'Agence



Figure 1. Le lieu du congrès, Le Havre.

spatiale européenne, a su transporter l'assemblée dans ses souvenirs de l'époque. Elle aura été la première spationaute française à voler à bord de la Station spatiale internationale (ISS). Durant son allocution, elle a su prendre de la hauteur tout en nous faisant partager son sentiment d'être peu de choses face à la belle planète bleue qu'elle aimait admirer à travers

le hublot de l'ISS. Ensuite, l'intervention de Yannick Roudaut, essayiste, prospectiviste en économie soutenable, qui a su captiver la salle en nous plaçant face à nos responsabilités et en soulignant le changement indispensable d'attitude que chacun-e de nous devra adopter dans notre futur proche pour répondre aux enjeux du changement climatique. L'effet du réchauffement climatique qui entraîne avec lui la disparition de tas d'espèces est inéluctable et irréversible. Toutefois, Yannick Roudaut a confiance en la science et en l'être humain, et surtout en ses capacités à rebondir et à trouver des solutions.



Figure 2. Les exposants sont venus en grand nombre.



Figure 3. La salle de conférences avec DJ.



Figure 4. Les étudiant·e·s partagent leur vision de l'entreprise du futur.

Un temps de parole a également été donné aux étudiant·e·s des trois écoles d'ingénieur en France formant au métier de géomètre-expert, l'INSA Strasbourg, l'ESGT et l'ESTP, ainsi que des géomètres-experts stagiaires. Pour rebondir sur les propos de Yannick Roudaux, Juliette Brochier, étudiante ingénieure en 4<sup>e</sup> année à l'INSA Strasbourg a insisté, le cœur lourd, sur le fait qu'il faut réagir tout de suite à ce défi climatique, en tant que future ingénieure et peut-être cheffe d'entreprise. *"Il faut repenser notre modèle économique et remettre en question le modèle dans lequel nous vivons aujourd'hui."* ajoute-t-elle (figure 4). Les étudiants et jeunes stagiaires ont également partagé leur vision de l'avenir, ainsi que leurs attentes vis-à-vis de l'entreprise dans laquelle ils souhaitent s'engager une fois diplômés.

Lors de son discours de clôture, Joseph Pascual a cité les quatre valeurs constituant le socle des valeurs partagées, à savoir l'éthique, la transparence, la responsabilité, l'engagement. Pour l'Ordre, cette vision consiste à promouvoir le GE comme acteur incontournable de l'aménagement des territoires et du cadre de vie, à l'accompagner dans la transition numérique et conforter son haut niveau d'expertise de la mesure et du foncier au service de tous. Le président a également officialisé le

lancement par l'Ordre de son propre label RSE (responsabilité sociétale des entreprises) et sa volonté de rénover l'institution en la dotant de missions sociétales et environnementales.

*"Nous avons toutes les raisons de croire en l'avenir"* a plusieurs fois martelé Joseph Pascual. Pour illustrer le propos, il a évoqué le fait que l'actualité juridique du mois de juin dernier était venue mettre un terme à plusieurs années de contestation de l'étendue de notre monopole. En effet, le 28 juin dernier, la Cour de cassation a rendu un arrêt mentionnant que les plans annexés aux actes de copropriétés ne pouvaient être l'œuvre que d'un GE, en ce qu'il délimite les droits fonciers. À défaut, il est inopposable. L'arrêté de la Cour de cassation, conformément aux dispositions de la loi du 7 mai 1946, a ainsi rappelé que les actes de délimitation des biens fonciers, pour être opposables, devront être réalisés par une profession réglementée et contrôlée. Il ajoute qu'*"il en va de la protection des droits des propriétaires. Cette garantie est d'autant plus importante que nous rentrons dans une période instable du point de vue économique"*.

*"Nous avons toutes les raisons de croire en notre avenir"*. Cette fois, cette affirmation faisait référence au

grand projet, au destin commun, celui de faire des dix prochaines années une opportunité en portant haut leur projet transformatif "géomètre-expert 2030".

Joseph Pascual a également mentionné qu'il envisageait de réformer les voies d'accès à la profession, pour attirer toujours plus de talents aux profils diversifiés. L'Ordre compte développer des parcours d'accès à la profession par la voie académique et par la voie professionnalisante qui intégrera la validation des acquis de l'expérience (VAE) en proposant des compléments de formation adaptés à chaque candidat, en fonction de son cursus et de son parcours professionnel. Cette refonte s'appuie sur la création d'un nouveau diplôme d'état de géomètre-expert et sur la mise en place d'un centre de formation des géomètres-experts, qui fonctionnera comme un centre de ressources et d'ingénierie pédagogique chargé de concevoir et de réaliser des supports pédagogiques, de dispenser de la formation durant les périodes de pratique professionnelle et de préparer à la diplomation.

La commission de la formation à l'OGE a présenté un rapport de préconisation sur la mise en œuvre opérationnelle de la refonte des parcours d'accès à la profession de géomètre-expert. Joseph Pascual nous a partagé son impatience à ce que la réforme aboutisse, même si elle bousculera les textes régissant l'exercice de la profession, et notamment, la loi fondatrice de 1946. ●



Figure 5. Le discours de clôture du président de l'OGE, Joseph Pascual.

## Retour sur la 18<sup>e</sup> édition du Cercle Géo à l'ESGT

*En tant qu'organisateur du Cercle Géo, nous sommes très fiers d'avoir pu rassembler dans notre école un grand nombre d'acteurs qui forment aujourd'hui les métiers de la topographie et de l'expertise de la mesure.*

Lors de cette journée, nous avons accueilli trente-deux entreprises venues de toute la France. Il s'agissait de cabinets de géomètres à différentes échelles, de constructeurs et d'autres entreprises comme EDF ou encore l'IGN (figure 1). Ce nombre important d'enseignes nous a offert une grande pluridisciplinarité, et c'est ce que nous recherchions. Cela a permis d'aborder notamment le thème de l'imagerie 3D, autour duquel nous avons orienté la journée. En parallèle, six institutions ont également accepté d'être partenaires du Cercle Géo, à savoir l'Ordre des géomètres-experts, l'UIESGT, la SFPT, la CSNGT, l'UNGE et bien évidemment l'AFT.

Cette journée destinée aux étudiants a permis de rassembler pas moins de 250 futurs géomètres topographes dans les locaux de l'ESGT le jeudi 13 octobre 2022, dont dix-sept étudiants de l'INSA Strasbourg que nous avons invités. Allant de la première année du cycle préparatoire à la dernière année du cycle ingénieur, sans oublier les formations de Master et Licence professionnelle, certains étudiants sont venus avec un objectif précis : chercher un stage ou un sujet de TFE (Travail de fin d'études). À cause des contingences sanitaires, la dernière édition du Cercle Géo avait eu lieu en 2018 et nous avons jugé qu'il

était primordial de remettre cette journée dans nos agendas. Celle-ci n'est pas qu'un simple événement professionnel destiné aux étudiants, c'est un moment convivial de découvertes et d'échanges qui font vivre les métiers de la topographie que nous occuperons dans un futur proche. C'est également un moment de retrouvailles avec d'anciens élèves, qui sont désormais dans le monde professionnel. Ce maintien des liens avec les générations supérieures est très fort pour nous, c'est en partie ce qui nous forge et nous guide dans nos projets professionnels.

Afin de rendre cette journée plus marquante, nous avons justement repensé le format du Cercle Géo. La matinée était consacrée à des conférences en amphithéâtre. Elles étaient animées à tour de rôle par quelques entreprises et institutions (figure 2). Nous avons coupé la journée par un déjeuner convivial à l'extérieur, préparé par un *foodtruck*. Durant l'après-midi, il y avait trois espaces différents accessibles à tous. Un premier dans une grande salle, spécialement conçue pour du *stage dating*, où les étudiants pouvaient rencontrer les professionnels

en plus petit comité, idéal pour discuter d'un éventuel TFE ou stage. Nous avons également mis en place dans des salles de classe des sessions de "démonstrations" lors desquelles les entreprises qui le souhaitaient, avaient la possibilité de présenter plus précisément aux étudiants intéressés leurs équipements matériels et/ou logiciels, ou encore leurs méthodes de travail. Parallèlement, dans le hall de l'école, étaient disposés les stands des différentes entreprises et institutions afin qu'ils puissent se présenter, eux, leurs travaux ainsi que leurs matériels (figure 3). Pour clore cette journée, tout le monde s'est réuni autour d'un cocktail offert par les organisateurs.

Grâce à tous nos partenaires impliqués ainsi que l'ensemble de notre équipe, la journée s'est déroulée comme prévu et a visiblement beaucoup plu. En effet, nous avons eu de nombreux retours positifs ainsi que quelques commentaires intéressants d'étudiants, comme ceux-ci :

- "Des conférences enrichissantes et très motivantes pour l'avenir !"
- "Les thèmes abordés lors des différentes conférences étaient captivants, j'ai découvert de nombreuses choses."
- "Les professionnels étaient très à l'écoute et disponibles, j'ai pu échanger avec bon nombre d'entre eux et convenir d'un stage pour l'été prochain."

Nous souhaitons alors remercier professionnels et institutions, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible, en espérant pouvoir organiser un événement de la même ampleur au mois d'octobre prochain lors de la 19<sup>e</sup> édition. ●

**Lucien SANCEREAU** - Président du BDE  
**Max GUINCHARD** - Responsable Cercle Géo



Figure 2. Présentation de l'AFT par son secrétaire général.



Figure 1. Présentation du programme LiDAR HD.

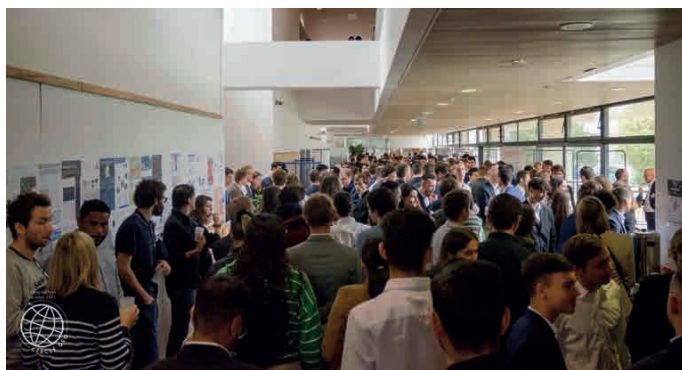


Figure 3. Hall de l'ESGT, lieu de présentation des exposants.

# Antarctique 2.0°C, pourquoi localiser des manchots ?

■ Lana LENOURRY - Paul CHAMBON - Julia GRONDIN - Cédric BOTELLA - Synthèse et mise en forme par Bernard FLACELIÈRE

*Le projet Antarctique 2.0°C est le premier projet mené par l'association Juste 2.0°C, forte de trente jeunes passionnés. Six étudiants et étudiantes des Écoles normales supérieures (figure 1) partent en expédition, pendant six mois, de la France jusqu'en Antarctique à bord d'un voilier aménagé en laboratoire itinérant. Leur objectif est d'étudier et analyser l'impact du réchauffement climatique sur les différents écosystèmes marins et littoraux en Antarctique. Parmi les six axes de recherches, climatologie, biogéochimie, microplastiques, sciences sociales, microbiologie et biologie des populations, nous nous intéresserons ici à ce dernier et plus particulièrement aux techniques de géolocalisation nécessaires au suivi des populations de manchots. Les partenaires français Teria (positionnement), YellowScan (LiDAR) et Instadron (drone et photogrammétrie) nous éclaireront sur leurs partenariats.*

## MOTS-CLÉS

Antarctique, réchauffement climatique, manchots, reproduction, localisation, GNSS, LiDAR, photographie

suivis sur le terrain : étude du régime alimentaire, analyse de l'exploitation de l'espace de pêche (ex. : volume, profondeur, temps de plongée...), analyse de la répartition interspécifique de l'espace de pêche, etc. Si les stocks des ressources alimentaires des manchots font actuellement l'objet de nombreux suivis, l'étude des habitats de reproduction reste jusqu'à présent peu explorée. Ils constituent pourtant un enjeu tout aussi important pour le succès reproducteur des manchots. Ces espaces de reproduction évoluent avec les changements actuels, parmi eux : l'élévation du niveau de la mer et le retrait des glaciers. Les colonies qui se reproduisent et nidifient en bord de plage peuvent voir leur espace de nidification diminuer, voire disparaître selon la topographie locale. À l'inverse, les colonies dont l'espace est limité par la présence de glaciers, peuvent, elles, gagner du terrain. Au regard des changements en cours et à venir, la disparition de certaines colonies et des flux migratoires de manchots sont à prévoir. Pour mieux anticiper ces flux et les possibles relocalisations attendues, il est nécessaire de mener une analyse de l'exploitation des espaces terrestres par les manchots. Cet enjeu est d'autant plus important que certaines espèces de manchots cohabitent au sein de mêmes espaces de reproduction. En péninsule Antarctique, par exemple, les espaces de reproduction sont souvent partagés entre manchots Adélie, papous et à jugulaire. Aux changements climatiques, globaux et anthropiques s'ajoutent donc de la compétition interspécifique pour les ressources trophiques et d'espace. Il est possible que les relations de compétitions évoluent sous l'influence des changements des espaces terrestres, mais aussi sous l'effet de la pression de compétition interspécifique. Nous nous questionnons sur les modalités de la répartition et de la ségrégation spatiale des manchots Adélie, papous

## Cette fantastique mission, pourquoi et comment ?

### ■ Contexte de l'étude

Le changement climatique et les changements globaux sont au cœur des sujets actuels de société ; chercheurs, initiatives citoyennes, entreprises et politiques se saisissent de la question de l'anthropisation et de ses conséquences. Les regards se tournent aujourd'hui sur les régions polaires : l'Arctique comme l'Antarctique sont en mutation. Ces mutations sont étudiées et suivies par la communauté scientifique dont le travail permet de mettre en place des mesures de gestion adaptées. Dans ce contexte, tout indicateur et témoin de l'état des écosystèmes est scrupuleusement observé. C'est notamment le cas de la composante biotique de ces écosystèmes. Dans les régions australes, les manchots sont

utilisés comme "sentinelles" des milieux austraux. Ce titre de sentinelle s'explique par l'exploitation tant du milieu marin que terrestre par ces oiseaux (figure 2). Ces espèces dépendent en effet des stocks de ressources marines pour se nourrir ainsi que de la disponibilité des espaces terrestres pour se reproduire. Le réchauffement climatique et les changements globaux associés modifient ces espaces et génèrent de nouvelles pressions sur les populations locales de manchots, de même que la présence humaine, touristique comme scientifique, accrue en région australe. Les pressions exercées sur les populations modifient leur structure. L'une de ces pressions résulte de la variation des stocks alimentaires, aujourd'hui les comportements alimentaires des manchots sont relativement bien



**Figure 1.** De G à D : Lana est en charge du suivi des manchots, Baptiste de la microbiologie, Niels étudie la climatologie, Margot s'intéresse à la sociologie des sciences, Olivier s'occupe de la chimie des microplastiques et Clément de la biogéochimie.



et à jugulaire. Comment ces espèces occupent-elles leurs espaces de reproduction en fonction des caractéristiques topographiques du terrain et comment se répartissent-elles l'espace en cas de cohabitation ?

C'est au travers de l'expédition antarctique que Lana Lenourry essaie de répondre à ces questionnements. Cette étude est encadrée par le Dr Céline Le Bohec (Centre Scientifique de Monaco & Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien) et le Dr Daniel Zitterbart (*Woods Hole Oceanographic Institution*).

## ■ Présentation de l'expédition porteuse de l'étude

L'étude des manchots s'inscrit dans le cadre de la mission Antarctique 2.0°C, expédition scientifique et étudiante à la voile à destination de la péninsule Antarctique. Cette expédition est juridiquement portée par l'association étudiante Juste 2.0°C, une association loi 1901 reconnue d'intérêt général qui a pour objectif de soutenir et de promouvoir des projets associant recherche scientifique, sensibilisation et initiatives. L'expédition interdisciplinaire rassemble six étudiants des Écoles normales supérieures provenant de diverses disciplines : biogéochimie, microbiologie, climatologie, sciences sociales, chimie et biologie des populations. L'objectif commun des six projets scientifiques est l'étude des sciences environnementales et l'impact de l'anthropisation sur les écosystèmes atlantiques et austraux. Ce projet scientifique est encadré par une quinzaine de laboratoires français et internationaux.



Figure 3. Une base fixe équipée du récepteur GNSS PYX Teria.

© Baptiste Arnaud - Juste 2.0°C

## ■ La campagne de terrain

La campagne a été réalisée de manière itinérante, l'usage du voilier a permis de partir de Marseille, le 6 octobre 2021, pour rejoindre la péninsule Antarctique et descendre jusqu'à la base scientifique ukrainienne Akademik Vernadsky tout en réalisant les divers protocoles scientifiques. Sur ce transect, onze colonies de manchots ont pu être cartographiées par LiDAR ou par photogrammétrie lorsque l'accessibilité au terrain ne permettait pas de descendre le Matrice 300 RTK (parfois trop encombrant).

En descendant sur le terrain, la première étape est d'installer la station de base pour la laisser en place le plus longtemps possible pour le traitement PPK. Il s'agit ensuite de déterminer le site de décollage qui sera le pivot pour plusieurs plans de vol. On choisit ce site en fonction de la visibilité qu'il permet sur la zone, et si possible, le plus loin des manchots en nidification. Les modèles numériques de terrain en Antarctique ne sont pas assez précis pour les utiliser pour le vol, se placer en hauteur permet de limiter les risques de collision avec le relief. Le survol est réalisé à une hauteur

minimale de 60 m pour limiter l'impact sur la faune. Quand cela est possible, les vols peuvent être doublés par un second plan de vol perpendiculaire au premier. Pour tous les sites des points d'appui sont utilisés. Pendant que l'opératrice prépare le drone et le plan de vol, un membre de l'expédition commence à installer les points d'appui sur l'ensemble de la zone. Une étape qui peut s'avérer très longue selon la hauteur de la couverture neigeuse, de même que la prise des positions GNSS des points d'appui.

Concernant les conditions météorologiques, nous n'avons pas constaté d'impact majeur du froid sur l'autonomie des batteries de l'ensemble des technologies : Mapper 3, PYX de Teria ou du drone. Nous n'avons pas non plus eu de givre des hélices qui peut être une inquiétude dans certaines conditions. Le drone, malgré son chargement a su résister au vent (parfois jusqu'à 30 nœuds), au froid (jusqu'à -15°C) et même à quelques chutes de neige.

Aujourd'hui, nous travaillons sur l'orthomosaïque pour l'identification des espèces de manchots présentes sur sites et l'identification et le compte des manchots en nidification grâce au module caméra du Mapper 3. Le modèle numérique de terrain généré par le LiDAR permettra l'analyse spatiale et topographique des sites de nidification des différentes espèces de manchots.

Lana Lenourry



Figure 2. Une colonie de manchots Adélie.

© Baptiste Arnaud - Juste 2.0°C

## La géolocalisation de l'étude avec Teria

Créé en 2005, Teria est expert dans la géolocalisation de précision centimétrique. Présent sur l'ensemble du territoire national et des DROM ainsi

qu'en Europe, Teria continue d'étendre son réseau à l'international.

Dans le cadre de l'opération Antarctique 2.0°C, Teria a apporté une solution technique innovante PYX avec le récepteur GNSS de haute précision, associé à une solution logicielle pour l'acquisition et le calcul précis de cibles indispensables à l'obtention d'images LiDAR de bonne résolution.

### ■ Équipements et méthodes

Pour accompagner Lana dans sa mission, Teria a fourni deux récepteurs PYX ayant l'avantage, outre de posséder la dernière puce GNSS Septentrio, de bénéficier d'un faible encombrement indispensable à ce type d'expédition réalisée dans des conditions difficiles. Le premier récepteur PYX a été utilisé en tant que base fixe déployée sur chaque zone de travail (figure 3) et le second, comme itinérant ou rover pour mesurer la position des cibles disposées sur le terrain. Un protocole détaillé a été fourni à Lana afin d'extraire la position précise de ces cibles.

Après l'activation de la base fixe, Lana a mesuré chaque cible pendant une minute tout en enregistrant les données brutes. Puis, à l'aide d'un logiciel de post-traitement et d'une solution développée sur mesure par Teria, Lana a extrait avec précision chaque point nécessaire à la calibration précise des données du LiDAR fourni par YellowScan.

Le traitement des données GNSS du PYX s'est appuyé sur un outil *open source* tel que RTKlib<sup>1</sup>. Au préalable, les données brutes au format SBF<sup>2</sup> ont été converties en format Rinx, puis un calcul de ligne de base a été effectué. Par la suite, un outil développé spécialement pour cette mission par Teria a permis d'extraire les points mesurés en coordonnées géographiques. Celles-ci ont été intégrées ultérieurement dans le traitement du LiDAR.

<sup>1</sup> RTKlib est un progiciel *open source* pour le positionnement standard et précis avec le GNSS.

<sup>2</sup> SBF (*Septentrio Binary Format*) est un fichier de données créé par les récepteurs GNSS. Il contient un journal de données sur la position, l'heure et la vitesse d'un appareil équipé d'un récepteur GNSS.

### ■ Comment cela s'est-il passé ?

D'un point de vue ergonomique, Lana a fortement apprécié la légèreté du récepteur PYX de même que son autonomie permettant un fonctionnement continu (une journée complète) malgré les températures extrêmes. Simple à mettre en marche, une fois le PYX configuré en mode post-traitement, seul un appui sur le bouton marche/arrêt était nécessaire. Qu'il soit positionné sur le trépied ou sur la canne, la forme du récepteur PYX permet une bonne prise en main, et ce, même avec une paire de gants.

En seulement quelques heures, Lana a été formée à l'ensemble de ces outils avec le support de nos ingénieurs techniques. Après quelques tests de mise en œuvre, elle est devenue très rapidement autonome.

Pour compléter sa mission, une étude est en cours pour post-traiter les données des bases en mode PPP permettant un référencement des bases en ITRF.

Lors des prochaines campagnes de mesure, il sera ainsi possible de comparer les MNT entre eux, par exemple.

Paul Chambon

### Le matériel YellowScan en action

À notre connaissance c'est la première fois qu'une étude LiDAR par drone a pu être menée en Antarctique. Le YellowScan Mapper a permis à Lana d'obtenir rapidement une résolution centimétrique d'une surface étendue. Il est donc possible de précisément analyser et caractériser l'espace occupé par les manchots au regard de l'espace disponible, mais non utilisé.

### ■ Quels équipements et méthodes ?

Pour cette mission, Lana disposait d'un LiDAR YellowScan Mapper incluant un module caméra, embarqué sur un M300 de chez DJI (figure 4).

Les acquisitions ont été volées à 10 m/s et à 60 mètres d'altitude au-dessus de onze sites de nidification.

Chaque site nécessitait entre deux et quatre vols pour couvrir l'ensemble de la surface (entre 15 et 50 hectares).



Figure 4. Le LiDAR YellowScan Mapper incluant un module caméra, embarqué sur un M300 de chez DJI.

Chaque site représentait au moins une journée de 7 h sur le terrain pour : la planification du vol, l'acquisition, la vérification de l'acquisition et la détermination des espèces par des observations menées depuis le sol. La densité de points obtenue est de 300 points/m<sup>2</sup> en moyenne.

Les terrains étudiés sont souvent enneigés ou détrempés, cela n'a pas empêché l'obtention d'un modèle numérique de terrain pour chaque vol.

Le système YellowScan employé permet d'acquérir facilement l'information. Avec le logiciel d'extraction de points CloudStation, il est possible de vérifier sur le terrain, directement après le vol, l'emprise et le rendu des points LiDAR. De plus, à la suite de l'extraction dans CloudStation, le traitement et l'export en modèle numérique de terrain (ou DEM) est intuitif et rapide. L'acquisition de photographies permet de compléter les informations prises par l'observateur au sol (notamment pour la reconnaissance d'espèces).

### ■ De bons résultats

Lana espère également qu'en mettant ces modèles numériques de terrain à disposition de la communauté scientifique, ceux-ci puissent faciliter l'effort de recherche en milieu austral. En effet, détenir une topographie précise pourrait notamment faciliter la phase de préparation des campagnes de recherche, la connaissance du terrain avant échantillonnage, par exemple. Le module caméra du Mapper permet également la reconnaissance d'éléments. C'est un point indispensable pour le compte des manchots, les photos permettent aussi de distinguer les manchots en nidification des manchots non nidifiant. Elles permettent même parfois d'identi-



fier les espèces de manchots lorsque celles-ci cohabitent.

Julia Grondin

## Avec Instadrone pour l'acquisition LiDAR

### ■ Qui est Instadrone ?

Afin de réaliser les captations du LiDAR aéroporté dans de bonnes conditions, Lana a été formée et accompagnée par les équipes d'Instadrone, spécialistes des prestations techniques par drone, dont les acquisitions LiDAR en zone végétalisée.

Depuis 2014, ce bureau d'études s'appuie sur un réseau d'opérateurs de drone sur l'ensemble du territoire (28 agences) et à l'étranger (8 pays). L'expérience acquise sur de nombreuses typologies de terrain a permis de développer des *process* (modes opératoires) d'acquisition performants et fiables.

### ■ Comment réaliser un levé LiDAR ?

En effet, un levé LiDAR nécessite un parfait suivi du terrain afin d'obtenir une donnée homogène sur l'ensemble de la zone à capter. Instadrone utilise le logiciel UGCS, une application de planification de vol, qui permet le suivi du terrain par le drone tout au long du vol. Nativement, le MNS (modèle numérique de surface) est un SRTM<sup>3</sup> qui convient dans de très nombreux cas. Mais il est également possible d'intégrer un MNS plus précis (exemple : données IGN) en cas de topographie complexe et à risque pour le drone.

Pour des raisons de simplification technique dans le cadre de la mission de Lana, les équipes ont choisi de réaliser les plans de vol directement par l'application DJI Pilot du drone M300 RTK, vecteur d'emport du LiDAR YellowScan Mapper. Depuis peu, cette application propriétaire permet également l'emport de MNS. Elle a l'avantage de se passer de l'ordinateur sur le terrain et d'éviter les désagréments liés au froid et à la gestion des batteries.

Lana a donc été formée au pilotage du drone DJI M300 RTK sur le site d'Instadrone à Servian (Hérault), après avoir validé son examen théorique dans un

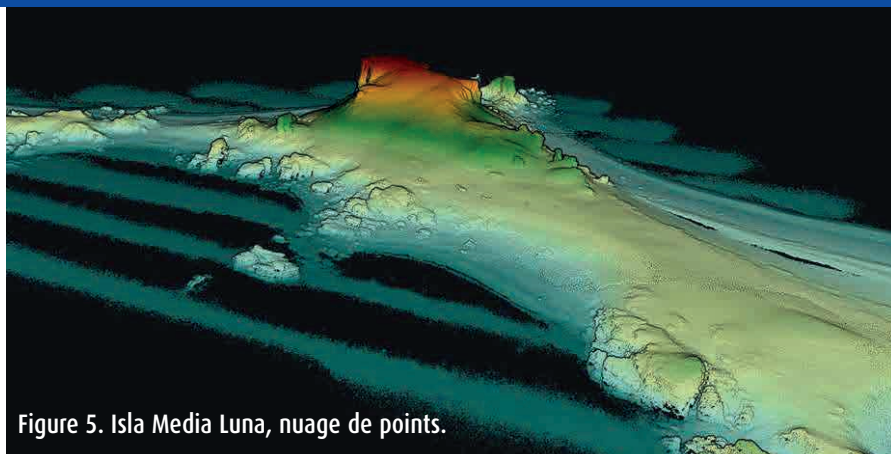


Figure 5. Isla Media Luna, nuage de points.

centre DGAC<sup>4</sup>. Instadrone a également accompagné Juste 2.0°C par le prêt de deux drones, dont un Matrice 300 RTK pour l'emport du LiDAR dans des conditions optimales de sécurité pour la faune et le matériel. En solution de secours, Instadrone a également prêté un Phantom 4 pro afin de réaliser au moins des photographies en cas de dysfonctionnement ou de dégradation du Matrice ou du LiDAR au cours de la mission.

Après avoir acquis les bases du pilotage manuel, avoir pris ses marques lors de vol en condition de vent élevé, Lana a été formée à la réalisation de plan de vol automatisé et au *process* d'acquisition LiDAR ; mise en œuvre, initialisation, captation, vérification de la donnée acquise.

Il a fallu adapter les hauteurs de vol afin de ne pas déranger la faune présente sur la banquise tout en garantissant la qualité du nuage de points (figure 5). Les impératifs de logistique (transport des batteries, chargement sur le bateau, transport du matériel à bord de l'annexe...) ont dû être anticipés afin de simplifier au maximum la mission, sachant que des problèmes inhérents aux conditions météorologiques allaient forcément compliquer la mission de Lana.

Lana n'a eu à déplorer aucun incident. Le matériel est revenu complet et intact malgré les difficultés rencontrées sur le terrain. Le protocole d'acquisition et le respect des mesures de sécurité, pré-vol et en vol, a garanti l'intégrité du matériel et a permis d'obtenir de la donnée, limitant autant que possible le dérangement des manchots.

Cédric Botella

## Contacts

Lana LENOURLY, étudiante chercheuse à l'ENS, lana.lenourry@ens-paris-saclay.fr  
Paul CHAMBON, directeur technique à Teria, paul.chambon@reseau-teria.com  
Julia GRONDIN, Content Manager chez YellowScan, julia.grondin@yellowscan-lidar.com,  
Cédric BOTELLA, gérant d'Instadrone, contact@instadrone.fr

## Bibliographie

Liens Internet

Le site de l'association Juste 2.0°C : <https://www.j2d.org/>

Les pages du site Teria : <https://www.reseau-teria.com/2022/02/21/teria-partenaire-de-lexpedition-scientifique-antarctique-2-0c/>

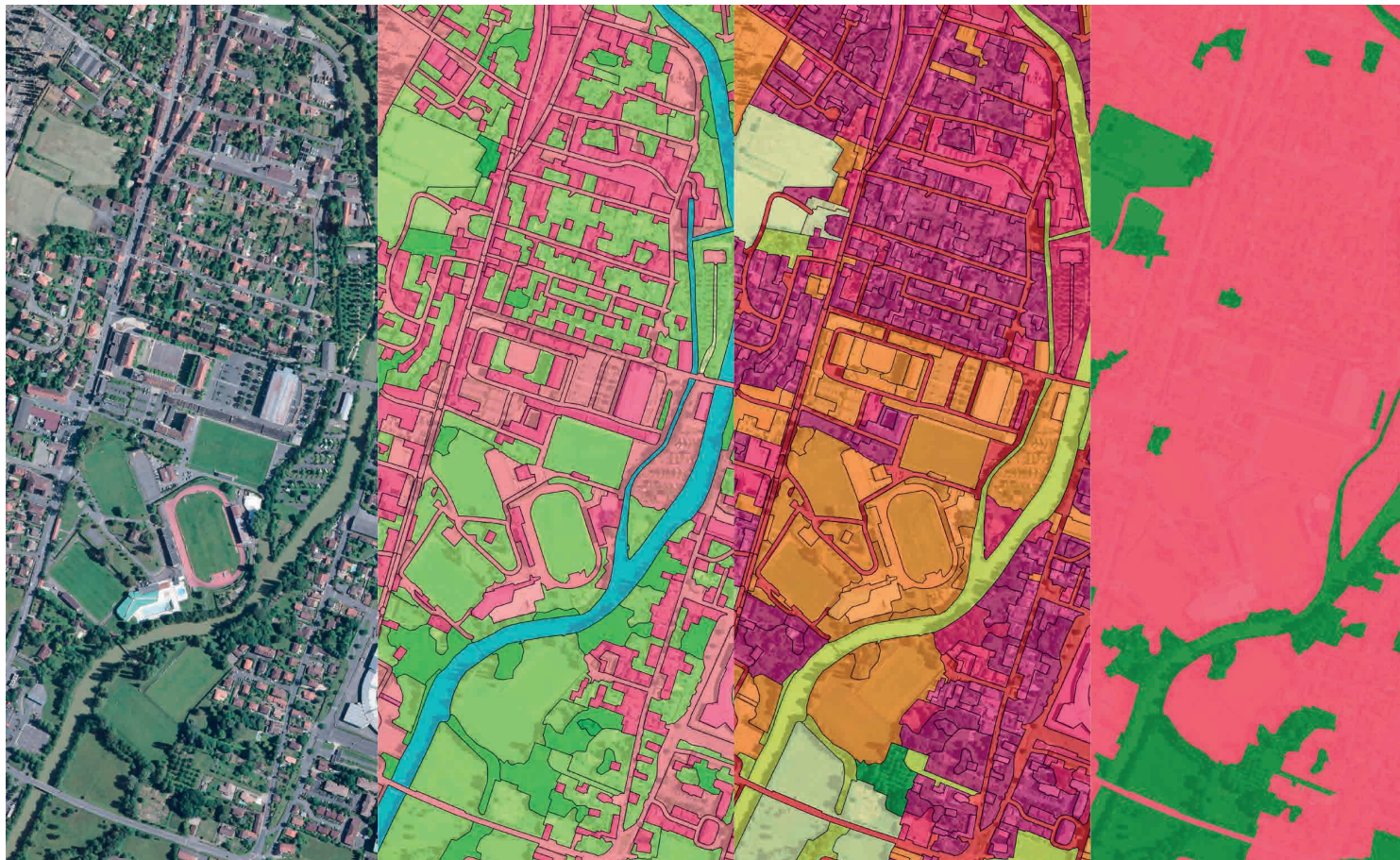
## ABSTRACT

*The Antarctica 2.0°C project is the first project led by the Juste 2.0°C association, which is made up of thirty young enthusiasts. Six students from the Écoles Normales Supérieures are going on a six-month expedition from France to Antarctica aboard a sailboat fitted out as a travelling laboratory. Their objective is to study and analyze the impact of global warming on the various marine and coastal ecosystems in Antarctica. Among the five research axes, climatology, biogeochemistry, microplastics, social sciences and population biology, we will focus here on the last one and more particularly on the geolocation techniques necessary to monitor penguin populations. The French partners Teria (positioning), YellowScan (LiDAR) and Instadrone (drone and photogrammetry) will explain their partnerships.*

3 Shuttle Radar Topography Mission.

4 Direction générale de l'aviation civile.

# Premier atlas IGN des cartes de l'anthropocène



Le 27 septembre 2022, dans les locaux de la maison du climat à Paris\*, l'Institut de l'information géographique et forestière (IGN) a présenté au public le premier atlas IGN des cartes de l'anthropocène. Signalons que la maison du climat est une initiative de la maire de Paris, Anne Hidalgo, tournée vers les jeunes, notamment en écho au mouvement initié par l'activiste suédoise Greta Thunberg.

La définition de l'anthropocène a été rappelée comme étant un néologisme construit à partir du grec ancien *άνθρωπος* (anthropos, "être humain") et *καινός* (kainos, "nouveau"), en référence à une nouvelle ère où les activités humaines ont un impact significatif et global sur les écosystèmes planétaires. Débutée à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle avec la révolution industrielle, elle succéderait, selon le Néerlandais Paul

Josef Crutzen, prix Nobel de chimie, et le biologiste américain Eugène Stoermer, à la période dite holocène en tant que nouvelle époque géologique. L'atlas se présente sous forme dématérialisée, un fichier gracieusement accessible sur le site de l'IGN à l'adresse <https://www.ign.fr/atlas-ign-des-cartes-de-lanthropocene>, l'ouvrage étant disponible par téléchargement. Il constitue un atout au service de tous pour accompagner les transitions écologique et énergétique, riche de cartes utiles à la planification. Pour en savoir plus sur le contenu, les deux parties en tête de chapitre sont rapportées ci-dessous.

Extrait de l'atlas : Mesure de l'artificialisation des sols  
Auch (32)

**IGN**  
INSTITUT NATIONAL  
DE L'INFORMATION  
GÉOGRAPHIQUE  
ET FORESTIÈRE

## Première partie : la carte comme révélateur des changements

**Chapitre I L'artificialisation des sols**  
*Intimement liée à la nécessité de développement et d'aménagement des territoires, l'artificialisation des sols menée pour bâtir les villes a aussi des conséquences dommageables sur l'environnement. La réglementation impose désormais de laisser sa chance à la nature et de renaturer les espaces qui peuvent l'être.*

**Chapitre II Une forêt en mutation**  
*Le paysage forestier français va fortement évoluer. Les forêts, ce sont des arbres, des sols, une flore et une faune*

(\*) une réaffectation de l'ancienne mairie du IV<sup>e</sup> arrondissement qui fait suite à la fusion des quatre premiers arrondissements de la capitale devenue effective en 2020.



qui constituent un écosystème riche et complexe. Cet équilibre est aujourd'hui bousculé. En cause, des sécheresses plus fréquentes, des incendies et des maladies qui frappent les arbres. Or, les forêts "produisent" des services économiques, sociaux et écologiques à préserver.

## Chapitre III La biodiversité est sous pression

Les habitats naturels se dégradent et les espèces disparaissent à une vitesse encore jamais constatée. Elle est pourtant indispensable pour l'Homme, qui ne peut s'extraire de la nature.

## Chapitre IV L'érosion des côtes

L'érosion des côtes est un phénomène ancien mesuré depuis plusieurs décennies. Cependant, les chercheurs anticipent une accélération qui posera des problèmes grandissants en termes d'occupation des bords de mer.

## Chapitre V Les épisodes naturels extrêmes

Le territoire français est exposé à de multiples risques naturels : hausse des températures moyennes et des extrêmes, changement du régime de précipitation avec des pluies plus abondantes au nord en hiver et de fortes sécheresses au sud en été. Mieux vaut s'y préparer.

## Deuxième partie : les capacités d'observation de l'IGN

### Chapitre I Acquérir

Le cartographe est d'abord l'arpenteur du monde. Mais il a progressivement remplacé son propre pas par des puissantes machines qu'il pilote. Aujourd'hui satellites, avions, drones équipés d'appareils photo, radar, LiDAR embrassent le monde avec une résolution et une fréquence toujours plus grandes. L'acquisition reste la première étape de la production de la donnée géographique, la récolte du terrain.

### Chapitre II Traiter

Il faut à la moisson de la donnée géographique brute un traitement pour la rendre lisible. L'artiste cartographe, mué en géomaticien, devient

développeur d'intelligence artificielle et data scientist, pour transformer plus vite une donnée toujours plus massive et renouvelée en continu. Ce traitement, seconde étape de la production de la donnée géographique, prépare la donnée pour les systèmes d'information géographique, les sites web ou les plateformes numériques dédiées.

### Chapitre III Restituer

La carte est une représentation spatiale, souvent géométrique, et toujours une sémiologie graphique. Il faut en faciliter l'accessibilité aussi bien physique que cognitive. Propriété, gratuité, donnée ouverte, stockage, interface logicielle forment à cette ultime étape les enjeux de la disponibilité. Mais la carte est également intentionnelle, son pouvoir est de rendre intelligible un territoire, un phénomène : faire voir pour comprendre. La carte ne garde son pouvoir de médiation qu'au prix d'une restitution pertinente.

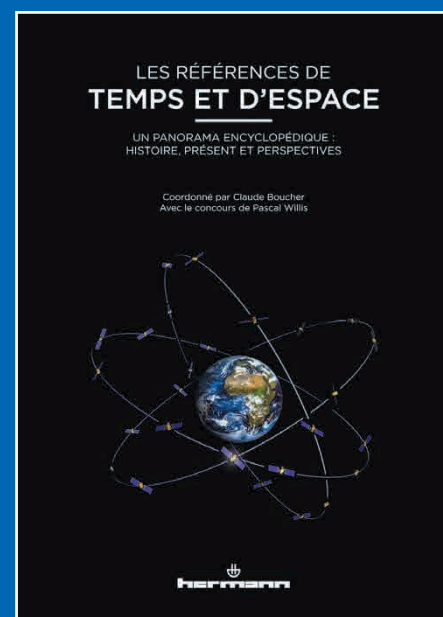
L'atlas constitue une suite à l'engagement de l'IGN à développer une capacité d'observation en continu s'inscrivant dans sa mission d'appui aux politiques publiques, observation préalable au passage d'une représentation cartographique statique à une représentation dynamique. Cela implique que l'institut s'oblige à une évolution technologique satisfaisant :

- l'utilisation de diverses sources de données pour enrichir l'anthropocène ;
- un traitement automatique des données permettant de visualiser les changements topographiques et d'occupation du sol en continu ;
- une présentation des données adaptée à la prise de décision publique et accessible à tous.

Les moyens à mettre en œuvre faciliteront la production des géodonnées pour révéler l'impact, aussi précis que possible, de l'activité humaine sur le territoire et orienter les actions de préservation.

L'atlas montre, même s'il n'en est pas besoin, que la carte, sous toutes ses formes, reste un excellent outil de médiation et de compréhension du monde. ●

JPM



**COMMANDEZ "LES RÉFÉRENCES DE TEMPS ET D'ESPACE" AU PRIX DE 35,00 €**  
17 x 24 cm, 484 pages  
frais de port inclus (France)

M/Mme Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal : \_\_\_\_\_

Ville : \_\_\_\_\_

Tél. : \_\_\_\_\_

Fax : \_\_\_\_\_

Courriel : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

Signature \_\_\_\_\_

**Bulletin de commande à retourner accompagné d'un chèque à l'Association francophone 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](http://www.aftopo.org)**

# Détermination des coordonnées de station sur plan coté

■ Nicolas VAN CRANENBROECK

*Dans la pratique habituelle de l'implantation des axes des bâtiments et des ouvrages de génie civil, le géomètre topographe doit déterminer les coordonnées de sa station sur la base du système de coordonnées adopté pour le projet, afin de réaliser l'implantation des points de construction. La difficulté réside souvent dans l'établissement de ces coordonnées, car seules les dimensions des plans de l'architecte sont disponibles. Cet article explique comment déterminer les coordonnées d'une station totale en utilisant uniquement les dimensions.*

## Introduction

Dans l'exercice habituel des travaux d'implantation de bâtiments et d'ouvrages du génie civil, le topographe est toujours amené à déterminer les coordonnées de la station de levé en fonction du système de coordonnées adopté pour le projet afin de procéder à l'implantation des points de construction. La difficulté réside souvent d'établir ces coordonnées, car peu de points de contrôle sont généralement établis. On ne dispose ainsi souvent que de simples cotes. Cela revient donc à devoir déterminer les coordonnées et l'orientation de la station totale sur la base d'une transformation dont les points homologues dont on dispose ne sont seulement connus qu'en X ou en Y. Notre solution est basée sur un algorithme de calcul connu sous le nom de "transformation de Helmert", en incluant ces points de coordonnées incomplètes dans le modèle fonctionnel.

FR. Helmert est un géodésien allemand (1841-1917) qui contribua largement par le développement de ses modèles mathématiques aux traitements des observations astronomiques et géodésiques en ayant recours systématiquement à la méthode des moindres carrés imaginée par A.M. Legendre (1752-1833) pour apporter une solution aux calculs des comètes et dont la base théorique a été établie par K.F. Gauss (1777-1855). Notre expérience s'est développée dans le cadre de la construction des hautes tours pour répondre à

## MOTS-CLÉS

Transformation par similitude, implantation, ajustement moindres carrés, topographie, relevés bâtiments.

la question d'implanter des éléments sur base du projet et sans avoir nécessairement suffisamment (ou aucun) de points de contrôle. Nous avons également utilisé cette approche dans le cas plus simple des chaises de chantier. Elle peut s'utiliser pour la localisation d'un robot équipé de 4 distancemètres placés de façon orthogonale sur le châssis et qui se déplace dans un couloir.

## Transformation par similitude dite de Helmert

Il s'agit d'exprimer un couple de points connus dans deux systèmes de coordonnées différents afin d'en établir une transformation applicable par la suite sur l'une ou l'autre des coordonnées d'un des deux systèmes.

En posant  $X_p$  et  $Y_p$  comme étant les coordonnées d'un point P du projet et  $x_p$  et  $y_p$  comme étant les coordonnées du point dans le système d'axe arbitraire de la station totale, nous obtenons les équations suivantes (figure 1).

Les équations suivantes sont déduites de la représentation géométrique :

$$\begin{aligned} x_1 &= x_p \cdot \cos \alpha \\ x_2 &= y_p \cdot \sin \alpha \\ X_p - a &= x_1 + x_2 = x_p \cdot \cos \alpha + y_p \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= x_p \cdot \sin \alpha \\ y_2 &= y_p \cdot \cos \alpha \\ Y_p - b &= y_2 - y_1 = y_p \cdot \cos \alpha - x_p \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

Que nous pouvons écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

En ajoutant un facteur d'échelle homogène k, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + k \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

En redéveloppant sous forme algébrique l'équation (4), nous obtenons :

$$X_p = a + k \cdot x_p \cos \alpha + k \cdot y_p \sin \alpha$$

$$Y_p = b - k \cdot x_p \sin \alpha + k \cdot y_p \cos \alpha$$

Où les inconnues sont l'angle de rotation  $\alpha$ , le facteur d'échelle k et les paramètres de translation a et b.

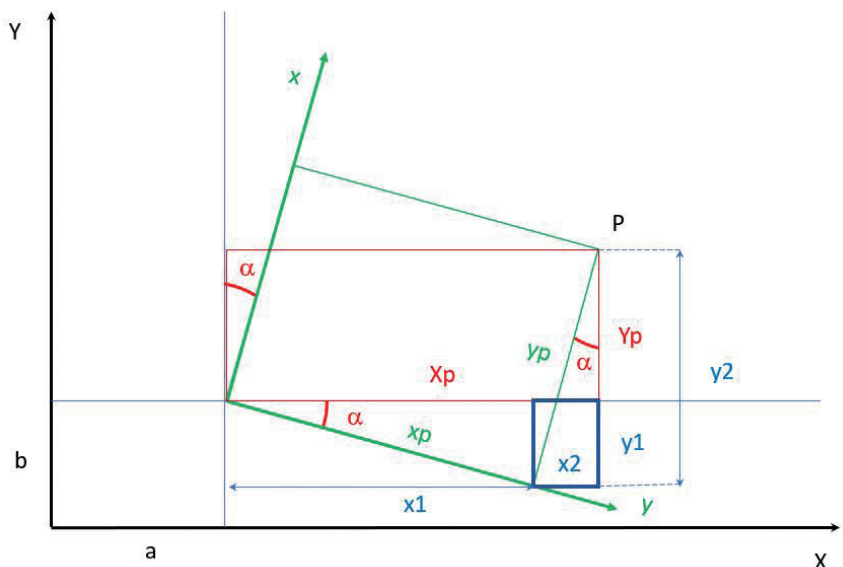


Figure 1. Représentation géométrique.



En posant  $c=k.\cos \alpha$  et  $d=k.\sin \alpha$ , nous obtenons les équations linéaires suivantes sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_P & y_P \\ 0 & 1 & y_P & -x_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (5)$$

Où nous avons un système de deux équations à quatre inconnues à résoudre. Il faut donc au minimum deux points connus dans les systèmes de coordonnées respectifs, à savoir le système de coordonnées "projet" (X,Y) et le système de coordonnées arbitraire de la station totale (x,y).

Ce minimum de deux points ne nous permet aucune vérification. Avec trois points, on pourrait déceler une erreur de coordonnées ou de correspondance, mais sans trouver le point fautif alors qu'avec quatre points et plus, on pourrait valider statistiquement les paramètres de la transformation.

Soit pour trois points P, Q et M à titre d'exemple de modèle fonctionnel les équations matricielles suivantes avec L le vecteur des observations, A la matrice des équations ou encore dénommée matrice de configuration et x le vecteur des inconnues avec leurs dimensions respectives :

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ X_Q \\ Y_Q \\ X_M \\ Y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_P & y_P \\ 0 & 1 & y_P & -x_P \\ 1 & 0 & x_Q & y_Q \\ 0 & 1 & y_Q & -x_Q \\ 1 & 0 & x_M & y_M \\ 0 & 1 & y_M & -x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L_{(6,1)} = A_{(6,4)} \cdot X_{(4,1)}$$

On considère donc les coordonnées de la station totale comme étant les "observations" dans ce modèle et l'on peut donc définir dans le modèle stochastique une matrice de poids, inverse de la matrice de variance-covariance estimée [5]. Pour chaque point, nous obtenons ses coordonnées à partir des gisements et des distances horizontales suivants :

$$\begin{aligned} x_p &= x_s + d \cdot \sin(g) \\ y_p &= y_s + d \cdot \cos(g) \end{aligned}$$

Celles-ci sont caractérisables par leurs variances  $\sigma_d^2$  et  $\sigma_g^2$ . Rappelons que l'écart-standard d'une population est la racine carrée de la variance de cette population. La matrice de variance-covariance est obtenue par :

$$Q_{xx} = B \cdot Q_{ll} \cdot B^T$$

Avec :

$$B = \begin{bmatrix} d_p \cos(g_p) & \sin(g_p) \\ -d_p \sin(g_p) & \cos(g_p) \end{bmatrix}$$

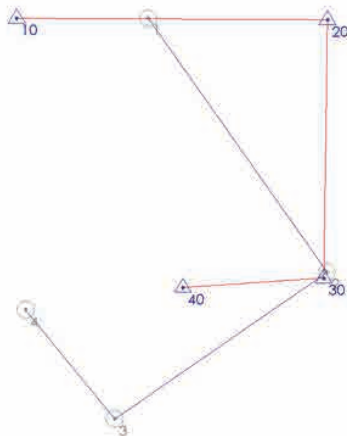


Figure 2. Représentation des points.

$$\text{et } Q_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_g^2 & 0 \\ 0 & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \text{ et } P = Q_{xx}^{-1}$$

Il s'agit d'un système de six équations à quatre inconnues qui est surdéterminé et que l'on peut résoudre à l'aide de la méthode des moindres carrés pour autant que la matrice dite des équations normales ( $A^T P A$ ) possède une inverse et que son déterminant soit  $> 0$ .

$$\tilde{x} = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P L$$

Les paramètres de la transformation sont obtenus comme suit :

Translation en X = a

Translation en Y = b

$$\text{Facteur d'échelle } k = \sqrt{c^2 + d^2}$$

Angle de rotation  $\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{c}{d} \right)$  exprimé en radian

Que l'on remplace dans les deux équations suivantes pour obtenir à partir des coordonnées dans le système de référence de la station, les coordonnées homologues dans le système "projet" :

$$X_i = a + k \cdot x_i \cos \alpha + k \cdot y_i \sin \alpha$$

$$Y_i = b - k \cdot x_i \sin \alpha + k \cdot y_i \cos \alpha$$

Il est important de constater ici que le facteur d'échelle est improprement dénommé de cette façon. Il s'agit, en effet, plus d'un paramètre reflétant la distorsion entre les axes X et Y que d'un véritable facteur d'échelle.

En effet, nous pouvons calculer l'angle de rotation de deux façons différentes :

$$\cos \alpha_1 = \frac{c}{\sqrt{c^2 + d^2}} \quad \text{et} \quad \sin \alpha_2 = \frac{d}{\sqrt{c^2 + d^2}}$$

Et vérifier que les angles sont complémentaires. S'ils ne le sont pas, il y a un défaut dans l'adaptation. C'est également un critère d'analyse de qualité.

## Exemple numérique

Nous présentons un exemple numérique complet qui nous permettra de souligner les paramètres importants à considérer dans une analyse qualité. Soit quatre points connus à la fois dans le système de coordonnées de la station totale et dans le système des points "projet" :

$$\begin{array}{ll} X_{10} = 71.23 & x_1 = 110.00 \\ Y_{10} = 350.11 & y_1 = 350.18 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} X_{20} = 162.80 & x_1 = 162.75 \\ Y_{20} = 349.71 & y_1 = 275.32 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} X_{30} = 161.74 & x_1 = 100.15 \\ Y_{30} = 273.65 & y_1 = 232.10 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} X_{40} = 120.23 & x_1 = 73.82 \\ Y_{40} = 270.86 & y_1 = 264.32 \end{array}$$

Nous limitons ces valeurs à deux décimales pour la clarté de la présentation et considérons une matrice de poids unitaire.

Le modèle fonctionnel s'écrit :

$$\begin{bmatrix} 71.23 \\ 350.11 \\ 162.80 \\ 349.71 \\ 161.74 \\ 273.65 \\ 120.23 \\ 270.86 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 110.00 & 350.18 \\ 0 & 1 & 350.18 & -110.00 \\ 1 & 0 & 162.75 & 275.32 \\ 0 & 1 & 275.32 & -162.75 \\ 1 & 0 & 100.15 & 232.10 \\ 0 & 1 & 232.10 & -100.15 \\ 1 & 0 & 73.82 & 264.32 \\ 0 & 1 & 264.32 & -73.82 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$$

$$L_{(8,1)} = A_{(8,4)} \cdot X_{(4,1)}$$

On applique la méthode des moindres carrés pour obtenir le meilleur estimateur linéaire non biaisé de  $\tilde{x}$  :

$$\tilde{x} = (A^T A)^{-1} \cdot A^T L$$

Soit :

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} 292.839 \\ 57.525 \\ 0.57954 \\ -0.81490 \end{bmatrix}$$

avec  $a = 292.839$ ,  $b = 57.525$ ,  $k = 0.99996$  et  $\alpha = -60.64466$  gons

On peut calculer  $\alpha$  de deux façons différentes :

$$\cos \alpha_1 = \frac{c}{\sqrt{c^2 + d^2}} \quad \text{et} \quad \sin \alpha_2 = \frac{d}{\sqrt{c^2 + d^2}}$$

Dans l'exemple, nous trouvons en grades  $\alpha_1 = 39.35534$  et  $\alpha_2 = 60.64466$  soit la somme de  $\alpha_1 + \alpha_2 = 100.00000$ .

Le vecteur des résidus étant obtenu par  $V = A \cdot \tilde{x} - L$  et  $Q_{LL} = A Q_{\tilde{x}\tilde{x}} A^T$

$$V = \begin{bmatrix} 0.002 \\ 0.002 \\ -0.002 \\ 0.001 \\ -0.003 \\ 0.001 \\ 0.003 \\ -0.005 \end{bmatrix}$$



Une estimation du facteur de variance *a posteriori* est donné par  $s_0^2 = \frac{v^T v}{n-m}$  et de l'écart-type sur l'unité de poids *a posteriori* soit  $\sigma_0 = \sqrt{s_0^2}$  qui est dans notre exemple  $\sigma_0 = 0.00380$ .

Dans notre exemple, nous avons utilisé implicitement comme matrice de poids des observations la matrice unitaire. On peut donc déduire de l'écart-type sur l'unité de poids une mesure de la précision des coordonnées obtenue par la station totale.

Les écarts-types sur les paramètres seront fournis par les éléments diagonaux de la matrice de variance-covariance des paramètres, soit  $Q_{\bar{x}\bar{x}} = \sigma_0^2 (A^T A)^{-1}$  dont on prendra la racine carrée :

$$\begin{aligned}\sigma_a &= 0.011 \\ \sigma_b &= 0.011 \\ \sigma_c &= 0.000004 \\ \sigma_d &= 0.00004\end{aligned}$$

Ces paramètres sont importants à vérifier après ce genre de transformation pour vérifier qu'ils sont significatifs ou non.

$$Q_{\bar{v}\bar{v}} = \begin{bmatrix} 0.3332 & 0 & 0.2118 & -0.3044 & 0.0374 & 0.0759 & 0.1589 & 0.2286 \\ 0 & 0.3332 & 0.3044 & 0.2118 & -0.0759 & -0.0374 & -0.2286 & 0.1589 \\ 0.2118 & 0.3044 & 0.5241 & 0 & 0.2209 & -0.2169 & 0.0914 & -0.0875 \\ -0.3044 & 0.2118 & 0 & 0.5241 & 0.2169 & 0.2209 & 0.0875 & 0.0914 \\ 0.0374 & -0.0759 & 0.2209 & 0.2169 & 0.5379 & 0 & 0.3545 & -0.1411 \\ 0.0759 & -0.0374 & -0.2169 & 0.2209 & 0 & 0.5379 & 0.1411 & 0.3545 \\ 0.1589 & -0.2286 & 0.0914 & 0.0875 & 0.3545 & 0.1411 & 0.6047 & 0 \\ 0.2286 & 0.1589 & -0.0875 & 0.0914 & -0.1411 & 0.3545 & 0 & 0.6047 \end{bmatrix}$$

La matrice de variance-covariance des résidus est obtenue par  $Q_{\bar{v}\bar{v}} = P - Q_{LL}$ .

Une propriété intéressante de la matrice  $Q_{\bar{v}\bar{v}}$  est que sa trace (somme des éléments diagonaux) nous fournit le degré de liberté ( $n - m$ ) et donc nous permet de vérifier pour chaque observation, sa contribution à la redondance du système. Dans notre exemple celui-ci vaut 4.

L'obtention des éléments diagonaux de la matrice  $Q_{\bar{v}\bar{v}}$  nous permet également de standardiser les résidus, qui est l'hypothèse alternative de la méthode de détection des erreurs grossières, puisque ces valeurs seront testées par un test t de Student.

$$\frac{|v|}{\text{diag} \sqrt{Q_{\bar{v}\bar{v}}}} = \begin{bmatrix} 0.89 \\ 1.14 \\ 0.74 \\ 0.41 \\ 0.94 \\ 0.53 \\ 0.91 \\ 1.73 \end{bmatrix}$$

Nous invitons le lecteur à refaire cet exemple et à introduire une faute sur un point des coordonnées "projet" pour vérifier par lui-même ce qui précède.

Notons également, que dans la formulation exposée, on considère l'imprécision des points "station totale" et non celle des points de "contrôle". Si on voulait intégrer dans le modèle stochastique cette information, il faudrait reformuler le modèle fonctionnel et stochastique qui ne sera plus linéaire et donc fera appel à des itérations successives pour obtenir les paramètres.

$$\begin{aligned}X_p &= a + cx_p + dy_p \\ Y_p &= b - dx_p + cy_p\end{aligned}$$

Devenant :

$$\begin{aligned}F: a + cx_p + dy_p - X_p \\ G: b - dx_p + cy_p - Y_p\end{aligned}$$

Et puisque les coordonnées de la "station totale" et les coordonnées des points de "contrôle" contiennent des erreurs on obtiendra :

$F(x, y, X, Y) = a + c(x_p + v_x) + d(y_p + v_y)$   
 $G(x, y, X, Y) = b - d(x_p + v_x) + c(y_p + v_y)$   
Ces équations non linéaires doivent être linéarisées et donc la solution sera itérative. On obtiendra des valeurs approchées pour les paramètres en calculant ceux-ci par une transformation par similitude sur deux points, par exemple.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & c_0 & d_0 \\ 0 & -1 & d_0 & -c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 \\ y & -x & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} da \\ db \\ dc \\ dd \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p - (a_0 + c_0 x_p + d_0 y_p) \\ Y_p - (b_0 - d_0 x_p + c_0 y_p) \end{bmatrix}$$

Le modèle stochastique inclura les écarts-types sur les coordonnées de la "station totale" et les coordonnées des points de "contrôle". [3],[4],[6],[7] et [8].

## Analyse procustéenne

En statistiques, l'analyse procustéenne est une technique pour comparer des formes. Elle est utilisée pour déformer un objet afin de le rendre autant que faire se peut semblable à une référence (potentiellement arbitraire), ne laissant apparaître entre l'objet et la référence que les différences que les transformations autorisées (rotation, translation et mise à l'échelle) n'ont pu gommer. La déformation supprime les différences qui ne sont pas dues à la forme intrinsèque de l'objet (mais par exemple à un biais introduit lors de l'acquisition des données). Celles qui subsistent sont considérées objectives et permettent d'évaluer le degré de ressemblance entre l'objet et la référence.

Cette technique a été nommée ainsi en 1962 par Hurley et Catell à partir de Procuste, brigand de la mythologie grecque qui forçait ses victimes à s'allonger sur un lit et modifiait leur taille par la force pour que celle-ci correspondît à la taille du lit. Cependant, le cœur théorique de la technique est de plus de 20 ans antérieur (Mosier, 1939). Améliorée et affinée depuis par de nombreuses publications scientifiques, l'analyse procustéenne est utilisée dans tous les champs où l'analyse de formes peut être utile [5].

Il est évident que l'analyse procustéenne suscite de nouveaux développements relatifs aux transformations de coordonnées [6].

Depuis l'avènement du GNSS RTK, les topographes sont confrontés à ce type de problème quand il s'agit d'adapter leur levé sur des points géodésiques, ces derniers n'étant pas de la même précision. Une façon de "gommer" les résidus obtenus après transformation est d'appliquer une nouvelle transformation par anamorphose. On se retrouve ainsi avec des coordonnées "locales" qui collent parfaitement avec les coordonnées des points de "contrôles". Cette transformation est également dénommée transformation en résidus zéro.

Les notions théoriques de l'anamorphose ont été développées par le Prof. P.-L. Baetslé et M.G. Hoebeke [2].





Soit la figure suivante :

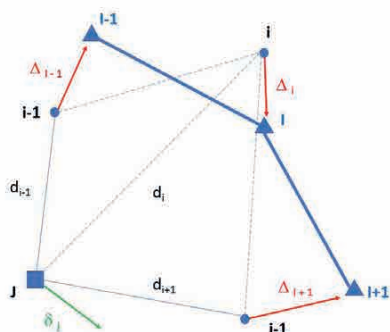


Figure 3. Transformation par anamorphose.

Le problème consiste à trouver une transformation qui, tout en ramenant les points "locaux" sur les points de "calage" par un déplacement vectoriel fait subir à un point "local"  $\Delta_i$  un déplacement vectoriel "d'accompagnement"  $\delta_j$ .

Une transformation linéaire proposée :

$$\delta_j = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i}} \quad (8)$$

Avec  $N$  le nombre de points en commun pour réaliser une transformation par similitude et  $d_i$  la distance entre un point quelconque  $j$  ne faisant pas partie de la transformation par similitude et un point "local".

Contrairement à la transformation par similitude, où les coordonnées des points "locaux" et de "calage" n'interviennent qu'une seule fois pour le calcul des paramètres de transformation, la transformation par anamorphose impose, pour chaque point qui doit être transformé, le calcul de toutes les distances  $d_i$  séparant ce point des points utilisés pour la transformation par similitude.

Nous disposons maintenant de toutes les connaissances nous permettant d'aborder la transformation par similitude sur cotations.

## Transformation par similitude sur cotations

Sur plan, nous disposons des cotations et donc nous pouvons les exprimer sous forme de coordonnées incomplètes  $X$  ou  $Y$ .

De la station totale, dans un système de coordonnées arbitraires, nous pouvons relever les coordonnées des

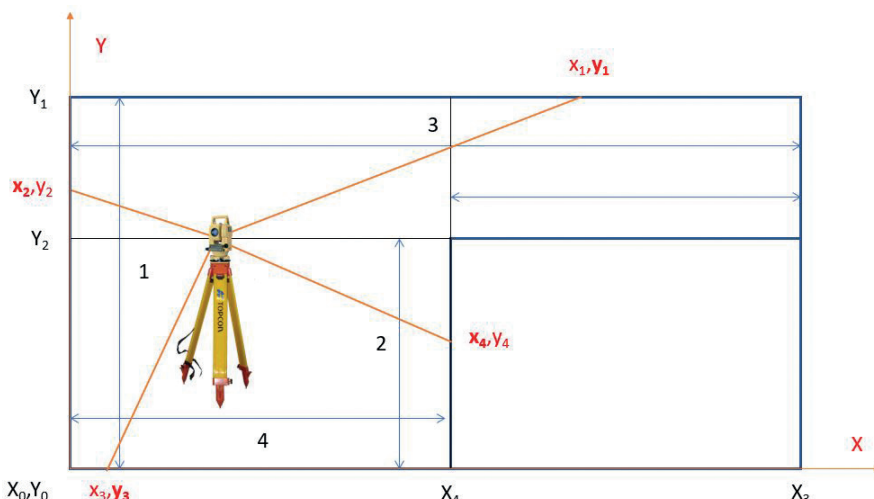


Figure 4. Exemple de mise en station sur base des cotations.

éléments dont on connaît les cotations et faire correspondre (figure 4) :

$X_1, Y_1$  avec la cote  $Y_1$   
 $X_2, Y_2$  avec la cote  $X_0$   
 $X_3, Y_3$  avec la cote  $Y_0$   
 $X_4, Y_4$  avec la cote  $X_4$

On peut dès lors écrire le système des équations d'observations comme en [7]

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ X_0 \\ Y_0 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & y_1 & -x_1 \\ 1 & 0 & x_2 & y_2 \\ 0 & 1 & y_3 & -x_3 \\ 1 & 0 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$$

$$L_{(4,1)} = A_{(4,4)} \cdot X_{(4,1)}$$

Et résoudre ce système d'équations par la méthode des moindres carrés si celui-ci est surdéterminé ou bien, comme dans cet exemple, directement :

$$\bar{X} = A^{-1} \cdot L$$

Dès lors les coordonnées et l'orientation de la station totale sont redéterminées dans le système des cotations et tout point relevé par la station totale se trouvera déterminé

dans ce système de coordonnées "projet".

L'intérêt maintenant est de pouvoir implanter ou contrôler de nouveaux points du projet dont on connaît les cotations avec la station totale.

Comme généralement en topographie, on mesure suffisamment de points pour se ménager un contrôle, voici ce à quoi notre exemple devrait ressembler en pratique (figure 5).

## Exemple numérique

Voici un exemple numérique basé sur deux cotations et huit mesures effectuées par une station totale capable de mesurer des distances sans réflecteurs. Il peut s'agir d'une pièce intérieure où l'on doit implanter des équipements repris sur un plan projet.

Nous disposons des coordonnées suivantes basées sur les gisements et

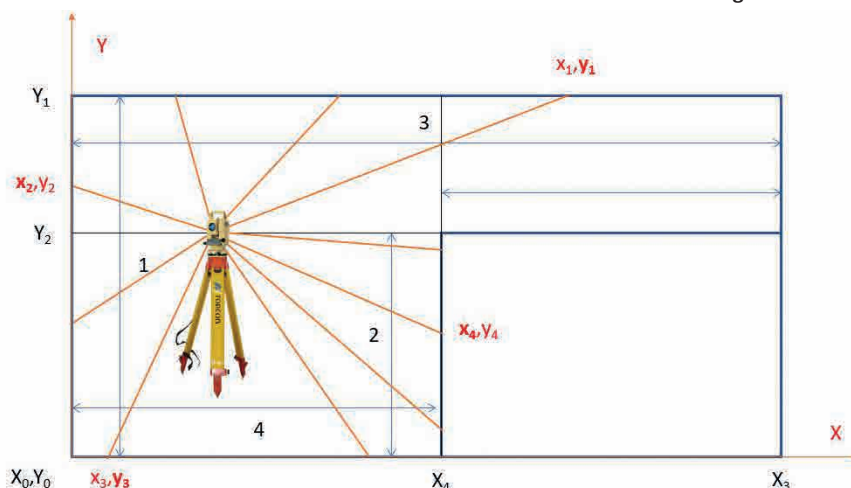


Figure 5. Exemple de mise en station sur base des cotations avec mesures surabondantes.

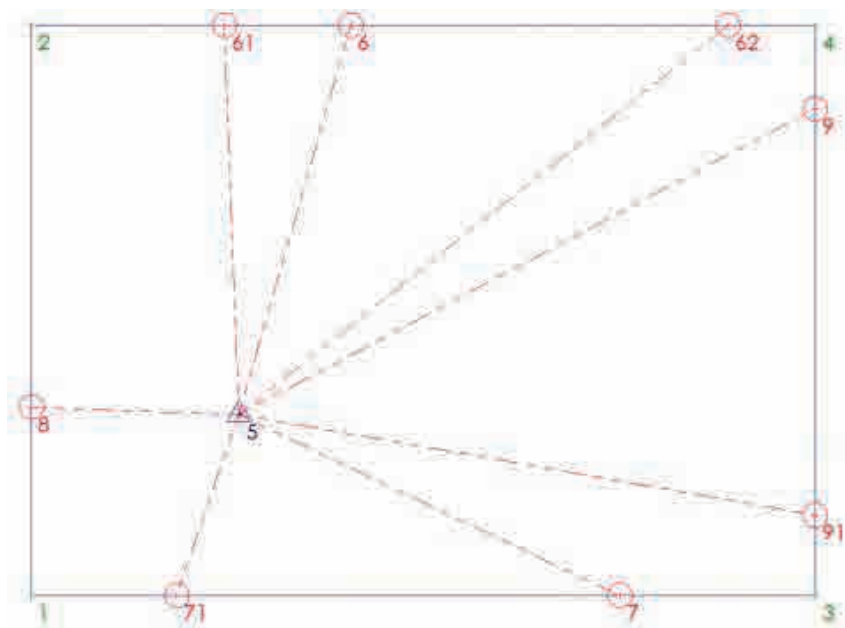


Figure 6. Exemple numérique.

les distances observées par une station totale dont les coordonnées de station sont  $x = 0.000$  et  $y = 0.000$  vers les points 6, 61, 62, 7, 71, 8, 9 et 91 et les deux cotes respectivement 20.952 m et 15.235 m.

$Y_6 = 15.235$	$y_6 = 23.234$
$Y_{61} = 15.235$	$x_{61} = 10.153$
	$y_{61} = 23.237$
$Y_{62} = 15.235$	$x_{62} = 23.623$
$X_9 = 20.952$	$y_{62} = 23.235$
$X_{91} = 20.952$	$x_9 = 25.951$
	$y_9 = 21.006$
$Y_7 = 0.000$	$x_{91} = 25.952$
$Y_{71} = 0.000$	$y_{91} = 21.006$
$X_8 = 0.000$	$x_7 = 20.723$
	$y_7 = 8.005$
	$x_{71} = 8.876$
	$y_{71} = 8.004$
	$x_8 = 5.007$
	$y_8 = 13.030$

$$x_6 = 13.537$$

Le modèle fonctionnel s'écrit :

$$\begin{bmatrix} 15.235 \\ 15.235 \\ 15.235 \\ 20.952 \\ 20.952 \\ 0.000 \\ 0.000 \\ 0.000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 23.234 & -13.537 \\ 0 & 1 & 23.237 & -10.153 \\ 0 & 1 & 23.235 & -23.623 \\ 1 & 0 & 25.951 & 8.166 \\ 1 & 0 & 25.952 & 10.159 \\ 0 & 1 & 8.005 & -20.723 \\ 0 & 1 & 8.004 & -8.876 \\ 1 & 0 & 5.007 & 13.030 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$$

$$L_{(8,1)} = A_{(8,4)} \cdot X_{(4,1)}$$

$$\tilde{x} = (A^T A)^{-1} \cdot A^T L$$

Soit :

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -5.008 \\ -8.008 \\ 1.00031 \\ -0.00003 \end{bmatrix}$$

avec  $a = -5.008$ ,  $b = -8.008$ ,  $k = 1.00031$  et  $\alpha = -0.00204$  gons

On peut calculer  $\alpha$  de deux façons différentes :

$$\cos \alpha_1 = \frac{c}{\sqrt{c^2 + d^2}} \text{ et } \sin \alpha_2 = \frac{d}{\sqrt{c^2 + d^2}}$$

Dans l'exemple, nous trouvons en grades  $\alpha_1 = 99.99796$  et  $\alpha_2 = 0.00204$  soit la somme de  $\alpha_1 + \alpha_2 = 100.00000$ . Le vecteur des résidus étant obtenu par  $V = A \cdot \tilde{x} - L$  et  $Q_{LL} = A Q_{\tilde{x}\tilde{x}} A^T$  et

$$V = \begin{bmatrix} 0.001 \\ -0.002 \\ 0.000 \\ 0.001 \\ 0.000 \\ 0.000 \\ 0.001 \\ -0.001 \end{bmatrix}$$

Une estimation du facteur de variance *a posteriori* est donné par  $s_0^2 = \frac{v^T v}{n-m}$  et de l'écart-type sur l'unité de poids *a posteriori*, soit  $\sigma_0 = \sqrt{s_0^2}$  qui est dans notre exemple  $\sigma_0 = 0.00128$ .

Les écarts-types sur les paramètres :

$$\begin{aligned} \sigma_a &= 0.002 \\ \sigma_b &= 0.002 \\ \sigma_c &= 0.00005 \\ \sigma_d &= 0.00010 \end{aligned}$$

## Détection des fautes

On utilise couramment chez CGEOS® une analyse formelle basée sur la méthode de test B du professeur Baarda [9] et dont les paramètres ici sont : Cette méthode vise à rendre aussi dépendants et sensibles deux tests d'hypothèses l'un à l'autre.

### Test d'hypothèse globale $H_0$

L'hypothèse nulle  $H_0$  contient toutes les hypothèses et les informations concernant la validité :

- du modèle fonctionnel  $A$  ;
- du modèle stochastique  $P, \sigma_0^2$  ;
- des observations  $L$ .

Le test consiste à comparer le rapport des variances empirique et théorique à une distribution de Fischer.

$$\text{Si } \frac{s_0^2}{\sigma_0^2} \leq F_{1-\alpha; r, \infty} \quad H_0 \text{ n'est pas rejetée}$$

$$\text{Si } \frac{s_0^2}{\sigma_0^2} > F_{1-\alpha; r, \infty} \quad H_0 \text{ est rejetée il faut considérer } H_a$$

### Test d'hypothèse alternative $H_a$

Comme les résidus standardisés suivent une loi normale réduite  $N(0, \sigma)$ , en posant :

$$w_i = \frac{|V_i|}{\sigma_{V_i}}$$

Les  $w_i^2$  auront une distribution de probabilité  $F_{1-\alpha_0; 1, \infty}$

Si  $\frac{|V_i|}{\sigma_{V_i}} > \sqrt{F_{1-\alpha_0; 1, \infty}}$  alors l'observation correspondante sera suspecte.

La probabilité de rejeter une bonne observation sera de  $\alpha$ .

Une faute d'observation unique pouvant entraîner le rejet de plusieurs observations à cause des corrélations existantes, ce sera en fait la plus grande valeur des  $w_i$  parmi celles qui sont rejetées qui indiquera l'observation correspondante à rejeter. Il s'agit d'une hypothèse conventionnelle alternative. En cas de plusieurs observations fautes, la procédure est recommencée après chaque rejet.

L'idée sous-jacente de la méthode du Professeur Baarda est donc d'établir une liaison fonctionnelle entre les deux tests.

$$\lambda_0 = \lambda(\alpha_0, \beta_0, 1, \infty) = \lambda(\alpha, \beta_0, r, \infty)$$

Dans notre exemple numérique, nous avons pour paramètres :

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.003 & \lambda &= 17.075 \\ \alpha_0 &= 0.1\% & \alpha &= 99\% \\ \beta_0 &= 80\% & F\text{-test} &= 3.40 \\ r &= 4 & T\text{-test} &= 3.29 \end{aligned}$$

On peut également étudier l'erreur marginale détectable au taux de 80 % qui est définie dans [9] comme :

$$EMD = \frac{\lambda \cdot \sigma_0}{\sqrt{P Q_{\tilde{v}\tilde{v}} P}}$$

C'est un paramètre très important et notamment dans les réseaux d'auscultation et d'étude des déformations



puisque, basé sur la configuration de celui-ci, on pourra déduire s'il sera capable de détecter des mouvements dont l'amplitude est supérieure à l'erreur marginale détectable. Dans notre exemple numérique, nous obtenons :

$$EMD = \begin{bmatrix} 0.025 \\ 0.012 \\ 0.014 \\ 0.012 \\ 0.012 \\ 0.014 \\ 0.013 \\ \mathbf{0.016} \end{bmatrix}$$

Si nous simulons une faute sur la dernière observation, qui dispose d'une  $EMD = 0,016$ , de 4 cm, soit  $X_g = 0.040$  au lieu de  $X_g = 0.000$ , nous constatons : L'écart-type sur l'unité de poids *a posteriori* devient  $\sigma_0 = 0,01091$ .

Le calcul en grades de  $\alpha_1 = 99,98988$  et de  $\alpha_2 = 0,01012$  soit la somme  $\alpha_1 + \alpha_2 = 99,97976$  ce qui dénote un défaut d'orthogonalité entre les axes.

Les valeurs des paramètres :

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -4.978 \\ -7.989 \\ 0.99936 \\ 0.00016 \end{bmatrix}$$

Les écarts-types sur les paramètres :

$$\begin{aligned} \sigma_a &= 0,015 \\ \sigma_b &= 0,014 \\ \sigma_c &= 0,00047 \\ \sigma_d &= 0,00083 \end{aligned}$$

On voit que  $H_0$  est rejeté :

$$F_{1-\alpha; r, \infty} = \frac{(0.01091)^2}{(0.003)^2} = 13.23 > 3.40$$

On engage donc l'hypothèse alternative  $H_a$  portant sur les résidus standardisés :

$$w = \frac{|V|}{\text{diag} \sqrt{Q_{VV}}} = \begin{bmatrix} 2.23 \\ 1.04 \\ 2.43 \\ 1.85 \\ 2.29 \\ 2.69 \\ 2.99 \\ \mathbf{4.13} \end{bmatrix}$$

Et comme le résidu standardisé de la dernière observation est  $4.13 > 3.29$  celle-ci est donc considérée comme fautive, ce qui est le cas.

Nous avons donc illustré comment le modèle fonctionnel d'une transformation sur un plan coté, pouvait non seulement nous apporter les paramètres de cette transformation, mais également qu'il était capable de détecter une faute commise dans les observations. Ces dernières étant les cotations d'un plan "projet".

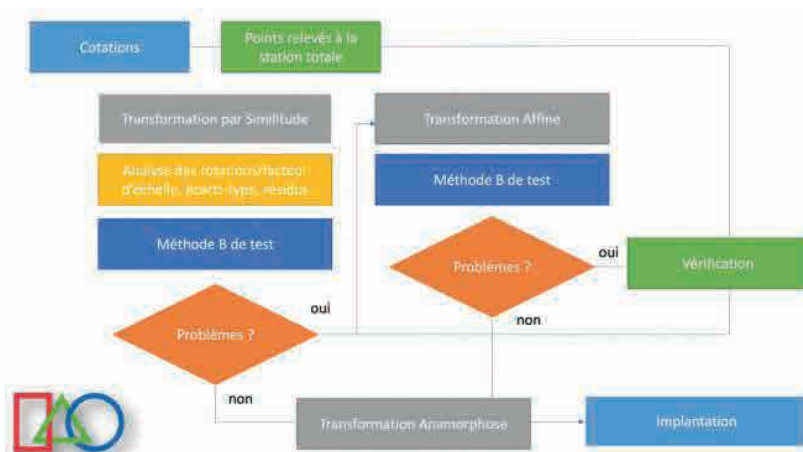


Figure 7. Procédure Contrôle de Qualité CGEOS®.

## Considérations

Le modèle fonctionnel d'une transformation sur un plan coté est démontré dans l'exemple numérique. On se base toutefois sur un plan "projet" réalisé pour déduire les points de "contrôle". La réalisation peut laisser apparaître évidemment des discordances et l'on ne saurait trop recommander de multiplier les mesures à la station totale pour prendre en compte cette réalité. On peut même, le cas échéant, changer de transformation et choisir le modèle de la transformation affine qui imposera un minimum de trois points connus au lieu de deux. Le modèle est linéaire et tout le développement présenté peut s'y adapter.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_p & y_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_p & y_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix}$$

Nous avons deux translations, deux rotations et deux facteurs d'échelle. En pratique, nous utilisons ces deux modèles de transformation pour retenir celui qui correspond le mieux à la réalité. Ensuite, nous appliquons une transformation par anamorphose pour "gommer" les résidus sur les points à implanter dans le système de coordonnées "projet".

Il faut souligner l'importance des mesures surabondantes, les stations totales actuelles nous laissent toute la facilité de le faire, l'analyse des résidus, les écarts-types des paramètres pour juger de leur signification ainsi que le facteur d'échelle qui, comme nous l'avons noté, traduit davantage une erreur d'orthogonalité des axes.

L'application de la méthode B de détection des fautes doit être adoptée, comme c'est le cas pour tous les problèmes d'ajustement, par la méthode des moindres carrés.

Comme nous travaillons généralement par entités (pièces), nous n'abordons pas les problèmes liés à l'extrapolation hors du cadre des "points projet" mais qui sont évidemment une problématique à considérer.

CGEOS® a développé un logiciel qui intègre toute cette approche. Il fonctionne sur une tablette Windows™ et se connecte par Bluetooth sur une station totale robotisée de la marque Topcon/Sokkia.

## Conclusion

L'utilisation d'une transformation par similitude dite de "Helmert" sur des points dont on ne dispose que d'une composante des coordonnées, permet d'apporter une solution élégante aux problèmes de mise en station dans le système de coordonnées d'un projet. Elle est suffisamment souple pour permettre d'autres combinaisons que nous n'avons pas évoquées. Elle autorise aussi, grâce au recours à la méthode des moindres carrés, de considérer davantage de mesures et donc de renforcer la fiabilité des paramètres estimés ainsi que de détecter des erreurs grossières. Nous espérons que cette nouvelle formulation de la transformation par similitude dite de "Helmert" rencontrera vos attentes en matière de maîtrise de la qualité de vos travaux en topométrie et géodésie et pourra être le point de départ de réalisations "libérées" du

classique couple de coordonnées. ●

## Références

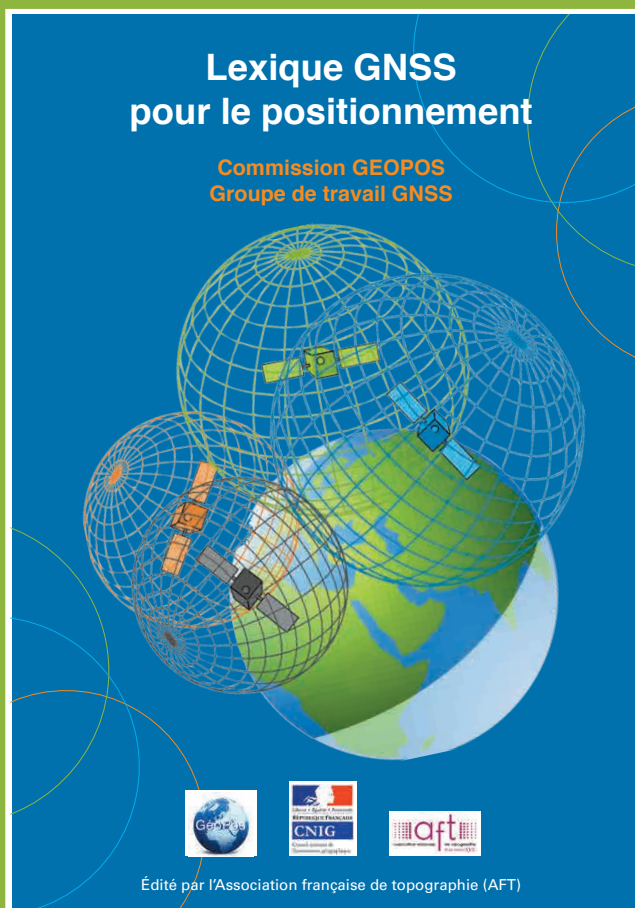
- [1] Analyse Procustéenne : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse\\_procustéenne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_procustéenne)
- [2] P.-L. Baetslé, *Bolletino di Geodesia e Scienze affini Anno XXXIII - n°2 - Aprile-Maggio-Giugno 1974*.
- [3] Charles D. Ghilani, *Adjustment Computations Sixth Edition*, Wiley 2018 p. 499 et suivantes
- [4] Edward M. Mikhail, *Observations and Least Squares*, University Press of America 1976 p. 201 et suivantes
- [5] Joshua S. Greenfeld, *Least Squares Weighted Coordinates Transformation Formulas and their Applications*. Journal of Surveying Engineering, November 1997, 123 p. 147-161
- [6] C. Marx, *A Weighted Adjustment of a Similarity Transformation between Two Points Sets Containing Errors*. J. Geod. Sci. 2017:105-112 De Gruyter Open
- [7] Frank Neitzel, *Generalization of Total Least Squares on Example of Unweighted and Weighted 2D Similarity Transformation*. Journal of Geodesy - December 2010
- [8] Marcin Ligas, *Point-Wise Weighted Solution for the Similarity Transformation Parameters*. Applied Geomatics 26 May 2020, Springer Verlag.
- [9] W. Baarda, *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks 1968*, Rijkscommissie voor Geodesie, Kanaalweg 4, Delft, Netherlands

## Contact

Nicolas van Cranenbroeck, Application Engineer CGEOS, Creative Geosensing SPRL Belgique  
[nico93cgeos@gmail.com](mailto:nico93cgeos@gmail.com)

## ABSTRACT

*In the usual practice of setting-out axes for buildings and civil engineering works, the surveyor has to determine the coordinates of its surveying total station based on the coordinate system adopted for the project in order to carry out the layout of construction points. The difficulty often lies in establishing these coordinates because only the dimensions of the architect's plans are available. This paper explains how to determine the coordinates of a Total Station using only dimensions.*



## 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 francophone 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](http://www.aftopo.org)**

# Galileo High Accuracy Service (HAS) ou le service de haute précision de Galileo

■ Bernard FLACELIÈRE

Deux fois par an, au printemps et en automne, les réunions, actuellement en mode hybride, du CNIG (Conseil national de l'information géolocalisée) réunissent les professionnels.

La dernière réunion du groupe de travail G&P (GNSS et positionnement) a eu lieu le 13 octobre 2022 à l'ENSG tandis que la réunion plénière de la commission GéoPos (Géopositionnement) s'est tenue le 14 octobre à l'IGN. Lors de la réunion du GT G&P, durant l'après-midi thématique, Ignacio Fernández-Hernández de la Commission européenne nous a présenté les aspects actuels et futurs du service de haute précision de Galileo (Current and future aspects of Galileo HAS).

Il est résumé ici les faits marquants de cet exposé. Bientôt, vous pourrez vous positionner en temps réel avec une précision décimétrique en utilisant la constellation Galileo et un récepteur compatible.

## ■ MOTS-CLÉS

GNSS, Galileo, corrections, temps réel, positionnement ponctuel précis, PPP.








	Service Level 1 (SL1)	Service Level 2 (SL2)
 Coverage	Global	European Coverage Area (ECA)
 Corrections	Orbit, clock, biases (code and phase)	Orbit, clock, biases (code and phase) + atmospheric corrections
 Horizontal Accuracy (95%)	<20cm	<20cm
 Vertical Accuracy (95%)	<40cm	<40cm
 Converge Time	<300s	<100s
 Availability	99%	99%
 User HelpDesk	24/7	24/7

Figure 1. Performances cibles pour Galileo HAS niveau de service 1 (SL1) et niveau de service 2 (SL2).

## Qu'est-ce que Galileo HAS ?

Le service Galileo HAS (*High Accuracy Service*), service de haute précision, fournit gratuitement des corrections de positionnement ponctuel précis (PPP) de haute précision par le biais du signal Galileo (E6-B) et par des moyens terrestres (Internet). Le HAS de Galileo offre aux utilisateurs des performances de positionnement améliorées en temps réel avec une précision inférieure à deux décimètres (dans des conditions nominales).

Les principales caractéristiques de Galileo HAS sont les suivantes :

- les corrections HAS : les corrections de haute précision intéressent les orbites, les horloges, le code et les biais de phase pour chaque satellite ; le service complet HAS inclura également les corrections atmosphériques ;
- accessibilité : les corrections de haute précision seront accessibles par deux canaux de diffusion : E6-B *Signal in*

*Space* (SiS) et un lien terrestre, qui fournit une source alternative au SiS via l'Internet ;

- multiconstellation et multifréquence : les corrections de haute précision sont calculées pour les signaux Galileo E1/E5a/E5b/E6, E5 AltBOC et GPS L1/L5, L2C ;
- le format ouvert : les corrections de haute précision suivent un format similaire à celui de la *Compact-State Space Representation* (CSSR).

## Niveaux de service HAS de Galileo

Deux niveaux de service sont définis pour la fourniture de corrections PPP de haute précision :

- le niveau de service 1 (SL1) : avec une disponibilité de couverture mondiale, il fournit des corrections de haute précision (orbites, horloges) et des biais (code et phase) pour les signaux

Galileo E1/E5b/E5a/E6 et E5AltBOC et GPS L1/L5/L2C ;

- le niveau de service 2 (SL2) : avec une disponibilité de couverture régionale, sur la zone de couverture européenne (ECA), il fournit des corrections SL1 plus des corrections atmosphériques (au moins ionosphériques) et des biais supplémentaires potentiels.

Les performances cibles pour SL1 et SL2, à pleine capacité de service, sont présentées en figure 1. Les tests récents effectués en Europe ont montré des précisions horizontales à 95 % de niveau de probabilité de l'ordre de 0,1 m et verticales également à 95 % de 0,2 m.

## Architecture de haut niveau de Galileo HAS

La génération, la fourniture et l'exploitation de corrections de haute précision

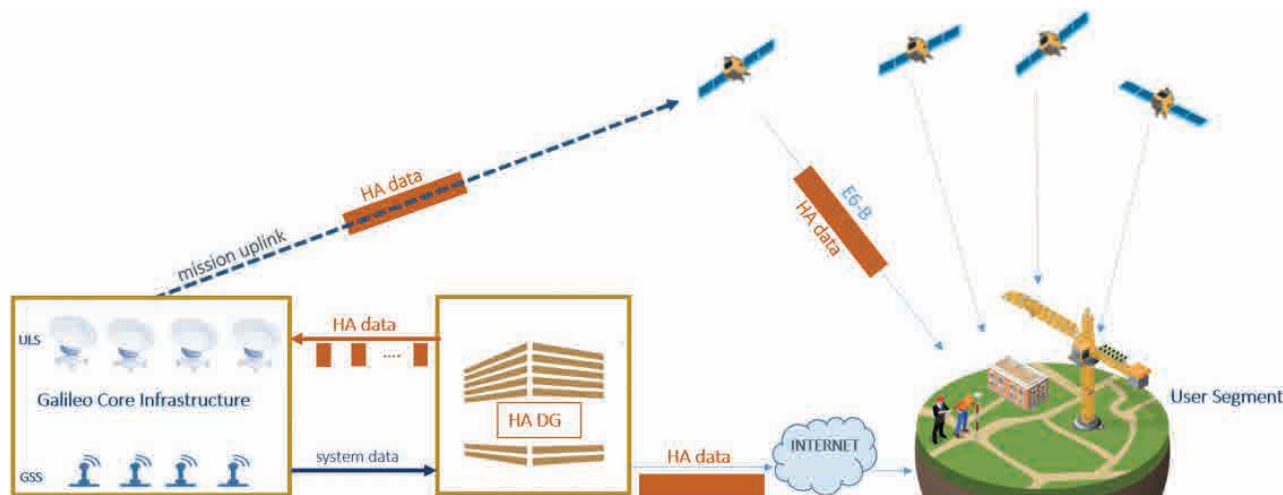


Figure 2. Les éléments du système Galileo impliqués dans la génération, la fourniture et l'exploitation de la HAS Galileo.



font intervenir plusieurs éléments du système Galileo (figure 2) :

- le module générateur de données de haute précision (High Accuracy Data Generator HADG) reçoit des données des stations de détection Galileo (Galileo Sensor Stations GSS) et génère des corrections pour Galileo et le GPS ; les corrections de haute précision (High Accuracy HA) sont relayées en temps réel à l'infrastructure centrale de Galileo ;
- l'infrastructure centrale de Galileo reçoit les données HA et compile les informations en un seul message de 448 bits par seconde et par satellite connecté ;
- l'infrastructure centrale Galileo, par l'intermédiaire des stations de liaison montante (Uplink Stations ULS), télécharge les données HA vers les satellites ;
- les satellites Galileo diffusent les données HA par le biais du composant de signal Galileo E6-B ;
- les données HA sont également fournies par la liaison terrestre, accessible aux utilisateurs via l'Internet ;

– les récepteurs des utilisateurs mettent en œuvre des algorithmes PPP (Precise Point Positioning), ou positionnement ponctuel précis, pour appliquer des corrections HA aux données de navigation du service ouvert reçues par le signal E1-B.

### Feuille de route de Galileo HAS

La mise en œuvre de la HAS de Galileo suit une approche échelonnée basée sur les trois phases décrites dans la figure 3. La phase 1, service initial, est valide dès 2022 tandis que la phase 2, service complet, est prévue être opérationnelle en 2024.

### De quoi ai-je besoin pour utiliser le HAS de Galileo ?

Vous aurez besoin d'un récepteur compatible Galileo capable de décoder les messages E6 ou, alternativement, d'une connexion Internet à la liaison terrestre Galileo HAS et, dans les deux cas, utiliser un algorithme PPP approprié. ●

### Pour en savoir plus

<https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>

### Note technique sur Galileo HAS

[https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo\\_HAS\\_Info\\_Note.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_HAS_Info_Note.pdf)

### Note technique sur le signal E6B/C dans l'espace.

[https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/E6BC\\_SIS\\_Technical\\_Note.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/E6BC_SIS_Technical_Note.pdf)



### Pour mieux connaître le CNIG (Conseil national de l'information géolocalisée)

Le site Internet : <http://cnig.gouv.fr/>

La commission Géopos (Géopositionnement) : [http://cnig.gouv.fr/?page\\_id=665](http://cnig.gouv.fr/?page_id=665)

Son président : Pierre Briole, ENS, son secrétaire : Charles Velut, IGN

Le groupe de travail G&P (GNSS et positionnement) : [http://cnig.gouv.fr/?page\\_id=12592](http://cnig.gouv.fr/?page_id=12592)

Son président : Paul Chambon, Teria, son secrétaire : Sébastien Saur, IGN

### ABSTRACT

At the last CNIG GNSS & Positioning WG meeting, during the thematic afternoon, the current and future aspects of Galileo HAS (High Accuracy Service) have been presented. The highlights are summarized in this paper. Soon you will be able to position yourself in real time according to an accuracy within the decimeter level using Galileo constellation, compatible receiver and PPP algorithm.

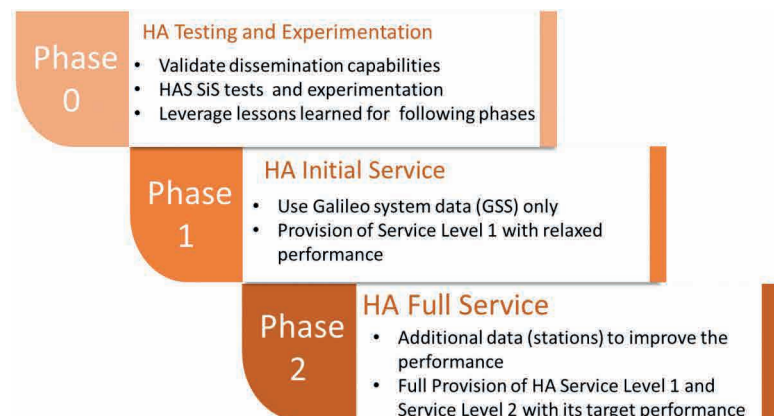
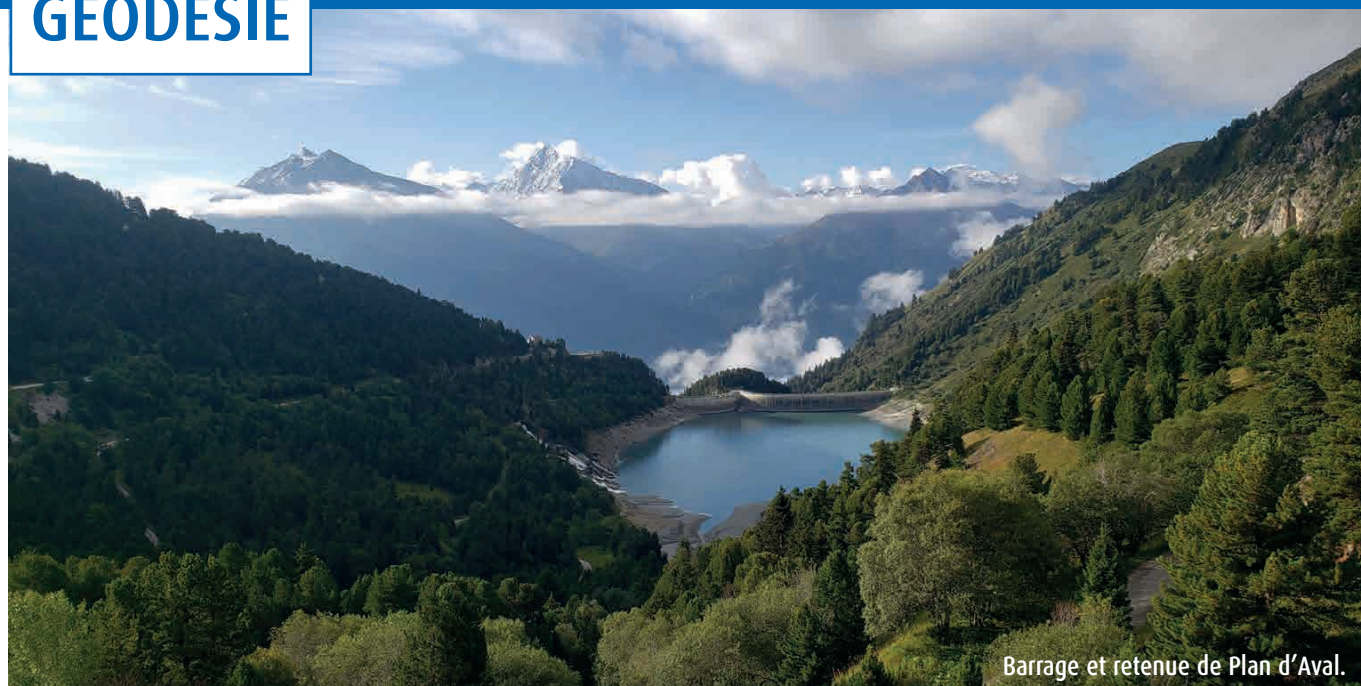


Figure 3. Mise en œuvre de la feuille de route de Galileo HAS.



Barrage et retenue de Plan d'Aval.

# Détermination de la déviation de la verticale sur le barrage de Plan d'Aval, sans aucune instrumentation spéciale, avec une précision de 0,4 mgon

■ Thomas TOUZÉ

*Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode de détermination de la déviation de la verticale à partir de mesures tachéométriques corrigées de la réfraction et de lignes de base GNSS. Si l'état de l'art est bien respecté, une précision de l'ordre de 0,3 mgon (1'') sur une visée de 1 km semble tout à fait atteignable. Nous présentons ainsi les résultats obtenus lors de la surveillance de deux barrages EDF dans les Alpes ayant permis de déterminer la déviation de la verticale avec une incertitude à 68 % de 0,4 mgon (1.3'') et en cohérence avec la valeur déduite du géoïde.*

## MOTS-CLÉS

Déviation de la verticale, techniques terrestres de la géodésie

## Un mot sur les unités angulaires

La déviation de la verticale est, avec la cote du géoïde, l'une des clefs de voûte des techniques terrestres de la géodésie, à cheval entre la géodésie physique et la topométrie. Dans la première, les angles sont majoritairement définis en degrés sexagésimaux tandis que la seconde – en dehors de la communauté anglo-saxonne – emploie majoritairement les gons (anciennement grades ou gr). Notre objectif étant de réhabiliter la déviation de la verticale auprès des topographes, nous avons choisi d'utiliser exclusivement dans cet article les gons et sous-unités décimales. Nous utiliserons également le terme de cc (centième de centième) employé en Suisse tel que  $1 \text{ cc} = 1 \text{ dmgr} = 0,1 \text{ mgon}$ .

## Introduction

Dans notre article [1] publié dans le XYZ n° 171, après avoir étudié l'influence de la déviation de la verticale sur les formules de réduction des distances à l'ellipsoïde, nous avons affirmé – sans démonstration – qu'il était possible, à partir de ces formules, d'obtenir une nouvelle méthode de détermination de la déviation de la verticale à partir d'observations GNSS et tachéométriques. Dans cet article, nous allons, dans un

premier temps, montrer comment cette relation peut s'obtenir. Dans un second temps, nous montrerons comment elle peut être utilisée en pratique en l'illustrant par un chantier d'EDF DTG, en l'occurrence le contrôle de la dénivelée entre les barrages de Plan d'Amont et Plan d'Aval en 2020.

Dans un dernier temps, nous estimerons l'incertitude de ce résultat à partir de laquelle nous réfléchirons à la valeur ajoutée de cette méthode ainsi qu'à ses limites actuelles.

## La déviation de la verticale depuis la réduction des distances

### Notations

Plaçons-nous dans le cadre de la figure 1. Soit deux points distincts à la surface de la Terre A et B, suffisamment proches l'un de l'autre pour que l'ellipsoïde de référence soit assimilable à une sphère de rayon R et de centre C.

Dans tout l'article, nous considérerons les notations suivantes :

- R : Rayon de courbure de l'ellipsoïde de référence dans le plan de la visée de A à B ;
- $\alpha$  : Azimut géodésique de la visée de A à B ;
- $\beta$  : Angle au centre de la Terre de la visée ;
- c et l : Respectivement corde et arc d'ellipsoïde de A à B ;
- $h_A$  et  $h_B$  : Hauteurs ellipsoïdales des points A et B ;
- $\Delta h = h_B - h_A$  : Différence de hauteur ellipsoïdale de A à B ;
- D : Distance inclinée de A à B ;
- $\zeta$  : Angle en A entre la normale à l'ellipsoïde et la visée ;
- $\zeta^*$  : Angle zénithal vrai (corrigé de la réfraction) ;
- $d^* = D \sin \zeta^*$  : La distance horizontale ;
- I et S : Hauteurs, respectivement, d'instrument et de prisme.

Ajoutons, en figure 2, la direction de la verticale locale en A et l'angle zénithal  $\zeta^*$  de la visée de A à B. La différence  $\theta$  entre  $\zeta$  et  $\zeta^*$  correspond à l'écart angu-

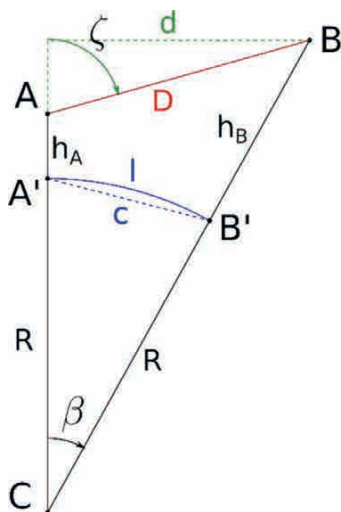


Figure 1. Schéma général de la réduction à l'ellipsoïde de la distance inclinée.

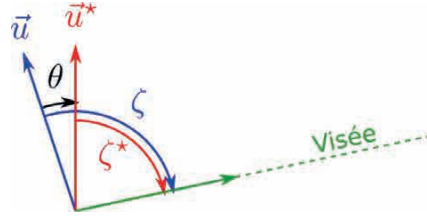


Figure 2. Normale à l'ellipsoïde u et verticale locale  $u^*$ , ainsi que les angles respectifs  $\zeta$  et  $\zeta^*$  définissant la visée.

laire entre les projections, dans le plan de la visée, de la normale à l'ellipsoïde et la verticale locale. C'est l'effet de la déviation de la verticale sur notre visée de A à B. Cet angle s'exprime en fonction des composantes est et nord de la déviation de la verticale, respectivement notés  $\eta$  et  $\xi$ , et de l'azimut  $\alpha$  selon la formule suivante ([2] chap. 5 formule 34) :

$$\theta = \zeta - \zeta^* = \eta \sin \alpha + \xi \cos \alpha$$

### Formulaire de réduction des distances

À l'aide de la loi des cosinus dans la figure 1, il est possible de démontrer que la corde de l'ellipsoïde c respecte la relation suivante :

$$c^2 = \frac{D^2 - \Delta h^2}{\left(1 + \frac{h_A}{R}\right) \left(1 + \frac{h_B}{R}\right)}$$

De plus, nous pouvons aisément établir, par trigonométrie dans la figure 1, que :

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{c}{2R}$$

Ainsi que  $\sin \beta = \frac{D \sin \zeta}{R + h_B}$

Soit un angle x. On sait que

$$\begin{aligned} \sin 2x &= 2 \sin x \cos x \\ &= \pm 2 \sin x \sqrt{1 - \sin^2 x} \end{aligned}$$

En appliquant ce résultat pour  $x = \beta/2$ , puis en l'élevant au carré, nous obtenons

$$\sin^2 \beta = 4 \sin^2 \frac{\beta}{2} \left(1 - \sin^2 \frac{\beta}{2}\right)$$

C'est-à-dire

$$\frac{D^2 \sin^2 \zeta}{(R + h_B)^2} = \frac{c^2}{R^2} \left(1 - \frac{c^2}{4R^2}\right)$$

Si nous appliquons un développement de Taylor à l'ordre 1 sur  $\sin^2 \zeta$ , nous obtenons

$$\sin^2 \zeta \approx \sin^2 \zeta^* (1 + 2\theta \cot \zeta^*)$$

### Résultat

En combinant nos deux derniers résultats, en substituant à c son expression

et en introduisant la distance horizontale  $d^*$ , nous pouvons établir que

$$\theta \approx \frac{\tan \zeta^*}{2} \left( \frac{D^2 - \Delta h^2}{d^{*2}} \left( 1 + \frac{\Delta h}{R + h_A} - \frac{D^2 - \Delta h^2}{4(R + h_A)^2} \right) - 1 \right)$$

Vu la grandeur du rayon de la Terre par rapport aux autres quantités, nous pouvons raisonnablement simplifier cette expression pour obtenir, in fine

$$\theta \approx \frac{\tan \zeta^*}{2} \left( \frac{D^2 - \Delta h^2}{d^{*2}} \left( 1 + \frac{\Delta h}{R} \right) - 1 \right)$$

Pour permettre au lecteur d'éviter un écueil sur lequel nous nous sommes temporairement échoués, le terme  $\Delta h/R$  ne doit pas être négligé. De ce résultat, nous pouvons déduire les expressions des dérivées partielles suivantes, qui serviront à la propagation des incertitudes.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \zeta^*} = -(1 + 2\theta \cot 2\zeta^*)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial D} = \frac{\tan \zeta^*}{2} \frac{\Delta h^2}{d^{*2}} \left( 1 + \frac{\Delta h}{R} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \Delta h} = \frac{\tan \zeta^*}{2} \left( \frac{D^2 - \Delta h^2}{R d^{*2}} - \frac{2\Delta h}{d^{*2}} \left( 1 + \frac{\Delta h}{R} \right) \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = -\frac{\Delta h \tan \zeta^*}{2R^2} \frac{D^2 - \Delta h^2}{d^{*2}}$$

## Mesures des barrages de Plan d'Amont et de Plan d'Aval

Les barrages de Plan d'Amont et de Plan d'Aval sont situés à proximité de la commune d'Aussois en Savoie. En septembre 2020, du fait d'une bathymétrie prévue sur la retenue de Plan d'Aval,



Figure 3. Visée réciproque entre les barrages de Plan d'Amont et de Plan d'Aval.



il a été nécessaire de densifier le réseau de points connus dans ce secteur. Ce fut l'occasion de contrôler la dénivellée entre les deux barrages successifs à l'aide de visées réciproques simultanées, telles que décrites dans [3], entre les points AVA102 et AMO101 (*figure 3*). La densification des points de référence ayant été faite par GNSS statique pendant une nuit entière, nous disposons donc de 17 h d'observations sur cette ligne de base.

### Résultat des traitements des visées réciproques simultanées

En nous appuyant sur la méthode décrite dans [3], nous avons effectué une combinaison de visées réciproques quasi simultanées et de visées simultanées quasi réciproques de la manière suivante :

- mise en place de points temporaires AVA102.1 et AMO101.1 à quelques mètres des points respectifs AVA102 et AMO101 ;
- visées depuis AVA102 vers AVA102.1 et AMO101 ;
- visées simultanées quasi réciproques de AVA102 vers AMO101.1

et de AMO101 vers AVA102.1 (*voir la figure 4*) ;

- visées depuis AMO101 vers AMO101.1 et AVA102.

Ce mode opératoire permet d'encadrer les visées simultanées quasi réciproques par les visées rigoureusement réciproques, mais décalées dans le temps d'une dizaine de minutes (quasi simultanées). De cette manière, en moyennant les dénivellées, nous pouvons contrôler l'absence de biais dus aux variations du coefficient de réfraction dans le temps et dans l'espace.

À l'aide de toutes ces mesures tachéométriques, répétées trois fois et dans les deux positions de la lunette, il a été possible de calculer la dénivellée de AVA102 à AMO101 en moyennant celles issues des visées réciproques quasi simultanées ainsi que des visées simultanées quasi réciproques.

Connaissant cette dénivellée, corrigée de la réfraction, nous avons pu en déduire, pour chaque visée, l'angle zénithal vrai corrigé de la réfraction. Les résultats de ces corrections sont visibles en *tableau 1*.

Station	Visée	I [m]	S [m]	D [m]	$\zeta^*$ [gon]	d* [m]
AVA102	AMO101	1.706	1.622	1180.854	92.9837	1173.689
AMO101	AVA102	1.622	1.706	1180.855	107.0280	1173.667

**Tableau 1.** Mesures corrigées issues des visées réciproques simultanées entre AMO101 et AVA102. Les angles zénithaux sont ici corrigés de la réfraction.

Points	E [m]	N [m]	h [m]	$\Delta E$ [m]	$\Delta N$ [m]	$\Delta h$ [m]
AVA102	992023.568	6467430.615	2002.780			
AMO101	991849.146	6468590.035	2132.891	-174.422	1159.420	130.111

**Tableau 2.** Résultat du post-traitement de la ligne de base AVA102 - AMO101. Les coordonnées sont exprimées dans le système RGF 93 en projection Lambert 93 et en hauteurs ellipsoïdales.

Station	Visée	$\gamma$ [gon]	V [gon]	$\alpha$ [gon]
AVA102	AMO101	3.0020	390.4940	393.4961
AMO101	AVA102	3.0008	190.4940	193.4948

**Tableau 3.** Azimuts géodésiques des visées AVA102 vers AMO101 et réciproquement déduites des coordonnées projetées RGF 93 Lambert 93.

Station	Visée	$\nu$ [m]	$\rho$ [m]	$\alpha$ [gon]	R [m]
AVA102	AMO101	6397602	6393621.0	393.4961	6393662.4
AMO101	AVA102	6397602	6393621.0	193.4948	6393662.4

**Tableau 4.** Calculs du rayon de courbure de l'ellipsoïde GRS80 selon les deux visées réciproques.

### Résultats des mesures GNSS

Parmi tous les points mesurés, nous n'avons retenu que la ligne de base nous intéressant et nous l'avons post-traitée en statique à l'aide du logiciel *Trimble Business Center*. Les coordonnées du point AVA102 ont été obtenues à l'aide des stations permanentes du RGP les plus proches. Celles d'AMO101 s'appuient sur AVA102 et du vecteur les reliant.

### Azimut et rayon de courbure

De ces coordonnées en RGF 93 en projection Lambert 93, nous pouvons déduire le gisement V de AVA102 vers AMO101 ainsi que les convergences du méridien  $\gamma$  de notre projection en ces deux points. Cela permet d'obtenir les azimuts géodésiques  $\alpha$  dans le *tableau 3*. De la même manière, à l'aide des formules de géodésie géométrique en [4], nous pouvons calculer les rayons de courbure extrema de l'ellipsoïde en chacun de nos deux points, puis en déduire le rayon de courbure pour chacune des deux visées. Les notations  $\nu$  et  $\rho$  sont ici conforme à [4].

### Estimation de la déviation de la verticale

Désormais, nous disposons de presque tous les éléments nécessaires à l'application de notre formule. Il ne nous reste qu'à calculer la différence de hauteur ellipsoïdale du centre optique du tachéomètre en AVA102 vers le centre optique du prisme en AMO101. Il suffit de corriger la différence de hauteur GNSS des hauteurs d'instrument et de prisme.

### Résultats

Dans le *tableau 6*, nous exposons les valeurs de déviations de la verticale, avec les dérivées partielles, sur les visées réciproques de AVA102 vers AMO101. Nous obtenons une déviation de 21,4 cc. Nous remarquons avant tout que les déviations calculées aux deux extrémités sont de signes opposés et d'amplitudes égales. Le premier fait s'explique par la définition de  $\theta$  qui est l'effet de la déviation de la verticale sur une visée d'azimut donné. La déviation de la visée réciproque doit nécessairement être de signe opposé.



**Figure 4.** Comment fonctionne ce fichu talkie-walkie ? Préparation des visées réciproques.

L'égalité des amplitudes est anormale et un peu subtile. Du fait des ondulations des surfaces équipotentielles de pesanteur, les composantes est et nord de la déviation de la verticale varient dans l'espace. Ainsi, de AVA102 à AMO101, il existe une variation de la déviation de la verticale. Si nous avions disposé des angles zénithaux vrais, notre modèle aurait – en toute vraisemblance – correctement restitué les déviations de la verticale aux deux extrémités de notre visée réciproque. Dans cet exemple, pour nous approcher au mieux de ces angles vrais, nous avons utilisé les angles corrigés de la réfraction en moyennant des visées réciproques. Ces moyennes, de fait, imposent une symétrie, non seulement sur le coefficient de réfraction, mais aussi sur la déviation de la verticale. Ce lien profond

entre la réfraction et les déterminations tachéométriques de la déviation de la verticale avait déjà été mis en évidence par Featherstone et Rüeger dans [5]. Ce fait pourrait vraisemblablement être surmonté en mesurant le profil de température de AVA102 à AMO101 afin d'appliquer la méthode de correction de la réfraction que nous avons proposée dans [6].

L'étude des dérivées partielles nous permet de déduire qu'une erreur de 1 cc sur la déviation de la verticale peut être due à des erreurs approximativement de 1 cc sur l'angle zénithal, de 20 mm sur la distance inclinée, de 2 mm sur la différence de hauteur et de 100 km sur le rayon de la Terre. Nous constatons que les mesures les plus critiques pour la qualité de la détermination de la déviation de la verticale sont ici l'angle

zénithal, puis la différence de hauteur ellipsoïdale.

En étudiant les résultats et les formules définissant les dérivées partielles, nous pouvons déduire qu'à courte distance, la principale limite sur la précision atteignable sera due à la différence de hauteur. En effet, il semble difficile d'espérer une précision meilleure que quelques millimètres sur cette quantité. Dès lors, pour que l'effet angulaire soit négligeable, il faut que la distance soit longue. *A contrario*, sur de longues distances, le paramètre limitant la précision atteignable sera l'angle zénithal du fait des effets de la réfraction augmentant au carré de la distance horizontale [3]. Même l'emploi soigneux de visées réciproques simultanées sur de longues visées risque de laisser passer suffisamment de bruit résiduel pour dégrader significativement l'estimation de la déviation de la verticale.

Forts de ces constats, il semble que cette nouvelle méthode permettant de déterminer la déviation de la verticale soit appropriée pour des visées de l'ordre de 1 km  $\pm$  300 m. De plus amples expériences seraient souhaitables pour affiner ces conclusions.

### ■ Propagation des incertitudes

Vu la longueur de la ligne de base, en l'occurrence 1,2 km, la durée de la session, à savoir 17 h et la dénivelée modérée de 130 m, nous estimons

Station	Visée	I [m]	S [m]	$\Delta h$ [m]	$\Delta h$ opt [m]
AVA102	AMO101	1.706	1.622	130.111	130.028
AMO101	AVA102	1.622	1.706	-130.111	-130.028

**Tableau 5.** Différences de hauteurs ellipsoïdales entre les centres optiques des instruments stationnés.

Station	Visée	$\theta$ [cc]	$d\theta / d\zeta$ [/]	$d\theta / dD$ [cc/mm]	$d\theta / d\Delta h$ [cc/mm]	$d\theta / dR$ [cc/km]
AVA102	AMO101	-21.4	-1.0003	0.0598	-0.5426	-0.0091
AMO101	AVA102	21.4	-1.0003	-0.0597	-0.5426	-0.0091

**Tableau 6.** Déviation de la verticale et dérivées partielles de la visée de AVA102 vers AMO101, à partir des observations tachéométriques et GNSS.



l'incertitude, à 68 % soit 1 sigma, de la différence de hauteur ellipsoïdale à 5 mm. Les deux tachéomètres employés lors de cette expérience étaient des Leica TDA5005. Ces instruments ont des incertitudes de mesures, à 1 sigma, de 0,6 mm + 1 ppm pour les distances et 1,5 cc pour les angles. Les réflecteurs employés étaient des prismes de précision donnés à 0,3 mm. Ces prismes étaient montés sur des alidades de précision à nivelles toriques. Ainsi, pour une visée longue de 1,2 km, nous obtenons une incertitude sur la distance D de 1,8 mm. Sur une telle distance, l'effet angulaire de telles incertitudes de prismes ou de centrage devient négligeable, donc l'incertitude de l'angle zénithal dépend de l'erreur instrumentale et des effets résiduels de la réfraction. Vu la répétabilité et la reproductibilité à 1 mm de nos dénivelées, il semble conservatif d'estimer l'incertitude de l'angle zénithal corrigé de la réfraction à 3 cc.

Enfin, nous estimons très grossièrement l'incertitude du rayon de courbure de l'ellipsoïde à 1 km. Tout cela nous permet, par propagation des incertitudes, d'estimer l'incertitude à 1 sigma de notre détermination de la déviation de la verticale à 4,0 cc.

### ■ Déviation déduite de RAF18 au niveau du géoïde

Depuis les quatre points de la grille RAF18 les plus proches de notre site, l'ajustement d'une sphère a permis d'estimer les cotes du géoïde et les composantes est et nord des déviations de la verticale au niveau du géoïde sur les points AVA102 et AMO101. Nous obtenons les valeurs dans le *tableau 7*.

Nos résultats sont du même ordre de grandeur et les signes coïncident. Toutefois, nous remarquons qu'à la différence de nos résultats, les amplitudes des valeurs déduites de RAF18 ne sont pas égales, mais différent de 11,6 cc. En effet, les directions des verticales locales en ces deux points doivent être proches, certes, mais n'ont pas de raison d'être

identiques par rapport à leurs normales à l'ellipsoïde. L'amplitude moyenne déduite de RAF18 est de 22,6 cc ce qui est très proche de notre résultat de 21,4 cc. Ainsi, en considérant la déviation moyenne de la verticale sur la visée AVA102 – AMO101, l'écart entre notre détermination et celle déduite de RAF18 ne diffère que de 1,2 cc.

Vu les altitudes de nos points, de l'ordre de 2 000 m, il est normal que les amplitudes moyennes de la déviation de la verticale diffèrent de quelques cc du géoïde à la surface [5]. Cela étant, à moins d'organiser des mesures astro-géodésiques, il s'agit de la seule validation à notre portée.

### Conclusion

La déviation de la verticale, mal-aimée de la géodésie, ne pouvait jusqu'à présent être obtenue qu'à partir d'un modèle du champ de pesanteur ou d'observations astrogéodésiques. En partant des formules classiques de réduction des distances, nous avons trouvé une nouvelle voie ne requérant aucune instrumentation spéciale : deux tachéomètres et deux récepteurs GNSS suffisent. Dans l'exemple décrit, nous avons déterminé la composante de la déviation de la verticale dans le plan de la visée. Pour pouvoir estimer les composantes est et nord de la déviation de la verticale, il suffirait d'opérer de manière identique selon une visée idéalement perpendiculaire. Cette méthode est certes limitée en termes de précision atteignable, 4 cc dans notre cas, mais elle peut suffire pour nombre d'applications (voir des exemples dans [1] et [5]). Il semble que l'incertitude atteignable soit optimale pour des visées de l'ordre de 1 km. Pour de meilleures précisions, il faut recourir aux observations astrogéodésiques. Vu la nécessité de disposer avec une grande précision de l'angle zénithal corrigé de la réfraction, cette méthode de détermination de la déviation de la verticale doit faire suite, actuellement, aux visées réciproques

simultanées. Présentement, cela induit une symétrie rendant impossible de mettre en évidence les variations locales de la déviation de la verticale. En corrigeant la réfraction à partir de profils de température, cette symétrie pourrait disparaître, ce qui permettrait d'obtenir des valeurs plus justes de la déviation de la verticale. En attendant, il semble que cette méthode soit d'ores et déjà apte à déterminer la valeur moyenne, sur un chantier, de la déviation de la verticale. ●

### Contact

Thomas Touzé  
thomas.touze@edf.fr

### Références

- [1] *La déviation de la verticale, mal-aimée de la géodésie*, Thomas Touzé, 2022, XYZ n° 171.
- [2] *Cours de géodésie*, chapitre 5, Françoise Duquenne et Henri Duquenne, ESGT, 2003.
- [3] *N'ayez pas peur du coefficient de réfraction ! Première partie sur les enjeux de réfraction en nivellement trigonométrique*, Thomas Touzé & Matthieu Hansen, 2019, XYZ n° 158.
- [4] *Cours de géodésie*, chapitre 2, Françoise Duquenne et Henri Duquenne, ESGT, 2003.
- [5] *The Importance of Using Deviations of the Vertical for the Reduction of Survey Data to a Geocentric Datum*, Will E. Featherstone & Jean M. Rueger, 2000, Australian Surveyor volume 45.
- [6] *Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : utilisation concrète et simulations de levés bathymétriques au sonar multifaisceaux*, Thomas Touzé, 2022, XYZ n° 172.

### ABSTRACT

*In this paper, we propose a new method to determine the vertical deflection from refraction-corrected total station measurements and GNSS baselines. If the state of the art is well respected, an uncertainty of the order of 0.3 mgon (1'') on a 1 km long sight seems quite achievable. We thus present the results obtained during the monitoring of two EDF dams in the Alps that allowed to determine the vertical deflection with a 68% uncertainty of 0.4 mgon (1.3'') and in coherence with the value deduced from the geoid.*

Points	$\eta$ [cc]	$\xi$ [cc]	$\alpha$ [gon]	$\theta$ RAF 18 [cc]
AVA102	-12.7	-18.2	393.4961	-16.8
AMO101	-8.5	-29.4	193.4948	28.4

**Tableau 7.** Déviations de la verticale au niveau du géoïde déduites de RAF18.

# ITRF2020 : Un référentiel augmenté affinant la modélisation des mouvements non linéaires des stations

■ Zuheir ALTAMIMI - Paul REBISCHUNG - Xavier COLLILIEUX - Laurent MÉTIVIER - Kristel CHANARD

*Pour mieux décrire la forme de la surface de la Terre en constante déformation, la dernière réalisation du système international de référence terrestre (ITRF : International Terrestrial Reference Frame), l'ITRF2020, est fourni sous la forme d'un repère de référence terrestre augmenté qui modélise avec précision les mouvements non linéaires des stations, à savoir les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels) présents dans les séries temporelles de positions de stations ainsi que les déformations post-sismiques (PSD : Post-Seismic Deformation) des sites ayant subi d'importants tremblements de terre. Des solutions retraitées sous forme de séries temporelles de positions de stations et de paramètres d'orientation de la Terre basées sur l'historique complet des observations fournies par les quatre techniques géodésiques spatiales (DORIS, GNSS, télémétrie laser sur satellite (SLR) et interférométrie à très longue base (VLBI)) ont été utilisées, couvrant 28, 27, 38 et 41 années d'observations, respectivement.*

*L'origine à long terme de l'ITRF2020 suit linéairement avec le temps le centre des masses (CM) de la Terre tel que détecté par la technique SLR sur la période 1993.0-2021.0. L'exactitude de l'origine à long terme de l'ITRF2020 est évaluée, par comparaison aux solutions passées, à savoir ITRF2014, ITRF2008 et ITRF2005, au niveau de 5 mm, et 0,5 mm/an pour son évolution dans le temps.*

*L'échelle à long terme de l'ITRF2020 est définie par une moyenne pondérée rigoureuse des sessions VLBI sélectionnées jusqu'en 2013.75 et des solutions hebdomadaires SLR couvrant la période 1997.7-2021.0. Pour la première fois de l'histoire de l'ITRF, l'accord en échelle entre les solutions à long terme SLR et VLBI est de l'ordre de 0,15 ppb<sup>1</sup> (1 mm à l'équateur) à l'époque 2015.0, avec une dérive nulle. L'ITRF2020 a été officiellement publié le 15 avril 2022, sur le site web dédié : <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>. Un article détaillé est en cours de soumission au Journal of Geodesy (Altamimi et al., 2022).*

## Pourquoi un repère de référence terrestre ?

Les applications en sciences de la Terre solide et en géodésie opérationnelle ont nécessairement besoin de disposer d'un repère de référence terrestre mondial, en tant que référence unique, afin d'assurer l'interopérabilité et la cohérence des produits géodésiques et d'exploiter de façon optimale les différentes mesures recueillies par les capteurs au sol ou des satellites artificiels.

Le système international de référence terrestre (ITRS) et sa réalisation, le

repère international de référence terrestre (ITRF) sont ainsi recommandés par un certain nombre d'organisations scientifiques internationales, telles que l'Union astronomique internationale, et l'Union géodésique et géophysique internationale (IUGG 2007, 2019)<sup>1</sup>.

L'ITRF est aujourd'hui indispensable à de nombreuses applications en sciences

<sup>1</sup> 1 ppb = part per billion pour partie par milliard. 1 ppb d'écart en échelle équivaut à environ 6,4 mm à la surface de la Terre.

<sup>2</sup> <https://iugg.org/meetings/iugg-general-assemblies/#5776d8e80445797e0>

## MOTS-CLÉS

Systèmes de référence, ITRF2020

de la Terre : c'est la référence pour le positionnement sur laquelle s'appuie la détermination des orbites précises des satellites qui observent notre planète (à la fois pour les systèmes de navigation GNSS et les satellites altimétriques) ; il permet aux astronomes, géophysiciens et climatologues du monde entier d'étudier les déformations et les mouvements de la Terre. C'est enfin pour tous les passionnés de géodésie ou de l'évolution de notre planète, une source incontournable d'informations sur sa dynamique.

## La construction de l'ITRF2020

Les données en entrée du calcul de l'ITRF2020 ont été fournies sous forme de séries temporelles de positions journalières pour les stations d'observation GNSS et VLBI, et hebdomadaires pour les stations DORIS et SLR. La figure 1 illustre la répartition des 1 223 sites de l'ITRF2020 dont près de 10 % sont des sites de stations co-localisées avec deux, trois ou quatre techniques de mesure.

L'approche adoptée pour l'ITRF2020, matérialisant l'ITRS, est de fournir aux utilisateurs, pour chaque point du réseau, les éléments permettant de calculer sa position à tout instant en prenant en compte :

- sa vitesse de déplacement ;
- ses variations saisonnières (annuelles et semi-annuelles) ;
- des déplacements soudains liés à des séismes ou changements de matériel ;
- éventuellement des déformations post-sismiques.

Parmi un certain nombre d'innovations et d'améliorations de l'analyse, pour la première fois de l'histoire de l'ITRF, l'ITRF2020 a été déterminé

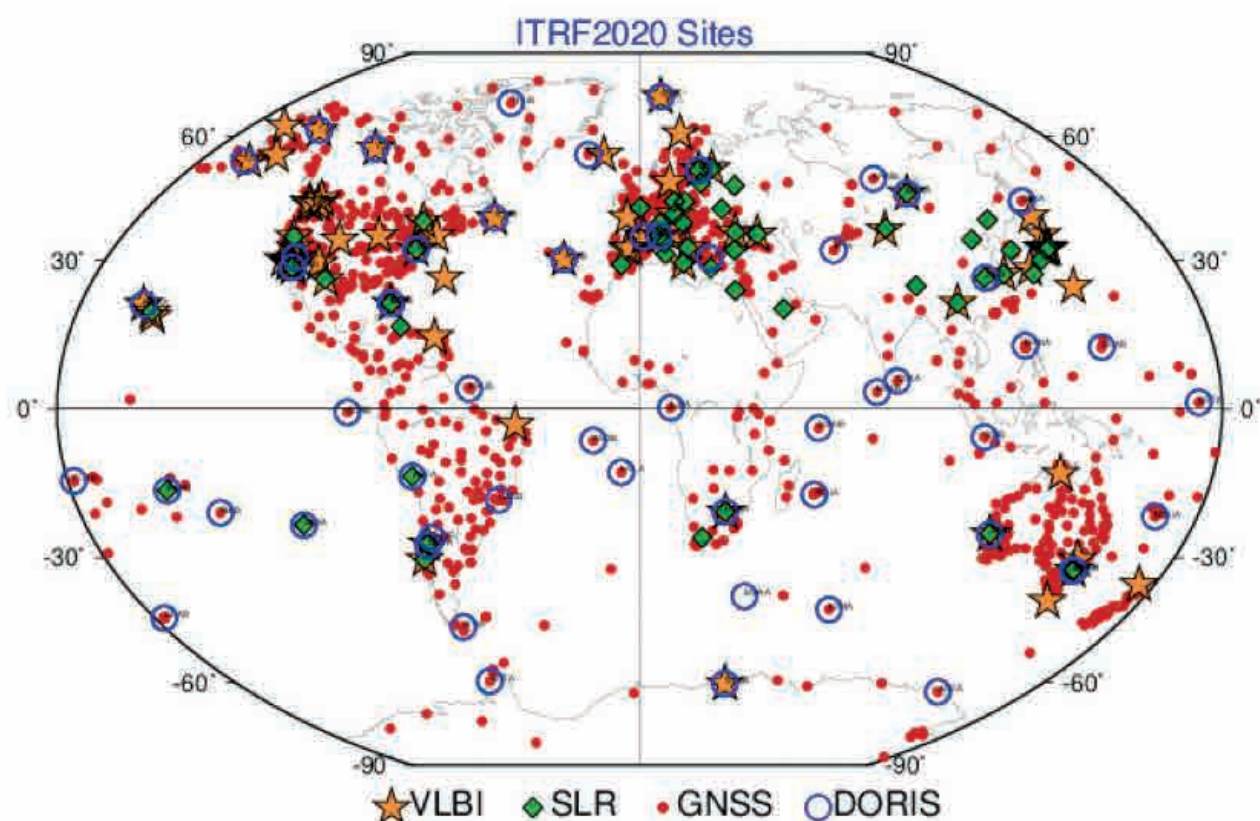


Figure 1. Répartition des 1 223 sites de l'ITRF2020 mettant en évidence les stations DORIS, SLR et VLBI co-localisées avec des stations GNSS.

par un cumul simultané des séries temporelles de positions des quatre techniques de géodésie spatiale, dont les liens sont assurés par l'ajout au sein des sites de co-localisation (sites avec plusieurs instruments de mesure) de rattachements géodésiques locaux, mais aussi de contraintes de co-mouvement (égalité des vitesses et des termes saisonniers).

Les positions des stations ITRF2020 sont ainsi obtenues à une époque de référence (2015.0), en même temps que leurs vitesses de déplacement linéaires, et que des fonctions sinusoïdales d'amplitude et de phase constantes décrivant les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels). Les modèles paramétriques des déformations post-sismiques sont déterminés en amont du cumul simultané, comme décrit brièvement dans le paragraphe suivant.

#### ■ Modélisation des déformations post-sismiques

Initiés lors du calcul de l'ITRF2014, des modèles empiriques de déformation post-sismique, basés sur des fonctions exponentielles et/ou logarithmiques ont

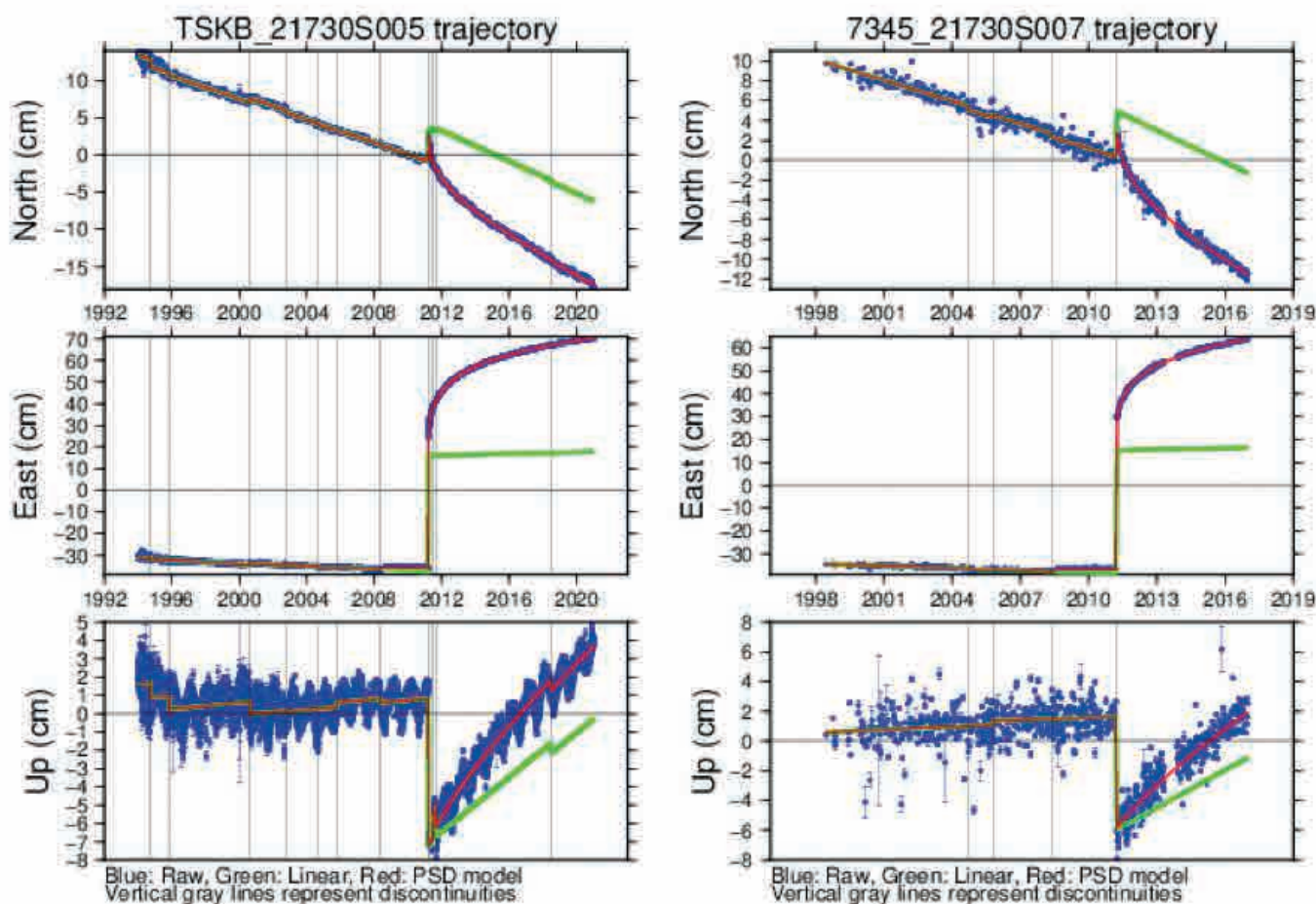
été développés et raffinés pour le calcul de l'ITRF2020. Différents modèles ont été ajustés aux séries temporelles de toutes les stations GNSS de l'ITRF2020 présentant des déformations post-sismiques significatives. Le modèle le plus approprié a été ensuite choisi au cas par cas à l'aide de critères statistiques. Les séries temporelles, non seulement des stations GNSS, mais aussi des stations co-localisées des trois autres techniques, ont finalement été corrigées de ces modèles avant le calcul final de l'ITRF2020. À titre d'illustration, la figure 2 montre la trajectoire de deux stations GNSS et VLBI co-localisées à Tsukuba (Japon) où l'on voit en bleu les séries temporelles brutes, en rouge le modèle paramétrique et en vert la trajectoire linéaire représentant la position régularisée de l'ITRF2020. Cette figure montre l'accord remarquable du modèle paramétrique avec la série GNSS, mais aussi VLBI.

#### ■ Modélisation des termes saisonniers

Il est très fréquent d'observer des signaux périodiques dans les séries

temporelles de coordonnées des stations fournies par les différentes techniques de géodésie spatiale pour la construction de l'ITRF, comme on peut le voir distinctement sur la composante verticale de la station GNSS à Tsukuba (Japon) de la figure 2.

Ces signaux sont en partie le reflet des effets de surcharges (hydrologique, atmosphérique et océanique) agissant sur la Terre solide, mais recouvrent aussi des erreurs systématiques des techniques elles-mêmes, telles que les erreurs draconitiques du système GPS (période de 351.4 jours au cours de laquelle la constellation satellitaire répète son orientation par rapport au soleil). La non-modélisation des signaux périodiques peut entraîner une imprécision sur les vitesses estimées allant jusqu'à 1 mm par an sur la composante verticale. Les signaux annuels et semi-annuels des séries temporelles de positions des stations des quatre techniques ont ainsi été modélisés par des fonctions sinusoïdales exprimées par rapport au centre des masses de la Terre (CM) tel que détecté par la technique SLR. Pour convenir à une classe plus



**Figure 2.** Séries temporelles de position d’une station GNSS (gauche) et d’une station VLBI (droite) enregistrées sur le site de Tsukuba (Japon). La série de positions brute est représentée en bleu, la trajectoire linéaire en vert, et le modèle paramétrique de déformation post-sismique en rouge.

large d’utilisateurs, les déplacements saisonniers par rapport au centre de figure de la Terre (CF) sont également fournis. La différence entre les signaux exprimés dans les deux repères (CM et CF) correspond au mouvement saisonnier du CM par rapport à CF, appelé mouvement du géocentre saisonnier.

### ■ Paramètres de définition de l’ITRF2020

L’origine long-terme est définie de telle sorte qu’il n’y ait pas de paramètre de translation à l’époque 2015.0, ni de dérive de translation entre l’ITRF2020 et le repère long-terme SLR sur la période 1993.0-2021.0.

L’origine des signaux saisonniers exprimés dans le repère du CM SLR est définie de telle manière qu’il n’y ait pas de translation saisonnière entre les signaux saisonniers ITRF2020 et les solutions SLR sur la période 1993.0-2021.0.

L’échelle long-terme est déterminée de telle sorte qu’il y ait une échelle et une dérive d’échelle nulles entre l’ITRF2020 et les moyennes d’échelle et de dérive d’échelle des sessions VLBI sélectionnées jusqu’en 2013.75 et des solutions hebdomadaires SLR couvrant la période 1997.75-2021.0. L’échelle des signaux saisonniers est déterminée de sorte qu’il n’y ait pas de variations d’échelle saisonnières entre les solutions SLR sélectionnées et l’ITRF2020.

L’orientation long-terme est définie de telle manière qu’il y ait des paramètres de rotation nuls à l’époque 2015.0 et des taux de rotation nuls entre l’ITRF2020 et l’ITRF2014. Ces deux conditions ont été appliquées sur un ensemble de 131 stations de référence réparties sur 105 sites.

L’orientation des signaux saisonniers est définie de manière à ce qu’il n’y ait pas de rotation saisonnière nette de ce même réseau de référence.

### ■ Usage des coordonnées ITRF2020

En fonction des besoins de l’utilisateur, les coordonnées cartésiennes géocentriques d’une station donnée peuvent être calculées en utilisant l’équation suivante :

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

où le couple  $(X(t_0), \dot{X})$  est la position à l’époque de référence  $t_0 = 2015.0$  et la vitesse,  $\delta X_{PSD}(t)$  est la somme totale des corrections PSD à l’époque  $t$ , et  $\delta X_f(t)$  la somme des termes saisonniers. Les modèles paramétriques de l’ITRF2020 sont une partie intégrante du repère et sont disponibles sur le site internet : <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>. Des informations complètes concernant les modèles PSD adaptés aux stations soumises à des tremblements de terre majeurs, et quelques sous-programmes utiles en Fortran sont aussi disponibles sur le site web de l’ITRF2020.





Les utilisateurs doivent être conscients qu'ils doivent calculer la somme totale des corrections  $\delta X_{PSD}(t)$ , à l'aide des équations fournies sur le site web ITRF2020, ainsi que dans l'article Altamimi et al. (2022). Ne pas introduire ce terme de l'équation (1) introduirait des erreurs de position décimétriques pour de nombreuses stations impactées par des déformations post-sismiques.

La principale motivation de l'estimation des signaux saisonniers cohérents avec l'ITRF2020 est de fournir aux utilisateurs, par exemple ceux traitant de la détermination des orbites précises des satellites, un moyen de rapporter les coordonnées ITRF2020 au CM quasi instantané de la Terre, le point autour duquel un satellite artificiel orbite naturellement. Pour utiliser cette nouvelle fonctionnalité, l'utilisateur doit calculer les variations de coordonnées saisonnières  $\delta X_f(t)$  à l'aide de l'équation (2) et les ajouter aux coordonnées de la station à l'époque  $t$ , à l'aide de l'équation (1).

$$\delta X_f(t) = \sum_{i=1}^2 \begin{pmatrix} a_x^i \\ a_y^i \\ a_z^i \end{pmatrix} \cos(2i\pi \cdot t) + \begin{pmatrix} b_x^i \\ b_y^i \\ b_z^i \end{pmatrix} \sin(2i\pi \cdot t)$$

où  $t$  est l'année décimale et

$(a_x^i, a_y^i, a_z^i, b_x^i, b_y^i, b_z^i)$  sont les coefficients de la fonction sinusoïdale à la fréquence  $i$  (annuelle :  $i = 1$  ; semi-annuelle :  $i = 2$ ).

## Paramètres de transformation entre l'ITRF2020 et les versions passées

Pour un certain nombre d'applications, les utilisateurs ont besoin des paramètres de transformation entre les différentes versions de l'ITRF. La liste des paramètres de transformation de l'ITRF2020 vers les versions passées est accessible via le site web de l'ITRF2020 : [https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020\\_TRFs.txt](https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020_TRFs.txt).

## Conclusion

Avec la publication de l'ITRF2020 en tant que repère de référence terrestre augmenté de fonctions paramétriques décrivant les mouvements non linéaires des stations, un grand pas a été franchi

dans l'amélioration du référentiel international. Les signaux saisonniers (annuels et semi-annuels), ainsi que les modèles paramétriques de déformations post-sismiques font partie intégrante du nouveau repère et permettent à l'utilisateur de déterminer une position plus fidèle des stations ITRF2020.

Les analyses approfondies des données de l'ITRF2020 ont abouti, pour la première fois, à un accord d'échelle entre SLR et VLBI à hauteur de 0,15 ppb (environ 1 mm à l'équateur) à l'époque 2015.0, sans dérive significative : une conclusion clé de l'analyse ITRF2020.

Les résultats de l'ITRF2020 montrent des améliorations modestes, mais notables en termes d'accord entre les rattachements terrestres locaux et les estimations de la géodésie spatiale sur les sites de co-localisation. Nous pensons toujours que la plus grande partie (sinon la totalité) de ces écarts est causée par des erreurs systématiques des techniques de géodésie spatiale plutôt que par les mesures terrestres. Améliorer la cohérence entre les deux ensembles ne pourra être possible sans améliorer l'infrastructure géodésique mondiale en investissant dans des technologies SLR et VLBI de nouvelle génération, avec une meilleure répartition entre les hémisphères nord et sud.

La maintenance et l'amélioration en continu de l'infrastructure géodésique mondiale sont une condition préalable à l'amélioration et la durabilité à long terme de l'ITRF, tel que reconnu par la résolution de l'Assemblée générale des Nations Unies (2015)<sup>2</sup> sur le repère géodésique mondial pour le développement durable. ●

## Références

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L. and Chanard, K. (2022) *ITRF2020: An augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions*, Journal of Geodesy, submitted.

<sup>2</sup> [http://ggim.un.org/documents/A\\_69\\_L53\\_F.pdf](http://ggim.un.org/documents/A_69_L53_F.pdf)

## Contacts

Zuheir ALTAMIMI<sup>4</sup>

zuheir.altamimi@ign.fr,

Paul REBISCHUNG<sup>4</sup>, Xavier COLLILIEUX<sup>5</sup>,  
Laurent MÉTIVIER<sup>4</sup>, Kristel CHANARD<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Université de Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, IGN, F-75005 Paris, France.

<sup>5</sup> ENSG-Géomatique, IGN, F-77455 Marne-la-Vallée, France.

## ABSTRACT

*For the first time of the history of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF), the ITRF2020 is provided in the form of an augmented terrestrial reference frame, so that in addition to station positions and velocities, parametric functions describing station nonlinear motions are part of the new frame: seasonal signals (annual and semi-annual) present in the time series of station coordinates, as well as post-seismic deformation (PSD) parametric models for sites that were subject to major earthquakes. The long-term origin of ITRF2020 follows linearly with time the center of mass (CM) of the Earth as sensed by the SLR technique, using observations collected over the period 1993.0-2021.0. The accuracy of the ITRF2020 long-term origin is evaluated against past solutions, namely ITRF2014, ITRF2008 and ITRF2005, to be at the level of 5 mm, and 0.5 mm/year for its evolution over time. The ITRF2020 long-term scale is defined by a rigorous weighted average of selected VLBI sessions up to 2013.75 and weekly SLR solutions covering the period 1997.7 - 2021.0. For the first time in the ITRF history, the scale agreement between SLR and VLBI long-term solutions is at the level of 0.15 ppb (1 mm at the equator) at epoch 2015.0, with zero drift. The ITRF2020 was officially published on April 15, 2022, at a dedicated website containing the results and other information and descriptions relating to the development of the new frame: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>. A detailed article is being submitted to the Journal of Geodesy (Altamimi et al., 2022).*

# Référentiels géodésiques africains : de la géodésie traditionnelle à l'ère spatiale

■ Diogoye DIOUF - Laurent MOREL - Françoise DUQUENNE

*Le continent africain a connu de nombreuses réalisations géodésiques ayant évolué au cours du temps, particulièrement grâce à l'évolution des instruments et des techniques géodésiques utilisés. Les techniques de la géodésie terrestre ont caractérisé les premiers réseaux géodésiques qui avaient généralement une dimension locale avec un ellipsoïde quasi géocentrique et étant positionné de manière différente d'un pays à un autre. Différentes réalisations de réseaux géodésiques locaux ont ainsi pendant longtemps coexisté malgré leur incompatibilité aux frontières. Le cheminement géodésique du 12<sup>e</sup> parallèle et la triangulation du 30<sup>e</sup> arc de méridien ont été parmi les rares initiatives d'établissement de réseaux géodésiques régionaux établis par techniques terrestres. Avec l'avènement de la géodésie spatiale, un premier projet d'unification des référentiels géodésiques dénommé ADOS fut lancé en 1980 pour doter l'Afrique d'un premier référentiel géocentrique. Avec les exigences de plus en plus accrues en matière de positionnement et d'établissement de référentiels géodésiques ainsi que les orientations de la communauté internationale et de la communauté scientifique en la matière avec les systèmes globaux de positionnement par satellite (GNSS), l'Afrique a senti la nécessité de s'aligner aux standards internationaux. C'est ainsi que le projet African Reference Frame (AFREF) fut lancé en 2001 pour doter l'Afrique d'un référentiel géodésique unifié, homogène, précis et accessible à tous les utilisateurs du continent effectuant un positionnement GNSS. L'analyse de cette situation des infrastructures géodésiques en Afrique a permis, dans cet article, de faire des propositions qui devraient permettre à l'Afrique de disposer d'un référentiel régional en phase avec les standards en la matière.*

## MOTS-CLÉS

AFREF, géodésie, Afrique, triangulation, cheminement géodésique, GNSS, ADOS, 12<sup>e</sup> parallèle, 30<sup>e</sup> méridien

l'Ouest (NGAO) et le Nivellement général de l'Afrique Centrale (NGAC).

## Structuration des référentiels géodésiques en Afrique

Les repères de référence terrestre en Afrique étaient, pour la plupart, réalisés à partir d'observations astronomiques sur les étoiles qui permettaient de déterminer des coordonnées géographiques astronomiques (longitude, latitude) et de définir une orientation. Localement, des chaînes de triangulations ou des cheminements géodésiques, basés sur des mesures d'angle, puis de distances permettaient un positionnement relatif centimétrique. Les calculs étaient effectués sur un ellipsoïde qui pouvait être différent d'un pays à un autre et positionné différemment par le choix d'un point fondamental en général selon le pays. Le point de la surface topographique était projeté sur cet ellipsoïde. Les coordonnées géographiques géodésiques calculées étaient ainsi définies par rapport à la normale à l'ellipsoïde (figure 1), et elles étaient bidimensionnelles. La composante verticale était déterminée de manière

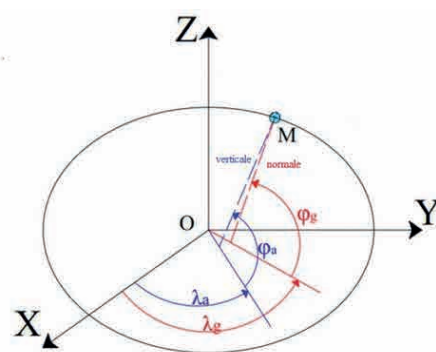


Figure 1. Coordonnées géographiques géodésiques et astronomiques.

## Introduction

La géodésie en Afrique a vu le jour pendant la colonisation. Le principal but était de cartographier les territoires colonisés avec des techniques similaires à celles développées en métropole. De nombreuses réalisations géodésiques ont ainsi été effectuées sur le continent africain. D'abord par des techniques de la géodésie terrestre avec les réseaux de triangulation et de cheminements géodésiques avant, plus tard, de voir naître la technique Doppler ayant permis, avant l'arrivée du GPS, de définir les premiers repères géocentriques du conti-

ment. De nombreuses anomalies et contraintes ont néanmoins entaché les projets et réalisations géodésiques ayant été initiés. Dans cet article, nous nous intéresserons particulièrement aux réseaux géodésiques planimétriques, même si, il faudra noter, que les réseaux altimétriques ont été réalisés séparément par des techniques de nivellement direct. Ces réseaux altimétriques étaient généralement des réseaux régionaux établis à partir d'un point fondamental situé à côté d'un marégraphe d'une zone côtière. Nous pouvons citer comme exemples, le Nivellement général de l'Afrique de



indépendante des techniques précédentes par nivellement.

Ces différentes mesures d'angle étaient associées à la mesure au moins d'un côté (base) de la chaîne de triangles.

L'élaboration de ces réseaux devait dès lors passer par une bonne planification (description, choix et matérialisation des points, observations, documentation, etc.), des constructions particulières pour les visées lointaines et le choix d'un ellipsoïde associé à un point fondamental. Cette démarche permettait à cet effet de disposer d'un réseau géodésique passif et bidimensionnel à l'échelle nationale, régionale ou continentale (à l'image du ED50 pour l'Europe). Les précisions associées au réseau géodésique devaient être hiérarchisées, avec des chaînes de grands triangles formant le canevas de premier ordre. Ce canevas, servant de support aux triangulations de deuxième et troisième ordre, devait alors avoir la plus grande précision et donc avec une mise en œuvre nécessitant des moyens et un temps plus conséquents. Les canevas de second et troisième ordre utilisés plus couramment dans la pratique impliquaient aussi un certain niveau de précision, mais sans devoir compromettre la rapidité d'exécution et l'économie des travaux.

La compensation des réseaux particulièrement ceux de premier ordre, était généralement faite de manière partielle par blocs avec la méthode des équations de condition des moindres carrés. Ce qui ne permettait pas alors d'assurer une homogénéité globale du réseau. Pour les cheminements géodésiques, en plus des mesures d'angle, les mesures de distance étaient également réalisées pour la détermination des longueurs des côtés des polygones avec des appareils de mesure de distances électromagnétiques (EDM) qui ont fini par remplacer le fil invar utilisé pour la mesure des bases de mise à l'échelle.

## Faiblesses des réseaux géodésiques traditionnels

Les exigences des instruments et méthodes utilisés entraînaient que les réseaux géodésiques tradition-

nels étaient globalement définis avec certaines limites (F. et H. Duquenne, 2002 ; El Fettah, 2003) :

- nécessité d'intervisibilité entre les points pour assurer les visées d'orientation ;
- choix de points en hauteur pouvant être difficilement accessibles avec parfois des réalisations particulières dans le cas où de tels points n'existeraient pas ;
- zones de couverture limitées, car n'étant pas possible, avec une telle méthodologie, de traverser (ou difficilement) certaines zones (océans, grandes forêts, zones à risque, etc.) ;
- dépendance aux conditions météorologiques, car la qualité des mesures pouvait se dégrader dans certaines conditions atmosphériques et/ou n'étant pas possibles à réaliser de nuit ou en périodes d'orages par exemple ;
- impossibilité d'établir directement un réseau tridimensionnel avec les instruments utilisés à l'époque qui ne permettaient pas de faire directement des mesures tridimensionnelles avec la qualité escomptée ;
- suivi et contrôle de la stabilité et de la fiabilité des points assez complexes et rarement effectués vu les ressources et le temps nécessaires souvent requis ;
- intervisibilité entre les points géodésiques pas toujours assurée avec parfois le changement de l'environnement entre les points (nouvelles constructions, présence d'arbres, etc.) ;
- compatibilité parfois non assurée entre réseaux pouvant être rattachés à des ellipsoïdes avec des points fondamentaux différents et de qualités différentes ;
- mise en place de réseaux à dimension régionale ou continentale difficile, particulièrement avec les pays situés sur des îles (comme le Cap-Vert, Maurice et les Comores) ;
- difficultés à estimer et à suivre les vitesses de déplacement des points ou de la croûte terrestre vu la complexité des mesures et leur qualité parfois limitée et non homogène ;
- détermination des coordonnées horizontales uniquement, la coordonnée

verticale étant déterminée dans un autre système dit vertical ;

- calculs d'ajustement généralement partiels et non en bloc, exécutés par petits blocs de quelques points s'appuyant les uns sur les autres, ce qui pouvait facilement altérer la précision et la qualité du réseau particulièrement pour les pays relativement vastes ;
- absence d'outils de calcul performants à l'époque qui rendait difficile, voire impossible les calculs de compensation des grands réseaux en bloc par l'utilisation de la méthode des moindres carrés ;
- homogénéité du réseau pas souvent assurée à cause du processus de compensation en petits blocs qui était généralement adopté ;
- imprécision des paramètres de transformation permettant le passage d'un système géodésique à un autre.

Le fait de positionner l'ellipsoïde au point fondamental avait aussi pour effet de positionner son centre à plusieurs centaines de mètres du centre de gravité de la Terre (*figure 2*). Par ailleurs, chaque pays ayant son propre point fondamental, donc même si le même ellipsoïde pouvait être choisi par plusieurs pays, son centre n'était pas situé au même endroit. Ce qui fait qu'en passant la frontière, les coordonnées géographiques pouvaient différer de plusieurs centaines de mètres.

En plus, on pouvait se retrouver avec des systèmes géodésiques ayant un point fondamental mal défini ou sans réalité physique entraînant ainsi une méconnaissance de la situation et de l'orientation de l'ellipsoïde loca-

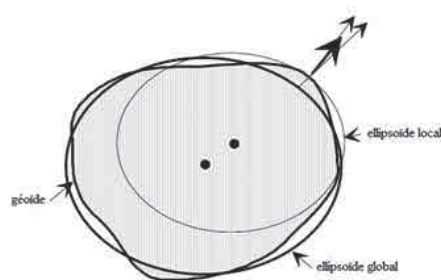


Figure 2. Position de l'ellipsoïde en géodésie terrestre et en géodésie spatiale.



lement. C'était le cas du système algérien dénommé "Nord Sahara 1959 ou NS-59" qui a été réalisé à partir du système ED50 (European Datum 1950, utilisé en Europe à l'époque) par de simples translations en longitude et latitude (Gourine, 2019).

Avec l'avènement de la géodésie spatiale (particulièrement avec les GNSS), associée aux avancées technologiques, toutes ces contraintes ont été pratiquement levées. Nous pouvons noter par exemple :

- intervisibilité entre points géodésiques pas requise du fait qu'il n'y ait plus de visées effectuées par l'opérateur, mais plutôt l'utilisation de signaux électromagnétiques entre des stations ou récepteurs au sol et des satellites ;
- observations géodésiques possibles de jour comme de nuit ;
- mesures relatives entre points géodésiques qui peuvent s'étendre jusqu'à des centaines, voire des milliers de kilomètres ;
- mesures absolues possibles par tout temps car ne dépendant plus de la visibilité des objets célestes comme cela fût le cas avec les observations astronomiques ;
- les coordonnées directement déterminées dans un repère géocentrique tridimensionnel ; mais la détermination des altitudes par techniques spatiales étant toujours tributaires de l'utilisation d'un modèle de géoïde précis ;
- suivi et contrôle des points devenus plus simples avec certaines méthodes de positionnement comme le positionnement absolu par mesure de phase (PPP) ;
- possibilité de détermination de la vitesse de déplacement des points grâce aux réseaux de stations GNSS permanentes ;
- définition d'un référentiel mondial en phase avec les mouvements physiques globaux de la croûte terrestre devenue possible ;
- travaux géodésiques interétatiques devenus plus simples ;
- de nouvelles techniques de détermination du géoïde possibles pour la détermination des altitudes des points ;
- des réseaux géodésiques rattachés

aux mouvements des plaques continentales ;

- opérations de rattachement devenues beaucoup plus simples et rapides avec des techniques relativement faciles à mettre en œuvre ;
- etc.

## Projets et réalisations géodésiques africains

En Afrique, les référentiels géodésiques sont globalement caractérisés par une coexistence des réseaux traditionnels issus de techniques terrestres et parfois spatiales (mesures Doppler), ainsi que des réseaux modernes établis entièrement à partir des techniques spatiales (GNSS). Ces différents travaux géodésiques reposaient globalement sur des réseaux de triangulation et de cheminement offrant généralement, grâce aux mesures de distance effectuées, une bonne cohérence géométrique en planimétrie. Ces canevas plus ou moins précis étaient définis avec des points de différents ordres.

D'après le rapport du séminaire sur les spécifications finales géométriques et cartographiques du projet AFRICOVER ([www.fao.org](http://www.fao.org)), les réseaux de triangulation réguliers sont repérés dans les pays d'Afrique australe et dans les pays du Maghreb. Alors que les réseaux mixtes (ayant comme supports des points de triangulation et de simples points astrogéodésiques) sont généralement localisés dans les pays de toutes les sous-régions (Éthiopie, Somalie, Kenya, Botswana, RCA, Ghana, Guinée). Les réseaux géodésiques à couverture partielle sont quant à eux localisés dans les pays d'Afrique centrale de la zone sahélienne et du sud-ouest équatorial.

Cette situation qui s'accompagnait de l'utilisation de différents paramètres (ellipsoïde par exemple) et techniques, fait que les réseaux géodésiques en Afrique n'étaient pas compatibles entre eux et la définition d'un référentiel commun ou plus global ne semblait pas être réalisable.

L'évolution des instruments et des techniques de positionnement associée aux besoins grandissants et aux

exigences en matière de positionnement et de gestion de l'information géospatiale, font que les États ont été "obligés" de moderniser leurs référentiels géodésiques. Mais il faut noter que dans beaucoup de pays, la géodésie étant pilotée par une administration militaire, les coordonnées étaient considérées comme ayant une valeur stratégique et devaient rester confidentielles.

Malgré les efforts faits dans ce sens, cette évolution n'a pas permis de régler toutes les difficultés auxquelles ont été confrontés certains États. Une évolution disproportionnée a été également notée dans l'implantation des nouveaux systèmes géodésiques nationaux utilisant des techniques spatiales. Ce qui fait que l'Afrique tarde toujours à rendre effectif le passage aux systèmes de référence à techniques spatiales, alors qu'en Europe comme en Amérique, cette mutation a pu être achevée et a permis une unification des systèmes nationaux.

## Les référentiels géodésiques bidimensionnels africains

### ■ Les référentiels géodésiques de l'époque coloniale

L'infrastructure géodésique africaine pendant l'époque coloniale a été caractérisée par de nombreuses triangulations de base ayant suivi l'implantation des points astronomiques utilisés pour appuyer la cartographie au 1/200 000. Ces triangulations avaient permis la création de points géodésiques dont les positions ont été calculées parfois dans des systèmes différents. Le plus grand nombre de points géodésiques était localisé en Afrique de l'Est grâce aux nombreuses triangulations qui y ont été faites (*figure 3*). On peut citer la triangulation sur l'arc de méridien Cap-Town-Le Caire, la triangulation britannique qui reliait le Kenya à l'Ouganda, la triangulation de l'arc de méridien africain, la triangulation du parallèle ougandais, la triangulation du Méridien, etc. (Winterbotham et McCaw, 1927). La plupart de ces triangulations ont été calculées sur l'ellipsoïde Clarke 1880 dans ses différentes versions, même



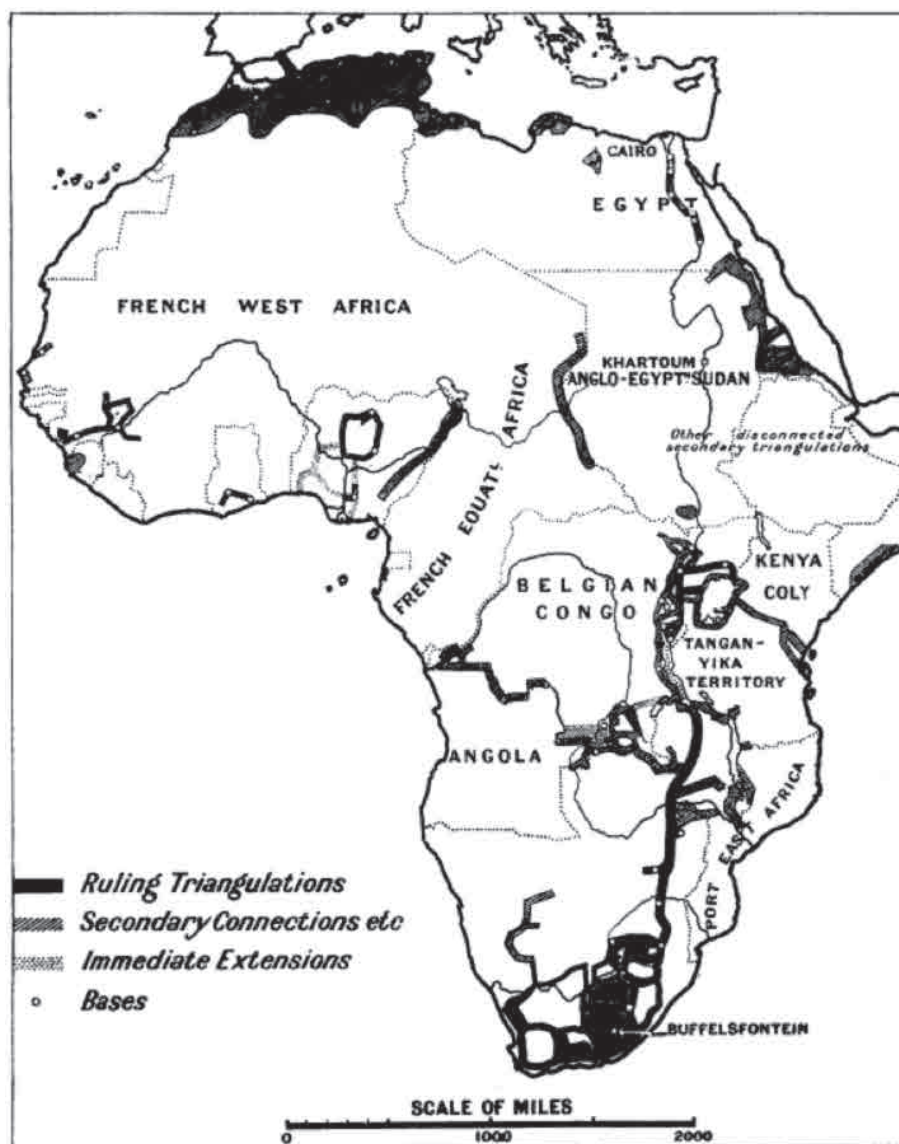


Figure 3. Triangulations géodésiques africaines de l'époque coloniale (Winterbotham et McCaw, 1927).

fication des différentes triangulations d'Afrique de l'Est, qui devrait plus tard être suivi de l'unification des triangulations d'Afrique de l'Ouest, du Nord et du Sud a été initié par le Comité colonial de topographie. Mais ce dernier n'avait malheureusement pas abouti.

### ■ Référentiels géodésiques à dimension continentale : cheminement géodésique du parallèle et triangulation d'un arc de méridien

Le développement socio-économique du continent africain, à l'image des autres continents, devait passer par la réalisation d'infrastructures qui devait reposer sur une bonne planification. De nombreux projets transfrontaliers devaient ainsi être initiés (routes, chemins de fer, aéroports, télécommunications, délimitation de frontières, etc.). Ces projets rattachés à la surface de la Terre, et reliant parfois de nombreux pays, devaient dès lors reposer sur une cartographie précise et fiable définie à partir d'un référentiel commun. Mais la non-compatibilité des référentiels géodésiques nationaux (avec des points fondamentaux différents et des ellipsoïdes parfois différents) et le manque d'information sur la précision de ces derniers, ne permettaient pas une unification des différents systèmes nationaux pour l'obtention d'un référentiel commun. Des initiatives interétatiques ont alors été prises pour aboutir à un réseau géodésique unifié pour l'Afrique avec l'appui d'États partenaires et d'organismes internationaux. C'est à cet effet que deux réseaux géodésiques de base regroupant de nombreux pays ont été mis en œuvre pour l'obtention d'un référentiel géodésique africain. Il s'agit de la triangulation de premier ordre définie le long de l'arc de méridien reliant Le Cap en Afrique du Sud et Le Caire en Égypte (figure 5) et le cheminement géodésique du parallèle reliant Dakar (Sénégal) à N'Djamena (Tchad), précisément à la frontière entre le Tchad et le Soudan.

Le cheminement du parallèle dont le but était de mesurer par cheminement un arc de parallèle qui traverserait toute l'Afrique, s'étendait sur

si les triangulations des colonies italiennes ont été définies, quant à elles, avec l'ellipsoïde Bessel. En Afrique du Nord, la triangulation nord-africaine (figure 4), particulièrement avec le système Nord Sahara (ED50 décalé), de qualité jugée très satisfaisante, a été mise en place. Cette triangulation avait pour but de relier des infrastructures géodésiques africaines et européennes. Mais les réseaux géodésiques de l'Algérie, du Maroc et de la Tunisie, ont été établis avec l'ellipsoïde Clarke 1880 (anglais) pour l'Algérie et Clarke 1880 (IGN) pour le Maroc et la Tunisie alors qu'en Égypte, l'ellipsoïde Helmert 1906 était utilisé. En Libye, l'ED50, version 1979

était resté en vigueur. Ce qui illustre la diversité qu'il y avait dans l'utilisation de l'ED50 en Afrique, en plus des triangulations locales qui étaient toujours utilisées.

Il faut également noter l'apport des pétroliers et hydrographes qui ont réalisé, dans le cadre de leurs travaux, de nombreux réseaux géodésiques locaux dans plusieurs pays comme le Gabon et le Congo. Certains de ces réseaux avaient fini par la suite par être adoptés et utilisés par la communauté.

Malgré les différents ellipsoïdes, systèmes de référence et les différentes projections utilisés dans les différentes colonies, un projet d'uni-

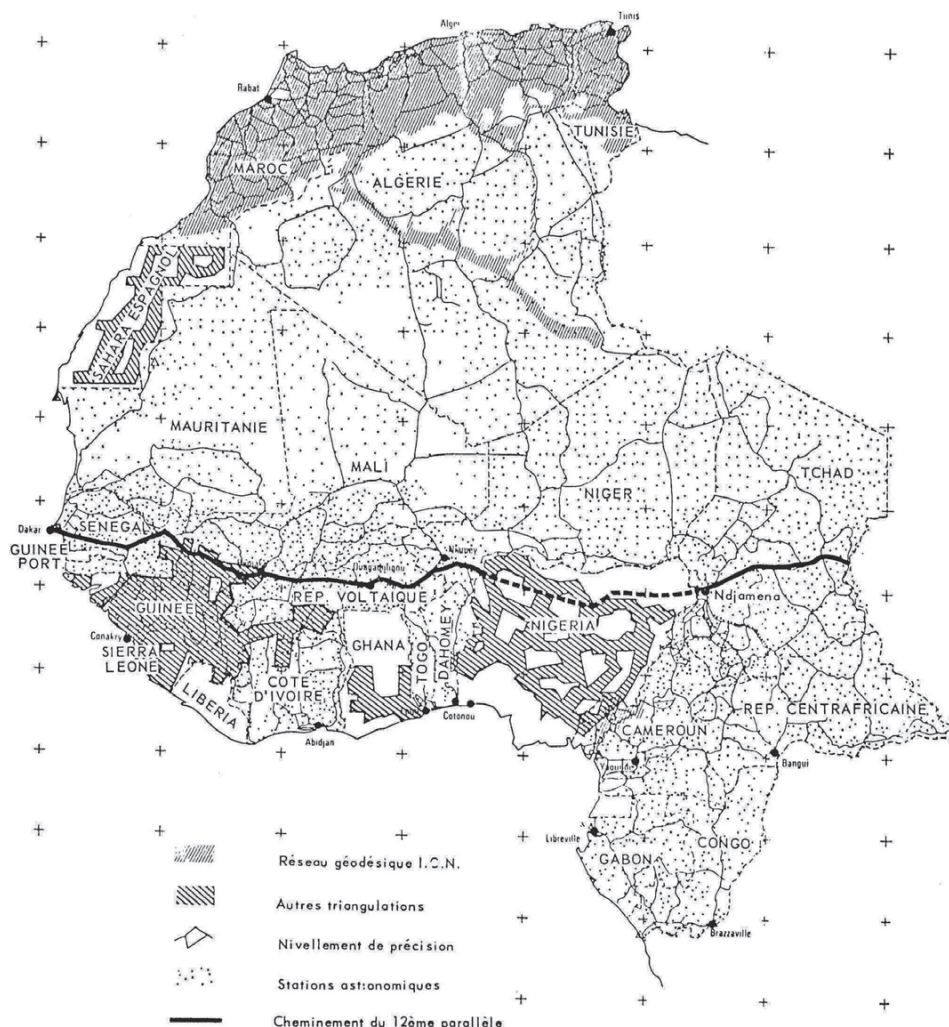


Figure 4. Cheminement géodésique du 12<sup>e</sup> parallèle et autres canevas (Levallois, 1988).

4 656 km de Dakar à Njamena, en passant par les pays suivants : Sénégal (668 km), Mali (837 km), Burkina Faso (717 km), Niger (275 km), Nigeria (1 191 km), Cameroun (51 km) et Tchad (917 km) (Adekoya, 1992 et Leblanc, 2022). Il a été financé par les États-Unis et réalisé par l'IGN France à l'exception de la partie du Nigeria, qui a été faite par le *Survey Department* du Nigeria. Ce travail mené à la demande du conseil scientifique pour l'Afrique, avait permis de créer et d'observer 325 bornes qui ont été rattachées au nivellement de précision (figure 4).

La réorientation de ce cheminement a été effectuée toutes les deux stations par des observations astronomiques (point de Laplace). Cette chaîne de polygonation fondée sur le système géodésique Adindan point 58 (à partir du point 58, de la triangulation du

Soudan) a été par la suite, reliée à la triangulation d'un arc de méridien pour définir ainsi le premier référentiel de base de premier ordre pour l'Afrique. Ces travaux ont été réalisés entre 1967 et 1970 après une première conception en 1880, qui fut reprise en 1954 pour des raisons que nous n'avons pas pu découvrir. Les calculs avaient également montré des écarts importants de la triangulation d'un arc de méridien dans certains territoires de l'Afrique de l'Est (NRD/CRSU, 1989).

Ces différentes réalisations géodésiques commençaient généralement par la création d'une triangulation ou polygonation de base ou primaire qui était suivie d'une extension et d'une densification du réseau. La couverture géométrique et l'accessibilité du réseau géodésique dépendaient ainsi

fortement des travaux d'extension et de densification qui devaient aussi permettre d'assurer une homogénéité du réseau sur les territoires couverts. Au Sénégal par exemple, les points du 12<sup>e</sup> parallèle qui traversait tout le pays ont servi de base pour la création des réseaux (Yoff-Datum 200, Datum Point 58, Adindan Datum 1969) pour un système géodésique plus étendu ou au rattachement du 12<sup>e</sup> parallèle à de nouveaux systèmes géodésiques comme le système OMVS1979.

Ces réalisations géodésiques de base étaient également accompagnées de la multiplication et de la diversité des référentiels géodésiques locaux dans les autres parties du territoire non couvertes par le réseau de base. Ce qui était généralement à l'origine de la coexistence de différents réseaux géodésiques dans plusieurs pays comme le Gabon et le Niger.

Le théodolite (avec ses différentes variantes) était l'appareil standard utilisé pour les mesures d'angle. Les distances étaient mesurées avec des rubans pour les mesures de base

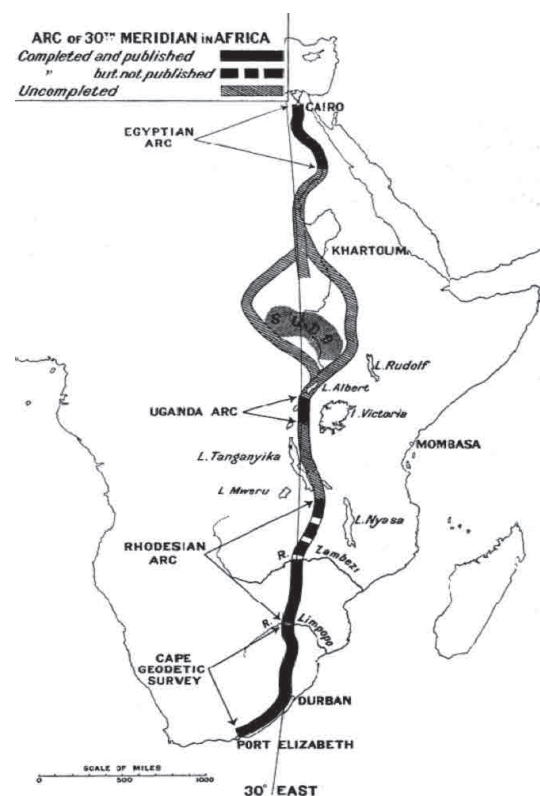


Figure 5. Triangulation du 30<sup>e</sup> arc de méridien (Winterbotham et McCaw, 1927).



(méridien 30°) qui finiront par être remplacés par les premiers appareils électroniques de mesure de distance (EDM) comme les telluromètres et les géodimètres qui ont été utilisés dans le cheminement du 12<sup>e</sup> parallèle. Les triangulations n'étaient pas toujours réalisées avec la même rigueur (absence de dispositions de contrôle suffisantes pour certaines) et les calculs de compensation étaient généralement effectués en petit bloc. Ce qui ne permettait pas de garantir dès lors, une homogénéité suffisante des dits réseaux. La performance des outils de calcul liée aux avancées technologiques avait permis plus tard de faire des calculs de compensation en bloc de certains réseaux existants. Cela avait permis de détecter des anomalies sur certains d'entre eux, à l'image des discordances (de l'ordre du mètre) qui ont été montrées sur la triangulation de premier ordre du Maroc (Noureddine E., 2003).

Le réseau géodésique servait de base à la cartographie et un appui pour les travaux cadastraux et dans le cadre de certains projets. Mais les différences notées entre ces systèmes locaux rendaient difficiles la mise en place d'un cadastre national, l'établissement d'un livre foncier fiable et la gestion de certains conflits fonciers.

C'est pourquoi des initiatives ont été rapidement prises par de nombreux pays pour une harmonisation des différents référentiels géodésiques à partir de réseaux géodésiques tridimensionnels à dimension nationale grâce aux techniques de la géodésie spatiale (GPS). Cela fut le cas du Sénégal qui, à partir de 2004, a créé son premier réseau géodésique tridimensionnel couvrant tout le territoire sénégalais, dénommé RRS04. Ce réseau a été créé par technique GPS avec vingt points de premier ordre rattachés à l'ITRF2000, époque 2004.56. En plus des points de premier ordre, vingt-six (26) points co-localisés sur des points des anciens réseaux ont été également observés en 2004 pour permettre la détermination des paramètres de transformation ou de passage des anciens systèmes au nouveau système RRS04.



Photo 1. Récepteur Doppler en station dans la savane africaine (Carrère et al., 1987).

## Référentiels géodésiques tridimensionnels géocentriques

### ■ Le système ADOS

Lors du symposium sur la géodésie africaine qui s'était tenu à Nairobi en novembre 1981, l'Association internationale de géodésie (IAG) en avait profité pour lancer un vaste projet de

mise en place d'un réseau géodésique devant couvrir toute l'Afrique (IGN-F, 1981). Ce projet connu sous le nom d'*African Doppler Survey* (ADOS), devait comporter des centaines de points observés par méthode Doppler sur les satellites américains Transit.

Les objectifs de ce projet étaient de fournir (NRD/CRSU, 1989 et Wonnacott, 2012) :

- un système géodésique primaire continental pour l'unification et la consolidation des réseaux géodésiques nationaux en l'Afrique ;
- un support de contrôle de base pour la cartographie en Afrique ;
- un géoïde précis pour l'Afrique.

Les observations Doppler devaient être réalisées de manière simultanée avec des emplacements de certaines stations choisis sur des points

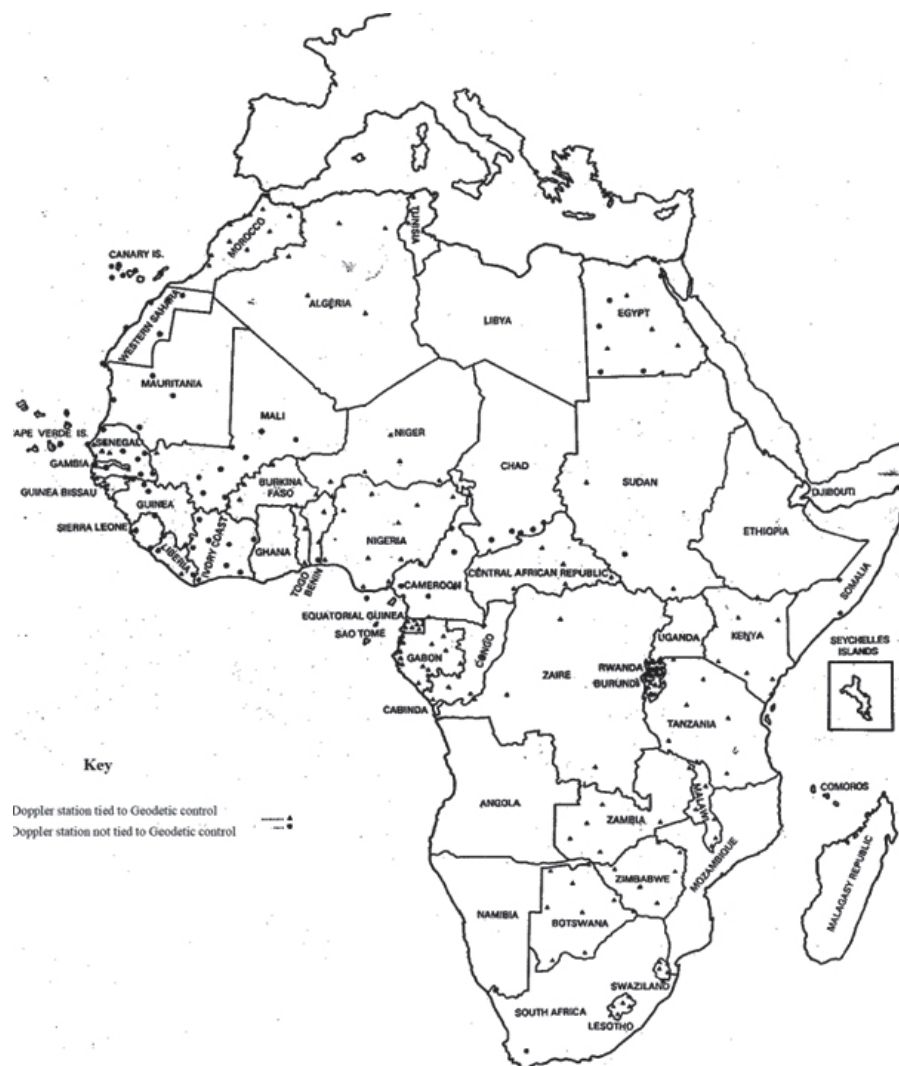


Figure 6. Statut et répartition des points ADOS en novembre 1986 (NRD/CRSU, 1989).

d'anciennes triangulations géodésiques existantes afin de faciliter la détermination des paramètres de transformation entre les anciennes triangulations et le système ADOS. À la fin du projet, 310 points répartis sur 47 pays ont pu être observés (NRD/CRSU, 1989). Les données d'observations ont été envoyées à cinq centres de traitement dont deux se trouvaient en Afrique (Kenya et Algérie) et un aux États-Unis avec la *Defense Mapping Agency* (DMA). Les calculs des positions des stations ont été ainsi effectués de manière progressive et séparée. Cependant, la compilation des données a été plus compliquée car seuls 22 pays avaient pu fournir les résultats de leurs stations Doppler.

Les coordonnées des stations ont été calculées avec les éphémérides précises du système TRANSIT dont la précision était inférieure à 2 m (Newling, 1989).

Les coordonnées ont été obtenues avec les paramètres ( $a = 6378145$  m ;  $f = 1 / 298,250$ ) de l'ellipsoïde NWL 8-9 WGS 66 avec comme méridien d'origine, celui de Greenwich.

C'est en 1987, lors de l'assemblée générale de l'Union internationale de géodésie et géophysique (UGGI) tenue au Canada, que la *Defense Mapping Agency* a publié les coordonnées Doppler des 310 points qui ont été calculés et répartis sur le continent africain (figure 8).

Les objectifs qui ont été fixés pour ce projet, particulièrement celui de l'unification des systèmes géodésiques en Afrique, n'ont malheureusement pas été pleinement atteints pour de nombreuses raisons (Wonnacott, 2006) :



**Photo 2.** Soirée d'observations avec une brigade astronomique dans l'Ennedi au nord du Tchad en 1957 (Carrère et al., 1987).



**Figure 7.** Référentiels géodésiques africains (NRD/CRSU, 1989).

- observations simultanées requises pour la technologie Doppler difficilement réalisables vu la taille du continent africain, du nombre de pays concernés et les infrastructures géodésiques existantes à l'époque ;
- implication des pays africains assez limitée dans la planification du projet menée par l'IAIG et la communauté internationale ;
- non-implication de certains pays africains qui ne semblaient pas bien comprendre les enjeux du projet. Ce qui s'est traduit par un manque de motivation et d'enthousiasme dans l'exécution du projet ;
- non-matérialisation de certains accords bilatéraux desquels dépendait l'exécution du projet, entre certains pays et les organismes impliqués dans le projet ;
- absence de procédures standard clairement définies ;
- une expertise africaine sur la technologie Doppler pas très développée, comme cela peut être aujourd'hui le cas avec la technologie GNSS.

Après 1986, de nombreuses triangulations locales, parfois incompatibles, ont donc continué à coexister en Afrique malgré les réalisations qui ont été faites avec le projet ADOS.

En Afrique de l'Ouest, l'infrastructure géodésique était globalement définie à partir uniquement de points astro-géodésiques comme au Sénégal (à l'exception du cheminement géodésique du parallèle). Les pays non couverts par ces triangulations avaient ainsi des réseaux nationaux qui se sont développés en partant des points astro-géodésiques ayant été, pour la plupart, créés pour appuyer les travaux de cartographie africaine.

La majeure partie des triangulations se trouvait en Afrique du Sud qui semblait être un peu plus en avant (pour les triangulations) avec une partie de l'Afrique du Nord (figure 7). Les campagnes d'observations astronomiques ayant abouti à la détermination de points astronomiques déterminés isolément permettaient certes la créa-

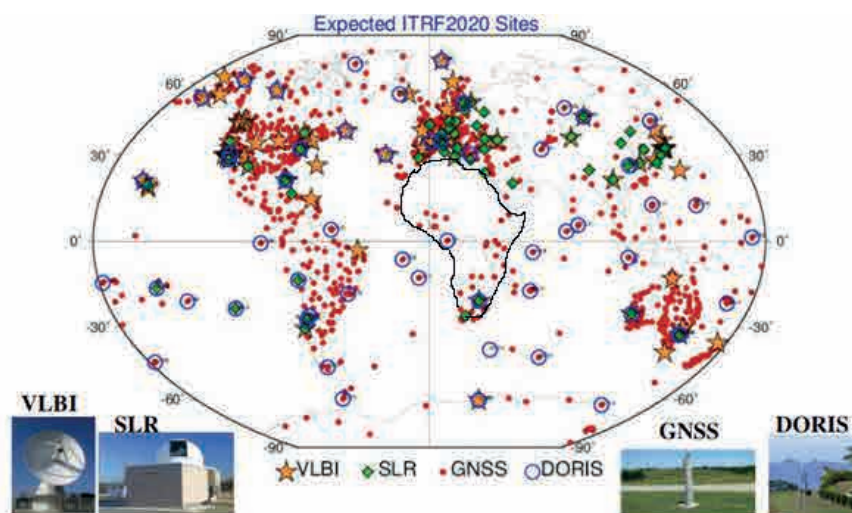


Figure 8. Différents sites devant définir l'ITRF2020 (Altamimi, 2021).

tion de canevas locaux, mais souvent très hétérogènes.

Ces différentes réalisations géodésiques traditionnelles en Afrique, généralement bidimensionnelles, étaient accompagnées d'un référentiel altimétrique à l'image du nivellement général de l'Afrique Occidentale (NGAO53) réalisé à partir du marégraphe de Dakar et traversant toutes les anciennes colonies de l'AOF et du Nivellement général de l'Afrique Centrale (NGAC).

Avec l'avènement des techniques spatiales modernes, un nouveau repère de référence terrestre (ITRF) rattaché à la croûte terrestre a été mis en place en 1988. Ce repère constitue depuis lors la matérialisation du système de référence terrestre (ITRS) qui a été adopté comme référentiel géodésique mondial. Ce référentiel est défini et maintenu grâce à une combinaison rigoureuse des produits dérivés des différentes techniques de la géodésie spatiale (GNSS, DORIS, SLR et VLBI) avec des sites disposant d'équipements de mesures sur chacune de ces techniques avec certains qui sont co-localisés. Ces sites répartis sur l'ensemble du globe sont, pour la plupart, définis par des stations GNSS permanentes. Cette couverture globale, associée aux mesures continues et aux calculs et combinaisons rigoureux qui s'en suivent, permettent de garantir la précision, l'homogénéité, la fiabilité et la robustesse du réseau avec diffé-

rentes versions qui se sont succédé au fur et à mesure des années, dont la plus récente est l'ITRF2020 ayant succédé à l'ITRF2014. Il constitue ainsi le référentiel mondial le plus utilisé et auquel tous les pays sont encouragés à s'y rattacher, conformément à la résolution de l'assemblée générale de l'Organisation des Nations unies (ONU) qui a été adoptée le 26 février 2015 dans ce sens.

Néanmoins, il faut noter que la répartition des stations de l'ITRF représentant les quatre techniques précédemment citées n'est pas homogène (figure 8). On peut facilement voir que l'Afrique représente, malgré son étendue, le continent abritant le moins de stations de l'ITRF (environ une trentaine de stations GNSS permanentes, cinq stations DORIS, trois stations SLR et une seule station VLBI).

Cette configuration ne permet pas ainsi de garantir une disponibilité et une qualité équivalente des produits de l'IGS fournis à partir de l'ITRF comparée aux autres continents.

Ce constat montre à cet effet, l'importance pour l'Afrique, de prendre des initiatives à l'image des autres continents comme l'Europe afin de réussir à corriger ce déséquilibre et de s'aligner aux standards en vigueur dans les autres continents.

Les premiers points géodésiques tridimensionnels mis en place sur le continent et rattachés à l'ITRF furent ceux ayant permis le rattachement

des aéroports des pays qui composent l'ASECNA (Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar). Ces points ont été créés entre 1996 et 1997 et calculés à partir des observations effectuées par GPS qui ont permis de les rattacher à l'ITRF1996, époque 1998.5.

### ■ Le projet AFREF

À la suite des échecs qui ont été observés avec le projet ADOS, des avancées technologiques avec l'avènement du GPS et les enjeux de plus en plus grandissants dans l'acquisition et la gestion de l'information géospatiale en Afrique, une modernisation des référentiels géodésiques africains s'imposait. C'est ainsi que les pays africains, avec l'appui de la communauté internationale, ont lancé en 2001, un nouveau projet dénommé AFREF pour "African Reference Frame" basé cette fois-ci sur la technique de positionnement GPS. Cette initiative commune des États africains consistait à mettre en place un référentiel unifié basé sur l'installation de stations GNSS permanentes. Ce référentiel devait, à cet effet, être pleinement compatible avec le référentiel mondial (ITRF) et accessible à tous les acteurs du monde professionnel et scientifique du continent africain. Il devait ainsi regrouper les différents réseaux géodésiques nationaux et régionaux basés sur la technologie GPS dont il en serait le référentiel de base. Contrairement au projet ADOS, il a été noté une meilleure implication des États africains et des procédures standard pour l'installation des stations de référence GNSS clairement définies par l'IGS (Wonnacott, 2006). Les objectifs du projet ont été déclinés lors de la déclaration de Windhoek en 2012. Ils s'agissaient particulièrement de (Wonnacott, 2012) :

- déterminer un réseau de référence tridimensionnel unifié pour l'Afrique et rattaché à l'ITRF ;
- réaliser un référentiel vertical unifié et soutenir les efforts d'établissement d'un géoïde africain précis ;
- mettre en place un réseau de stations de référence GNSS permanentes permettant à tout utilisateur du continent africain d'avoir accès à au moins



**Figure 9.** Répartition spatiale des stations GNSS permanentes (SGP) de l'IGS en 2022 pouvant constituer la base du réseau AFREF.

une station de base dans un rayon de 5 000 km qui devrait plus tard passer à 1 000 km ;

- déterminer les relations entre les référentiels nationaux existants et l'ITRF ;
- appuyer l'établissement d'une expertise locale dans chaque pays pour l'implantation, l'opérationnalisation, le traitement et l'analyse de techniques géodésiques modernes.

Le projet AFREF devait ainsi permettre à l'Afrique d'avoir un référentiel géodésique moderne à l'image de ceux de l'Europe (dénommé EUREF), des Amériques du Sud et centre (dénommé SIRGAS) et de l'Asie Pacifique (dénommé APREF).

Pour y parvenir, chaque pays devrait au moins disposer d'une station de référence pouvant être créée à travers les initiatives régionales. Ces initiatives sont portées par des structures intermédiaires et devront permettre de garantir une efficacité pratique dans la mise en œuvre. Cette démarche devait permettre la création de réseaux de référence régionaux : WAFREF (pour l'Afrique de l'Ouest), NAFREF (pour l'Afrique du Nord), SAFREF (pour

l'Afrique australe), CAFREF (pour l'Afrique centrale), EAFREF (pour l'Afrique de l'Est) conformes avec les orientations de l'AFREF et respectant les spécifications de l'IGS.

Malheureusement, ce projet tarde toujours à se concrétiser pleinement avec beaucoup de pays qui sont en retard dans l'installation de ces stations permanentes, en plus du problème de coordination dans les projets d'installation et de la disponibilité de l'information dans ce sens.

Cette répartition, même si elle pourra être complétée par les stations GNSS permanentes déjà installées par certains pays et non intégrées dans le réseau de l'IGS, reste encore faible, en plus de certaines stations souvent non fonctionnelles (figure 9). Huit de ces stations (DAKR, CPVG, RABT, TANA, MOIU, CGGN, BJCO et ACRG) par exemple, ne transmettaient plus de données à l'IGS en septembre 2022 et cela depuis plus d'une année pour certaines. Ce qui fait qu'il faudra prévoir un plan d'entretien, de maintenance et de pérennisation des SGP devant constituer le futur réseau AFREF.

Nous pensons qu'il est aujourd'hui, plus que nécessaire de faire l'état des lieux de la situation du projet afin de le relancer, pour que les objectifs qui ont été fixés puissent être atteints, car les enjeux ayant motivé la création du projet demeurent, s'ils ne sont pas devenus plus importants. Pour ce faire, nous pensons qu'il serait nécessaire de :

- redynamiser les États africains à travers les autorités locales par une meilleure sensibilisation ;
- assurer une formation complète des acteurs africains pour une expertise locale suffisamment outillée ;
- faire porter le projet aux chefs d'États africains auprès des Nations unies et des autres organisations internationales pour un accompagnement financier et technique ;
- assurer une implication politique, sécuritaire, technique et financière de tous les pays à travers, par exemple, l'Union africaine ou les autres organisations sous-régionales ;
- faire l'état des lieux de l'infrastructure géodésique de chaque pays ;
- répertorier les stations GNSS permanentes installées dans le cadre d'autres initiatives pour leur intégration à l'AFREF après contrôle et validation ;
- faire le diagnostic des structures en charge des travaux géodésiques et cartographiques dans chaque État et faire un plaidoyer ou encourager l'adoption de résolutions par les organismes régionaux ou par l'Union africaine, d'orientations qui permettront de bien outiller ces structures avec des objectifs clairs et réalistes ;
- s'assurer de la disponibilité des procédures d'installation de stations GNSS permanentes définies par l'IGS dans les structures en charge de la géodésie dans chaque État ;
- faire adopter aux États africains (ou aux organismes sous-régionaux) des résolutions permettant l'installation de stations GNSS permanentes de niveaux 1 et 2 dans chaque projet de modernisation d'infrastructures géodésiques et/ou par rapport à un agenda défini ;
- mettre en place un groupe de type EUREF ou SIRGAS formé de



chercheurs, d'institutions de recherche, d'universités, d'ingénieurs de la géodésie opérationnelle, etc. chargé de la centralisation des données et du calcul des différentes solutions en continu. Ce groupe pourra être rattaché à l'Union africaine afin que certains problèmes qui concerneront les autorités étatiques puissent facilement être traités, mais cela ne devrait pas être une condition pour la mise en place d'un tel groupe. La mise en place pourrait commencer par des engagements volontaires entre chercheurs, universitaires et autres institutions de recherche en Afrique pour une collaboration dans ce sens ;

- encourager les États disposant de stations GNSS permanentes faisant partie de l'AFREF à s'engager à faciliter et à donner des orientations pour une disponibilité des données de ces stations GNSS permanentes dans le réseau régional avec des dispositions de suivi, d'entretien et de maintenance des dites stations GNSS permanentes.

Ces différentes évolutions des infrastructures géodésiques en Afrique montrent que des efforts ont été faits par les différents pays malgré des avancées inégales et disproportionnées. Le même souci de fournir un référentiel unique, fiable et accessible à tous les acteurs est une préoccupation commune aux différents pays africains. Aujourd'hui, nous notons de plus en plus des progrès sur l'installation des stations GNSS permanentes en Afrique. Mais ces dernières font généralement face à certains facteurs bloquants (économiques, sécuritaires, énergétiques, humains, etc.). Ces différentes contraintes sont souvent associées dans beaucoup de pays à une non-maîtrise de la disponibilité permanente de l'électricité et une connexion Internet limitée dans certaines zones, même si aujourd'hui, avec les techniques de positionnement émergentes, des solutions peuvent être espérées par rapport à certains problèmes. Mais ces solutions ne pourront être pleinement applicables qu'avec l'aboutissement de ce projet ou une modernisation des référentiels géodésiques natio-

naux ou régionaux. Ce qui fait que l'utilisation des bornes géodésiques au sol reste quasi incontournable pour aboutir à un tel référentiel. Mais l'avancée commune majeure que nous pouvons noter, c'est l'utilisation des techniques spatiales (particulièrement le GNSS) dans tous les pays d'Afrique, ce qui devrait donc faciliter les initiatives nationales, régionales et internationales en matière de référentiel géodésique commun.

### Rattachement des repères de référence terrestre nationaux en Afrique

Le GPS a vite été utilisé en Afrique, pour améliorer les infrastructures existantes. Dans un premier temps, il s'est agi d'utiliser les mesures dans les références anciennes, mais très vite des référentiels géocentriques nationaux ont été mis en place. Les premiers étaient rattachés au WGS84 de manière plus ou moins précise, mais d'autres ont été rattachés à l'ITRF dès les années 2000 par mesure de longues lignes de base sur les quelques stations permanentes existantes sur les autres continents. Les coordonnées de ces réseaux ont été fixées dans la réalisation ITRF en cours à l'époque des observations. Quelques-uns de ces référentiels s'appuient sur des stations permanentes nationales.

Les référentiels géodésiques actuellement utilisés dans les pays africains sont caractérisés par leur hétérogénéité malgré les nombreuses avancées notées. L'inventaire que nous avons fait sur les systèmes géodésiques actuellement en vigueur en Afrique nous a permis de constater que parmi les pays pour lesquels nous avons obtenu des informations (43 sur les 54), 37 % disposent de repères de référence rattachés à une version ITRF (yyyy) à une époque (eeee.ee) connue. Les autres pays utilisent soit des canevas officiellement rattachés à une version de l'ITRF ou WGS84 sans que l'on ait trouvé l'époque associée (Rwanda, Togo, Érythrée, etc.), soit des canevas locaux qui peuvent parfois être associés à la définition de quelques points indépendants déterminés dans

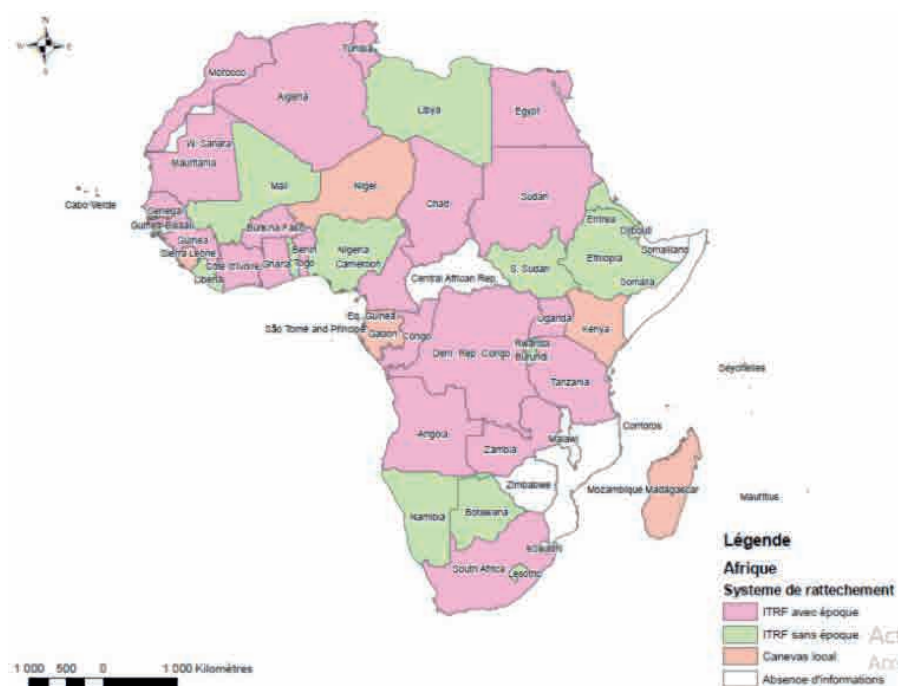
le WGS84 (Niger, Gabon, Guinée Équatoriale, etc.).

La répartition spatiale (figure 10) des systèmes de rattachement des référentiels géodésiques nationaux utilisés actuellement en Afrique, montre que malgré les efforts faits par certains pays, en s'alignant aux recommandations de la communauté internationale en matière de gestion de l'information géospatiale, des efforts restent encore à faire pour un bon nombre de pays. Il serait donc judicieux, d'encourager, de sensibiliser et d'appuyer ces pays, à mettre leur infrastructure géodésique en phase avec le repère de référence international terrestre (ITRF). Ceci devrait également passer par :

- la formation des acteurs locaux ;
- le renforcement en matériel des institutions nationales en charge des aspects géodésiques ;
- la mise en place d'un système d'archivage performant des informations d'ordre géodésique (rapports d'observations et de calculs, données d'observations brutes, etc.) ;
- la mise en ligne (Internet) des ressources géodésiques afin de faciliter l'accès aux chercheurs et professionnels ;
- la capitalisation des observations GNSS faites sur un territoire national dans le cadre d'autres projets ;
- etc.

L'adoption de référentiels nationaux en phase avec l'ITRF à une époque bien définie devrait participer à la réussite du projet AFREF et à une utilisation optimale des techniques de positionnement émergentes comme le PPP en Afrique.

Les solutions PPP étant calculées dans le système des orbites utilisées (ITRFyyyy, époque eeee.ee), peuvent dès lors être souvent différentes des solutions que l'on aurait dû avoir dans le système national. La vitesse des plaques étant relativement bien connue ainsi que certains mouvements discontinus (déplacements post-sismiques), les paramètres de transformation d'une réalisation ITRF à une autre (avec même époque ou époques différentes) sont aujourd'hui bien quantifiés et disponibles sur le site <http://itrf.ensg.ign.fr/>. Ce qui



**Figure 10.** Systèmes de rattachement des référentiels géodésiques en Afrique en 2020.

permettra dès lors, avec un modèle de vitesse précis, de pouvoir ramener des solutions PPP au repère local préalablement rattaché à l'ITRF avec une époque donnée. Certains travaux topographiques pourront devenir donc plus simples à réaliser avec la technique PPP ainsi que d'autres travaux d'ordre géodésique (contrôle, maintenance et densification de réseaux géodésiques).

Le PPP pourrait également, de par sa simplicité et ses performances, faciliter le rattachement des systèmes géodésiques traditionnels qui restent toujours en vigueur dans certains pays n'ayant pas encore de référentiel moderne (*figure 10*), mais aussi des pays ayant des référentiels géodésiques modernes rattachés à l'ITRF, mais co-existant toujours avec quelques réseaux locaux.

Il faut néanmoins noter que la qualité d'un tel rattachement dépendra des précisions des anciens réseaux, des observations et du modèle de vitesse utilisé.

## Conclusion

Nous avons pu noter que les réalisations géodésiques en Afrique ont connu de nombreuses évolutions.

D'abord par la création de points astrogéodésiques qui devaient, pour la plupart, servir de base pour les travaux de cartographie en Afrique, ensuite par la création de réseaux régionaux et à dimension continentale avec des triangulations et cheminements géodésiques en plus de certains réseaux à dimension locale. Ce qui caractérise à cet effet l'hétérogénéité des référentiels géodésiques en Afrique.

Même si certains pays ont pu moderniser rapidement leurs référentiels géodésiques en les alignant aux standards internationaux, il reste encore des pays pour lesquels les référentiels devront être modernisés pour permettre aux acteurs du positionnement de bénéficier pleinement des nouvelles technologies utilisées dans le positionnement actuel, de faciliter l'exécution des projets transfrontaliers et de réduire, voire éradiquer les nombreux problèmes dont la source pourrait être relative aux données de positionnement. La redéfinition et la relance du projet AFREF devraient conduire à son aboutissement qui permettrait en même temps d'aligner tous les pays aux mêmes standards afin de réduire (voire éliminer) les disparités notées dans ce sens et de permettre à l'Afrique de disposer d'un référentiel géodésique précis, fiable, homogène et

accessible à tous les acteurs du positionnement en Afrique. ●

## Contact

**Diogye DIOUF**, Enseignant-chercheur, Université Iba Der Thiam de Thiès (UIDT), Sénégal  
diogye.diouf@univ-thies.sn

## Remerciements

Nous tenons à remercier Bernard Flacelière et Michel Kasser pour les nombreuses suggestions, les documents partagés avec nous et surtout pour les échanges sur leurs missions géodésiques faites en Afrique.

## Bibliographie

- Altamimi Z., (2021). *The International Terrestrial reference Frame: an update*. IGN-IPGP, France, ICG-15, Sep 27 – Oct 1st, 2021.
- Adekoya O. (1992). *Surveying and mapping in Africa—Conventional Methods to Space techniques*. United Nations Provided by the NASA Astrophysics Data System.
- Bamouni A. et Nagabila H. (2020). *Conférence-débat virtuelle sur la géodésie burkinabè*. Revue XYZ • N° 166 – 1<sup>er</sup> trimestre 2021.
- Carrere J., Mestrallet C., Perrichet C. et Sallat R. (1987). *L'œuvre de l'Institut Géographique National en Afrique au sud du sahara et à Madagascar (1945-1985)*. Bulletin d'information de l'IGN 90/2.
- Degbegnon L. (2012). *Enjeux et perspectives du réseau géodésique béninois avec la mise en place des stations permanentes*, FIG Working Week, May 2012, Rome Italie.
- Duquenne F. (2018). *Les systèmes de référence Terrestre et leurs réalisations : Cas des territoires français*. Revue XYZ • N° 154 – 1<sup>er</sup> trimestre 2018
- Duquenne F. et H. (2002). *Cours de géodésie, chapitre 5 : techniques terrestres de la géodésie, es1, ESGT*. E/eca/codist/1/6 (2009). Mise en place du référentiel géodésique africain (afref) proposition de projet.
- El Fettah N. (2003). *Vers une redéfinition*



du référentiel géodésique Marocain. 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003

Geiger, A. Kahle, H.-G. et Reinhart, E. (1984). *Établissement d'un réseau géodésique de premier ordre par mesures Doppler sur satellites en Côte d'Ivoire*.

Gourine B. (2019). *Ajustement global d'un réseau géodésique classique étendu. Application à un réseau test du réseau primordial Algérien*. Revue XYZ • N° 159 – 2<sup>e</sup> trimestre 2019.

Institut National de Cartographie et de Teledetection d'Algérie. (2007). *Rapport national de l'Algérie, IUGG 2007 Perugia* - XXIV IUGG General Assembly.

Institut National de Cartographie et de Teledetection / sous-direction recherche & développement. (2009). *Rapport National de l'Algérie 2005 – 2009*. Neuvième Conférence cartographique régionale des Nations unies pour les Amériques, New York, 10-14 Août 2009.

Kumar, M. (1984). *"Status report on african doppler surveys (ADOS)"* Status report prepared for presentation at the International Symposium on Space Techniques for Geodynamics, 9-13 July in Sapon. Hunarry.

Konan K. (1987). *Modélisation et études statistiques de réseaux géodésiques (application à des réseaux de Côte d'Ivoire)*. Planète et Univers [physics]. Observatoire de Paris, 1987. Français. ffnnt : 1987OBSP0001.

Leblanc J.C. (2022). *Le cheminement du douzième parallèle (première partie)*. Revue XYZ • N° 171 – 2<sup>e</sup> trimestre 2022

Levallois J.J. (1988). *Mesurer la terre : 300 ans de géodésie française : de la toise du Châtelet au satellite*. Paris [France] : AFT

Newling M. (1989). *Towards a new South African geodetic datum*. Submitted to the University of Cape Town in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering. P72-74.

El Fettah N. (2003). *Vers une redéfinition du référentiel géodésique marocain*. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco.

Rapport sur l'état d'avancement de l'initiative "programme d'applications scientifiques et topographiques des

systèmes globaux de navigation par satellite en Côte d'Ivoire" past-gnss Côte d'Ivoire New York (États-unis), 5-7 août 2015.

Salem A. (2002). *Sur l'unification des systèmes géodésiques en Tunisie*, Communication proposée pour le Colloque Scientifique International sur le Cadastre Tunis, 25-26 Octobre 2002.

Salem A. (2006). *L'évolution de la géodésie tunisienne : Des points de Laplace aux stations GPS permanentes*. 120<sup>ème</sup> anniversaire de la création du Service Topographique Tunisien.

Salem A. (2011). *L'Unification des Systèmes Géodésiques Terrestres Tunisiens*, FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011.

Solomon M. (2013). *Determination of transformation parameters for Montserrado county, Republic of Liberia*, thesis of the department of Geomatic Engineering Kwame Nkrumah University of Science and Technology, P20

Winterbotham H. et Mccaw G. (1927). *The triangulations of Africa*. Paper read at the Afternoon Meeting of the Society, 14 November 1927.

Wonnacott R. (2006). *The AFREF Project: Background, Rationale and Progress*. Workshop of 5th FIG Regional Conference Accra, Ghana, March 8-11, 2006.

Wonnacott R. (2012). *AFREF: Concept and Progress*. United Nations Regional Cartographic Conference For Asia and the Pacific, Bangkok 2 November 2012.

Windhoek declaration on an African Geodetic Reference Frame (AFREF), 2002.

Yaw P. (2009). *Establishment of gps reference Network in Ghana*, These.

Yaw P. et Schueler T. (2015). *Renewal of Ghana's geodetic reference network*, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon 2008 May 12-15.

<http://afrefdata.org/>

<http://www.fao.org/3/w7238f/w7238f06.htm>

<http://www.epsg.org/>

[www.fao.org/3/W7238F/W7238f04.htm](http://www.fao.org/3/W7238F/W7238f04.htm)

## ABSTRACT

*The African continent has been many geodetic achievements that have evolved over time, particularly thanks to the evolution of the geodetic instruments and techniques used. The techniques of terrestrial geodesy characterized the first geodetic networks that usually had a local dimension with a quasi-geocentric ellipsoid which could be positioned differently from one country to another. Different realizations of local geodetic networks have thus coexisted for a long time despite their incompatibility.*

*The geodetic traverse of the 12th parallel and the 30th meridian arc have been one of the few initiatives to establish regional geodetic networks established by terrestrial techniques. With the advent of spatial geodesy, a first project to unify geodetic references called ADOS was launched in 1980 to provide Africa with its first geocentric reference system. With the increasing demands on positioning and geodetic benchmarking and the guidance of the international and scientific community on the subject with satellite positioning systems (GNSS), Africa has felt the need to according to international standards. Thus, the AFREF project was launched in 2001 to provide Africa with an unified, homogeneous, precise and accessible reference frame to all users on the continent performing GNSS positioning. The analysis of this situation of geodetic infrastructures in Africa has permitted in this article, to make proposals that should allow Africa to have a regional Datum witch in line to the standard in this area.*

# Valorisation du patrimoine culturel à travers la photogrammétrie et l'intégration de la réalité augmentée

## Musée de l'Histoire et des Civilisations de Rabat, Maroc

■ Hajar OUHSINE - Naoual SARDI - Kenza AIT ELKADI - Ithri AIT HOU - Adam BOURAMDANE - Anas SEDRATI

*Le musée, épicerie de la culture et gardien de la mémoire, fait face, aujourd'hui plus que jamais, à plusieurs défis, notamment la médiation culturelle, l'archivage numérique de ses expositions. En effet, afin de promouvoir les contenus historique et artistique des musées, il faut garantir aux visiteurs une expérience unique incomparable. À cet égard, la réalité augmentée doit relier l'histoire à l'évolution technologique et digitale pour créer un espace muséal attractif, cela à travers l'ajout d'un contenu interactif de formes variées. Dans l'optique d'expérimenter l'utilisation de la photogrammétrie, de la réalité augmentée et de la reconstitution 3D pour la préservation et la valorisation du patrimoine culturel, une application intelligente "BronzEYE" a été développée pour le musée de l'Histoire et des Civilisations de Rabat.*

### MOTS-CLÉS

Réalité augmentée, Photogrammétrie, reconstitution 3D, musée, patrimoine culturel.

Exemple : musée numismatique, Bank Al Maghrib.

Malheureusement, les musées au Maroc font face aujourd'hui à plusieurs obstacles, notamment la médiation culturelle, l'archivage numérique des expositions, la promotion du contenu surtout face à des difficultés de déplacement et la motivation des jeunes qui demeurent plus impressionnés par la digitalisation de l'existant.

L'intégration des nouvelles technologies telles que la réalité augmentée (RA) confirme que le patrimoine culturel et historique muséal et les technologies de digitalisation et de reconstitution 2D/3D ont bien plus en commun qu'on le croit et qu'un mariage entre les deux pourrait nous conduire à de multiples usages à la destination du grand public.

### Contexte

Le patrimoine culturel matériel et immatériel revêt une importance vitale dans tous les pays, car il représente leur identité et leur civilisation. En parcourant le Maroc, on découvre que c'est un pays qui possède un héritage culturel glorieux. Le Maroc compte de nombreux musées sur tout son territoire, couvrant tous les aspects historiques du pays. Ces derniers sont définis par le Conseil international des musées (ICOM) comme étant une institution permanente sans but lucratif, parmi ses objectifs, l'exposition et la transmission du patrimoine pour des fins d'études, d'éducation et de délectation.

Au Maroc, nous avons plusieurs types de musées :

- **Musées ethnographiques** : regroupent des artefacts qui retracent l'histoire d'un peuple. Un musée ethnographique est un musée qui abrite des objets liés aux coutumes et traditions d'une société déterminée. Autrement

dit, un objet ethnographique désigne un objet collecté pendant une enquête ethnographique en tant que témoin d'un peuple. Exemple : musée Batha à Fès.

- **Musées archéologiques** : se distinguent par le fait que ses collections proviennent en partie ou en totalité de fouilles. Exemple : musée de l'Histoire et des Civilisations de Rabat.
- **Musées ethnoarchéologiques** : se distinguent par des objets ethnographiques et d'autres archéologiques.
- **Musées spécialisés** : un musée spécialisé est un musée concerné par la recherche et l'exposition de tous les aspects relatifs à un thème ou un sujet unique non inclus dans l'une des catégories précédentes. Exemple : musée national de la photographie à Rabat.
- **Musées privés** : sont des musées de gestion privée. Exemple : musée du judaïsme marocain à Casablanca.
- **Musées départementaux** : sont des musées dépendant d'autres organismes publics et semi-publics.

### Objectifs

Afin de répondre aux difficultés citées ci-dessus, les acteurs dans la gestion du patrimoine culturel et muséal se focalisent actuellement sur la promotion et la vulgarisation digitale de l'Histoire. Le but est de fournir une motivation intrinsèque des visiteurs du musée qui influence positivement le niveau d'engagement.

Dans cette optique, dérive la réflexion d'un sujet de recherche visant le développement d'une application de RA pour la sauvegarde et la mise en valeur du patrimoine du musée de l'Histoire et des Civilisations qui se trouve au cœur de Rabat, ville lumière et capitale marocaine de la culture.

La solution proposée pour ce musée consiste à concevoir une application



mobile intelligente qui devrait être bénéfique, surtout pour les jeunes qui utilisent beaucoup les smartphones et les tablettes et préfèrent les utiliser lors des visites de musées. Elle présenterait également un substitut efficace au guidage touristique, car l'expérience attendue devrait être intuitive et immersive. Elle doit aider le visiteur à saisir plus d'informations sur le contexte historique des objets en offrant une visite enrichie grâce à une médiation culturelle innovante. La solution vise aussi à divertir les visiteurs suffisamment pour accroître le



Figure 1. Buste de Juba II.



Figure 2. Statuette du Vieux Pêcheur.

niveau d'engagement qui peut se refléter sur le temps passé devant les pièces exposées.

Pour orienter l'étude, les objectifs suivants ont été fixés :

- la modélisation 3D par photogrammétrie terrestre de deux pièces : buste de Juba II (figure 1) et la statuette du Vieux Pêcheur (figure 2) ;
- la reconstitution en 3D des pièces manquantes (la canne à pêche, le panier et le pied droit) de la statue du Vieux Pêcheur ;
- la création du contenu à intégrer dans l'application de RA ;
- le développement de la solution de RA.

### Acquisition des données : quelle technique utiliser ?

■ **La photogrammétrie : un miroir incontournable du patrimoine culturel**

Pour modéliser en 3D les deux objets par photogrammétrie, des photos couvrant la totalité des statues ont été prises avec une caméra professionnelle : Canon EOS 6D Mark II, avec réglages des paramètres nécessaires (figure 3).

Mode	Manuel
Focale	24 mm
ISO	160
Shutter	1/125

Figure 3. Caractéristiques de la caméra utilisée.

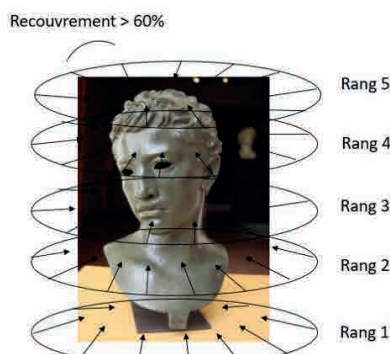


Figure 4. Captures des photos avec recouvrement latéral et longitudinal.

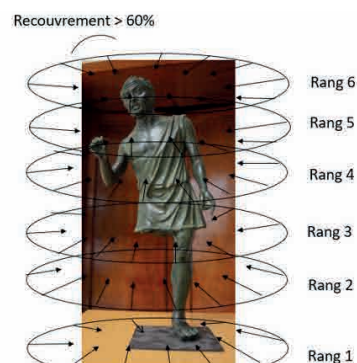
Durant cette acquisition, il faut respecter certaines règles (Agisoft, Manuel d'utilisation) :

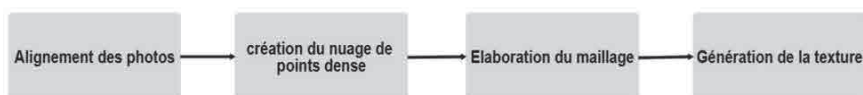
- pour les objets isolés, il faut garder un recouvrement supérieur à 60 % entre les photos (figure 4) ;
- pour éviter de refaire la mission de photogrammétrie et pour obtenir un bon résultat, il faut photographier l'objet à scanner sous tous les angles possibles et il vaut mieux avoir plus d'images que pas assez ;
- il ne faut pas essayer de placer l'objet entier dans le cadre de l'image. Si certaines parties manquent, ce n'est pas un problème si elles apparaissent sur d'autres images ;
- un bon éclairage est nécessaire pour arriver à un résultat de meilleure qualité, mais il faut éviter les clignotements, il est donc recommandé d'éliminer les sources de lumière du champ de vision de la caméra utilisée.

Pour le buste de Juba II, 99 photos ont été prises couvrant la totalité de la statue et 128 photos pour celle du Vieux Pêcheur.

### Modélisation et reconstitution 3D : pas vers une représentation fidèle à la réalité

Pour passer des images 2D à un modèle 3D, nous avons utilisé le logiciel Agisoft Photoscan. C'est une solution de vision par ordinateur. La vision assistée par ordinateur est définie comme la science qui développe des techniques mathématiques pour récupérer la forme en trois dimensions des objets présents dans les images (Szeleski, 2010). Ce programme possède une interface simple permet-





**Figure 5.** Processus général de modélisation 3D sous Agisoft.

tant la génération du nuage de points peu dense, nuage de points dense, maillage tridimensionnel texturé et autres représentations telles que le MNS et les orthophotos (Chiabrando et al., 2015).

Le processus général de traitement des photos et de création des modèles 3D se compose de quatre étapes principales (Agisoft Metashape User Manual) (figure 5).

Afin de raffiner les modèles réalisés sur Agisoft, aiguïser certains détails et lisser quelques zones au niveau des deux statuette, nous avons utilisé un ensemble d'outils offerts par Blender, appelés : "filtres de mailles" (adoucir,

gonfler, remplir...). Ces outils peuvent s'appliquer sur tout le modèle ou bien juste sur une partie donnée.

Les pièces manquantes de la statue du Vieux Pêcheur ont été reconstituées en trois dimensions en se basant sur les interprétations des spécialistes en archéologie et en Histoire.

Lorsque nous cherchons des représentations physiques des œuvres célèbres du passé, les seules options que nous avons sont les représentations artistiques à peine détaillées et imprécises. Cependant, la technologie a progressé au point que nous pouvons utiliser la science pour dépeindre avec précision l'apparence des personnages

historiques d'une manière quasi réaliste. Nous pouvons aussi compléter les pièces manquantes qui ont été détruites ou endommagées grâce aux techniques de la reconstitution 3D.

La reconstitution de la statue du Vieux Pêcheur a été réalisée sous Blender, en se basant sur des interprétations données par les responsables du musée (figure 6).

## Création du contenu

Le musée est un environnement, dont le rôle n'est pas seulement de permettre au visiteur d'explorer et d'acquérir des connaissances, mais aussi de générer des idées et d'apprendre de nouveaux concepts. Afin d'enrichir l'application de fonctionnalités de formats différents, plusieurs composantes ont été choisies :



**Figure 6.** Modèle reconstitué du Vieux Pêcheur et modèle 3D du buste de Juba II.

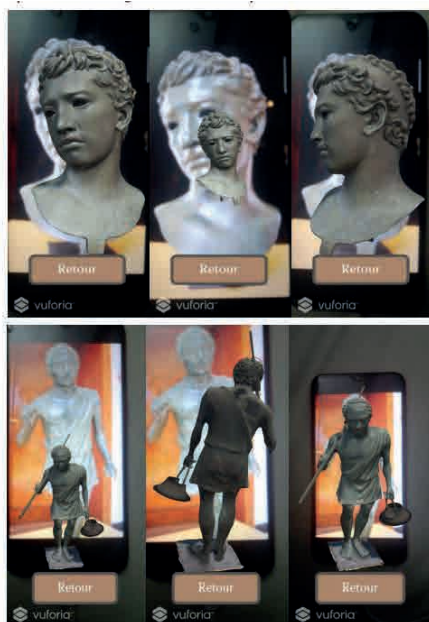


Figure 7. Affichage des modèles après détection des cibles.



- **vidéos** : la narration d'une histoire de manière novatrice à travers une vidéo permettra au spectateur de s'immerger rapidement dans l'Histoire (communication visuelle et auditive) ;
- **audios** : le fait de regarder l'œuvre et d'écouter un audio simultanément au lieu de lire seulement des étiquettes améliore l'engagement du visiteur (communication auditive) ;
- **modèles 3D** : identification de la statuette du Vieux Pêcheur et une meilleure compréhension de l'Histoire (communication visuelle) ;
- **rotation et échelle (manipulation)** : amélioration de l'engagement du visiteur en intégrant des options interactives (interaction).

## Développement de la solution de RA

Les deux modèles réalisés sur Agisoft et raffinés sur Blender ont été exportés sous format .fbx pour conserver la texture sur Unity sous lequel le développement de l'aspect de la réalité augmentée a été réalisé.

La superposition du contenu créé sur les modèles importés a été réalisée via le kit de développement (SDK) de la réalité augmentée Vuforia Engine AR (version 9.8.11). En ce qui concerne l'animation et les outils de rotation, la translation et le changement d'échelle,

ils ont été assurés à travers l'utilisation du package *Lean Touch* (version 2.2.1) comportant les scripts à appliquer sur les deux modèles.

## Conclusion : perspectives poussées de l'utilisation des technologies immersives

La réalité augmentée et la reconstitution historique 3D commencent de plus en plus à pénétrer les musées internationaux afin de créer une expérience visiteur originale, attirer plus de public et dématérialiser les visites. Grâce aux outils offerts par ces nouvelles solutions, plusieurs fonctionnalités sont devenues possibles lors du développement des applications mobiles pour les musées. Ce cas d'étude réel montre l'intérêt majeur de l'intégration de la technologie RA pour la médiation du patrimoine, à la fois par son utilité, son apport informatif et son aspect ludique. La solution proposée présente un champ vaste de perspectives d'amélioration et de développement :

- pour des recherches ultérieures, nous recommandons d'envisager une combinaison entre la photogrammétrie et la lasergrammétrie pour la modélisation des statues et d'évaluer les résultats de cette fusion ;
- nous proposons lors du développement d'applications similaires d'introduire d'autres options plus poussées, par exemple la simulation par des animations 3D du contexte historique des objets. ●

## Remerciements

Nous tenons à remercier spécialement le conservateur du musée de l'Histoire et des Civilisations de Rabat, M. Anas Sedrati et son adjointe, Mme Kawtar Harrar pour leur collaboration, leur appui et aide dans la constitution de la composante historique du travail. Un merci spécial à la Fondation nationale des musées (FNM) pour l'intérêt qu'elle a porté à notre sujet, au nom de son président et de son secrétaire général.

## Contacts

Ing. Hajar OUHSINE - Lauréate de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II  
Hajarouhsine7@gmail.com

Ing. Naoual SARDI - Lauréate de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II Geolambert  
naoual.sardi@gmail.com

Dr. Kenza AIT ELKADI - Institut agronomique et vétérinaire Hassan II - k.aitelkadi@iav.ac.ma

Ing. Ithri AIT HOU - Geolambert  
aithou.ithri@gmail.com

Ing. Adam BOURAMDANE - Geolambert  
contact@geolambert.ma

M. SEDRATI Anas - Conservateur du musée de l'Histoire et des Civilisations  
A.sedrati@fnm.ma

## Références

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7 Publication 2021 from [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_7\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf)

Chiabrando, F., Donadio, E., et Rinaudo, F. (2015). *SfM FOR ORTHOPHOTO GENERATION: A WINNING APPROACH FOR CULTURAL HERITAGE KNOWLEDGE*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W7, 2015 25th International CIPA Symposium 2015, 31 August - 04 September 2015, Taipei, Taiwan.

Musée de l'Histoire et des Civilisations, Dossier de presse.

Szeleski, R. (2010). *Computer Vision : Algorithmes and Applications*. Second Edition. Springer Verlag. ISBN 978-3-030-34371-2, 924 pages.

## ABSTRACT

**Key words:** Augmented reality, Photogrammetry, 3D reconstruction, Museum, Cultural heritage.

*The museum, the epicenter of culture and the custodian of memory, is facing, today more than ever, several challenges, including cultural mediation, digital archiving of its exhibitions. Indeed, in order to promote the historical and artistic contents of museums, it is necessary to guarantee visitors a unique and incomparable experience. In this regard, augmented reality must link history with technological and digital evolution to create an attractive museum space, through the addition of interactive content of various forms. In order to experiment with the use of photogrammetry, augmented reality and 3D reconstruction for the preservation and enhancement of cultural heritage, a smart application "BronzEYE" has been developed for the Museum of History and Civilization in Rabat.*

# Relevé 2D & 3D du marégraphe de Marseille

■ Emmanuel CLÉDAT - Clovis BERGERET - Marius DAHURON - Lilian WECKER - Frédéric YE

*Le marégraphe de Marseille est un monument historique de l'IGN. Pour permettre au plus grand nombre de le visiter (virtuellement), et pour préparer d'éventuels travaux de restauration, l'association des amis du marégraphe a commandité une modélisation 3D. Effectués par les élèves de l'ENSG-Géomatique en utilisant les méthodes de photogrammétrie et de scanner laser terrestre, ces relevés ont permis de produire un modèle 3D intérieur et extérieur, mais aussi des produits 2D : coupes, plans, écorchés.*

## MOTS-CLÉS

Photogrammétrie, lasergrammétrie, drone, nuage de points, maillage, visite virtuelle, géoréférencement, contrôle qualité, coupe, écorché, multitechnique

## Pourquoi un modèle 3D ? Pourquoi pas plus simple ?

Suite à la commande de l'association des amis du marégraphe de Marseille, le premier réflexe de photogrammètre moderne consisterait à délivrer un modèle 3D numérique, c'est-à-dire une représentation du bâtiment sous forme d'un ensemble de points et/ou de surfaces connus en coordonnées 3D, visualisable sur un ordinateur. Ce type de produit cartographique a l'avantage d'être versatile : il est possible d'y mesurer des cotes précises, de le superposer avec d'autres données 3D pour effectuer des analyses quantitatives de différences ou de déformation, de créer des vues en perspective et des vidéos.

Les modèles 3D peuvent être classés en quatre catégories (possiblement combinées) :

- **le nuage de points** : un ensemble de points (souvent colorés) non structurés répartis sur les surfaces matérielles des objets ;
- **le maillage (*mesh*)** : un nuage (souvent un peu moins dense) où les points sont reliés par des triangles adjacents représentant la surface des objets ;
- **reconstruction en primitives géométriques** : les objets de la scène sont représentés par les formes géométriques de leurs conceptions : plans, cylindres, cônes, tores, etc. ou par des surfaces paramétrées quelconques ;
- **BIM (*Building Information Modeling*)** : les données 3D, souvent des primitives géométriques, sont référencées dans une base de données de manière à pouvoir facilement effectuer des recherches et analyses combinant géométrie et sémantique, à la manière d'un SIG.

Le BIM est adapté pour un bâtiment contenant de nombreux éléments et réseaux complexes de natures

**L**es grands chantiers d'aménagement et de génie civil du XIX<sup>e</sup> siècle ont nécessité l'harmonisation de l'intégralité des réseaux de nivellement. Le niveau zéro a été choisi comme la surface de la mer Méditerranée à Marseille pour fixer une référence unique pour toutes les altitudes de France métropolitaine. Ce niveau d'eau est relevé depuis 1885 par un marégraphe : un instrument de mesure couplé à un mouvement d'horlogerie. Ce marégraphe est lui-même abrité dans un bâtiment construit entre 1883 et 1884 qui par synecdoque est appelé le marégraphe de Marseille (une section entière de notre bibliographie est dédiée à l'historique du marégraphe de Marseille).

Le réseau a été fixé en 1897 en effectuant une pseudomoyenne sur les 12 premières années de mesure. L'observatoire est de nos jours un élément (N° 205) du réseau mondial permanent d'observatoires du niveau de la mer GLOSS [1], et constitue la station GNSS permanente MARS00FRA [9]. Depuis 1998, le système de flotteur fonctionne en même temps que le système numérique, mesurant le niveau de la mer par ultrason d'abord, puis par laser depuis 2009. En outre, les mesures continues depuis presque un siècle et demi permettent d'étudier un phénomène qui intéresse les lecteurs d'XYZ depuis plusieurs décennies [3] : la montée des eaux, et donc indirectement les effets du réchauffement climatique.

## Contexte de la numérisation

Le marégraphe de Marseille, possédé et géré par l'IGN, a donc une valeur scientifique et historique qui lui aura valu son classement aux monuments historiques en 2002. Pour promouvoir et faire rayonner cet instrument et ce bâtiment, une association a été fondée en 2021 : L'association des amis du marégraphe de Marseille [8, 7]. Les différentes actions de cette association nécessitent une documentation visuelle décrivant de manière métrique la géométrie du marégraphe qui peut prendre la forme de plans, de coupes et de modèles 3D. Les plans de conception et d'exécution du XIX<sup>e</sup> ont une valeur historique et esthétique mais il était nécessaire de les réactualiser avec des méthodes modernes pour relever le bâtiment tel qu'il existe aujourd'hui. Dans la mesure où ces produits cartographiques ont une vocation pédagogique, il était naturel de faire intervenir des étudiants de l'ENSG-Géomatique (l'École nationale des sciences géographiques qui dépend de l'IGN) pour le travail du relevé 3D des bâtiments. Cette mission a trouvé sa place dans le cursus des élèves du cycle ingénieur, en tant que stage ouvrier. Traditionnellement, les futurs ingénieurs effectuent ce stage en fin d'année scolaire de première année au centre IGN de Forcalquier. Quatre étudiants, encadrés par un enseignant, les auteurs de cette publication, ont été détachés pour numériser le marégraphe de Marseille.



différentes sur lesquels des acteurs variés doivent collaborer pour sa conception (le cas échéant), son entretien, des restaurations ou encore des extensions. Dans un premier temps, une telle représentation des données du marégraphe semblait superflue. Au vu des nombreuses formes complexes des rochers entourant le marégraphe un maillage semblait adapté pour l'extérieur. L'intérieur est représenté par un nuage de points qui pourra, dans un second temps, être maillé ou reconstruit en primitives géométriques.

En revanche, si un modèle 3D semble être une méthode exhaustive pour représenter un bâtiment, il pose des questions de facilité d'utilisation, de pérennité des données et de sobriété numérique.

- Facilité d'utilisation : la visualisation des données 3D a été facilitée ces dernières années par la hausse de la puissance des ordinateurs particuliers, la diffusion des logiciels libres et les visualisateurs en lignes fonctionnant sur un navigateur internet qui permettent de s'affranchir de l'installation d'un logiciel spécifique. Cependant, naviguer fluidement dans des données 3D complexes n'est pas forcément ergonomique ni intuitif pour les personnes qui n'ont pas été habituées à manipuler des objets virtuels ou qui ont des difficultés à voir la 3D.

- Pérennité des données : il est toujours possible de visualiser et de comprendre des cartes datant de l'Antiquité. Pourra-t-on dire la même chose d'un modèle 3D virtuel dans quelques décennies (voire quelques années) ? La pérennité des géodonnées est un sujet complexe [15] qui nécessite une perpétuelle rétrocompatibilité des logiciels de visualisation, et une puissance informatique convenable.

- Sobriété numérique : un modèle 3D de type nuage de points ou maillage peut être très lourd (un modèle basé sur des primitives géométriques est beaucoup plus léger), et donc consommateur de ressources. L'ensemble des données brutes collectées lors de la semaine d'acquisition

totalisent 150 Go, le poids final de notre modèle 3D sous-échantillonné à un point tous les centimètres est de 0,5 Go.

Pour ces trois raisons, il nous a paru nécessaire de panacher les types de nos livrables pour les rendre faciles à consulter et à utiliser, imprimables (donc plus pérennes) et sobres en données.

Les plans, coupes et élévations de façades sont des produits 2D qui, en plus de présenter l'avantage d'être pérennes, sont appréciés par les architectes pour aider à la compréhension de la structure des bâtiments et servir de base à la conception.

Nous avons aussi choisi de créer une visite virtuelle sous forme de "vue-bulle". Cette méthode de visualisation (popularisée par *Google Street-View*) consiste à créer des images panoramiques  $360^\circ \times 180^\circ$  qui s'affichent à l'intérieur d'une sphère au centre de laquelle l'observateur est placé. Il est possible de se déplacer d'une vue-bulle à une autre pour explorer la suite du bâtiment.

Une telle diversité des produits cartographiques pour représenter un même bâtiment a prouvé son utilité dans le cas des bâtiments contenant des réacteurs de centrales nucléaires visualisés

sous forme de plans, de modèles 3D reconstruits en primitive géométrique et sous forme de visite virtuelle par vues-bulles [16; 17].

## Méthodes d'acquisition

Le besoin précis explicité dans la section précédente doit être satisfait avec des méthodes versatiles permettant de créer l'ensemble des produits nécessaires à partir d'une seule acquisition.

La mise en œuvre des méthodes employées : photogrammétrie et scanner laser terrestre géoréférencés par GNSS et par des points de nivellement est un processus de production relativement classique, décrit dans [13, 14] et détaillé dans le rapport rédigé par les étudiants dans le cas du marégraphe [11]. Cet article approfondira les spécificités de ce chantier induites par sa topographie complexe, ses points de nivellement très précis et la variété des produits cartographiques à créer.

### ■ Acquisition photogrammétrique aéroportée par drone

Plus de 600 photos obliques et nadirales ont été acquises avec un appareil photo composé d'un capteur CMOS 1/2 Global Shutter et d'un objectif dont

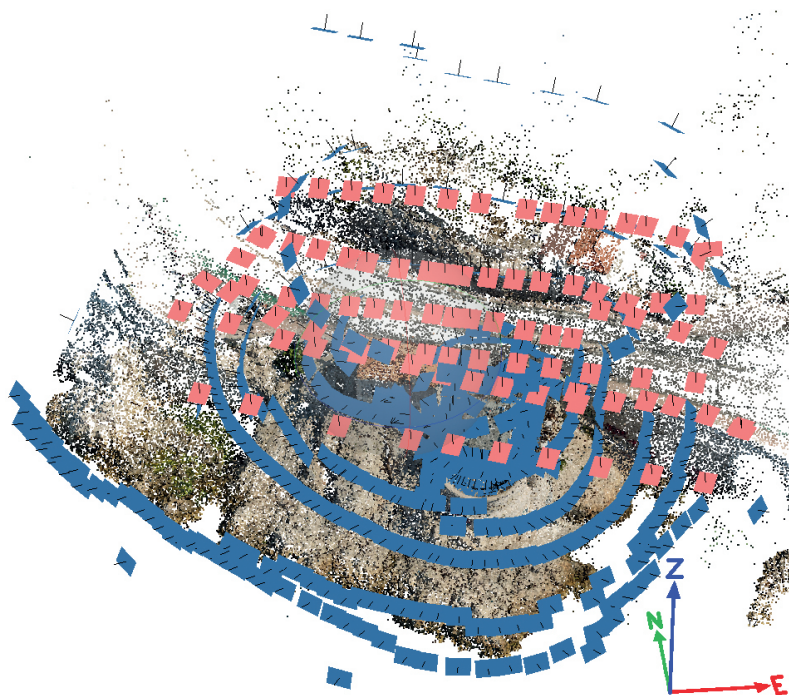


Figure 1. Orientation externe (position et orientation) des photos et position 3D des points homologues.

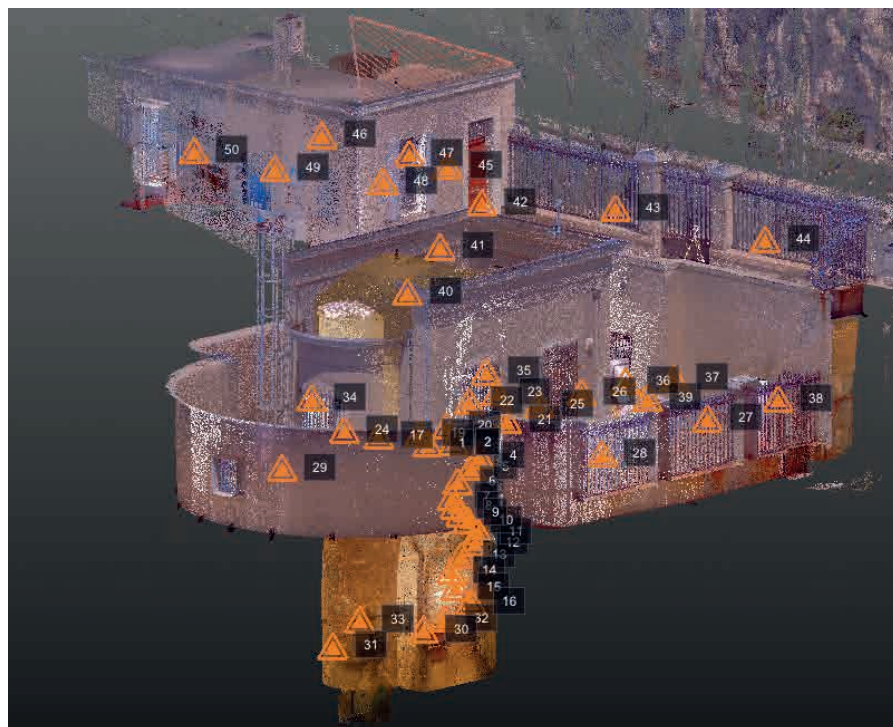
le champ angulaire (sur le long côté de l'image) est de 84°. Lors du vol, le réglage était en prise de vue unique à 12MP de résolution (4000x3000 px) pour un enregistrement plus rapide des photos. Cet appareil est nativement embarqué sur le quadrirotor DJI Mavic Air 2. Les conditions de vol étaient bonnes pour la stabilité du drone avec peu de vent (il faut prendre en compte ce paramètre en bord de mer car, les jours suivants, le mistral aurait empêché tout vol). Le fort ensoleillement rend hétérogène la radiométrie sur les différentes façades, mais dans la mesure où le temps d'acquisition était limité, les couleurs restent cohérentes pour le moment de la journée auquel a été effectué le vol drone.

Le plan de vol (conçu par Rémi Bruno, le pilote du drone) est constitué de bandes d'images nadirales (ce qui suit un plan de vol classique, en rouge sur la figure 1) et de photos obliques visant vers le marégraphe organisées le long d'arcs de cercle formant une sphère autour du marégraphe (en bleu sur la figure 1).

### ■ Scanner laser terrestre pour acquisition de nuages de points et de vues-bulles

Le scanner laser permet d'acquérir des données pour tous les types de produits cartographiques à réaliser. En particulier, il permet d'acquérir avec le même appareil – pour chaque station – un nuage de points 3D et des images destinées à coloriser le nuage de points et à créer les vues-bulles constituant la visite virtuelle. Le géoréférencement des stations de balayage (détermination de la position et de l'orientation) est utile à la fois pour l'assemblage du nuage de points final et pour la navigation au fur et à mesure de la visite virtuelle (pour proposer à l'utilisateur qui visualise une vue-bulle la position des autres positions qu'il est possible de visiter).

Les 49 stations sont recalées relativement les unes par rapport aux autres avec une méthode nuage à nuage [12] qui prend en compte le fait que les stations de scan sont déjà verticalisées lors du calage et grâce au



**Figure 2.** Nuage de points laser recalés en relatif. Les triangles oranges représentent la position des stations de scan.

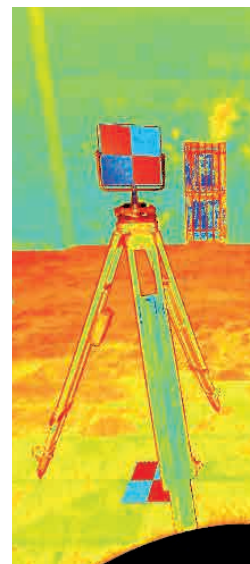
compensateur biaxial. Ainsi, trois paramètres de translation + un paramètre de rotation seulement sont à déterminer pour chaque station. Ce recalage a l'avantage d'utiliser les nuages de points représentant chaque scène, et donc de ne pas nécessiter de cibles ce qui simplifie la mise en place du chantier, réduit considérablement les opérations de nettoyage des nuages de points et réduit les masques induits par ces cibles. Cependant, cette méthode nécessite un grand recouvrement entre deux stations successives, et donc beaucoup de stations, en particulier dans les endroits exigus. L'escalier en colimaçon en fonte reliant la chambre des appareils à la chambre souterraine (figure 8), particulièrement étroit, a nécessité à lui seul 14 stations (figure 2) pour en relever tous les détails et assurer un référencement relatif de l'extérieur jusqu'aux tréfonds du marégraphe.

### Géoréférencement

Le géoréférencement des données photogrammétriques et lasergrammétriques a été effectué grâce à des mesures GNSS sur des points de

calage (GCPs : *Ground Control Points*) matérialisés par des cibles horizontales de type damier 2x2 noir et blanc posées au sol pour la photogrammétrie (en bas de la figure 3) doublées de cibles verticales montées sur trépieds (à une hauteur mesurée au mm près) facilement détectables dans les nuages de points LiDAR (en haut de la figure 3).

Certaines de ces cibles ont servi de points de calage pour la photogrammétrie uniquement (1<sup>re</sup> ligne du



**Figure 3.** Matérialisation d'un point de calage par des cibles damier 2x2 noir et blanc. Le point correspond au centre de la cible au sol. La cible montée verticalement sur trépied a la même position planimétrique et une différence altimétrique mesurée au mm. Vue en intensité retour par le LiDAR : rouge : faible intensité retour, bleu : forte intensité retour.

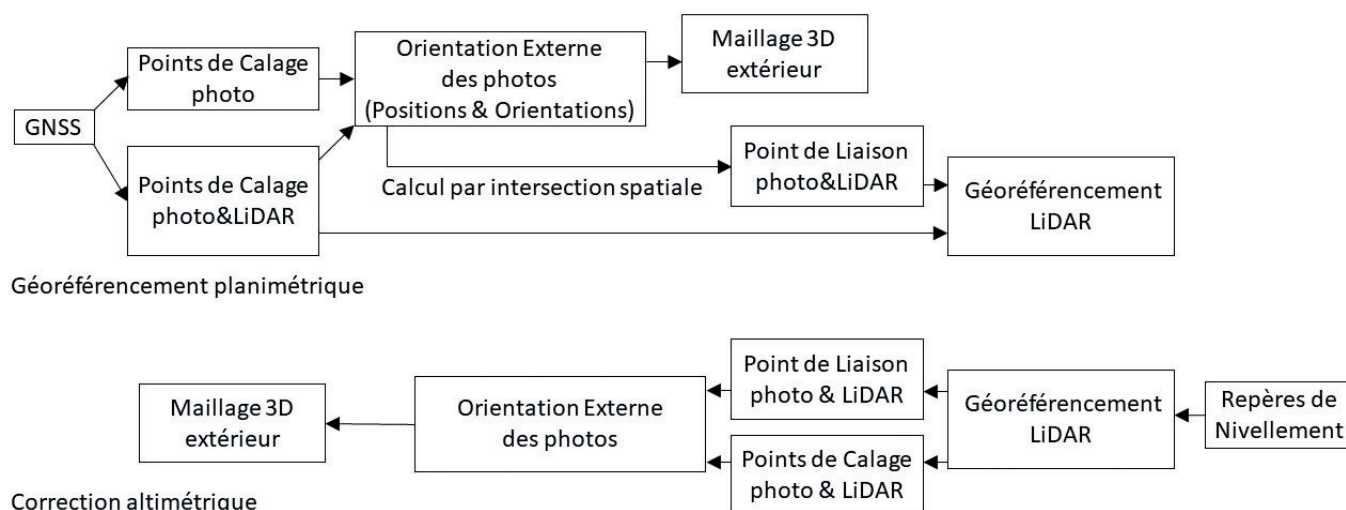


Figure 4. Procédure de géoréférencement des données photogrammétriques et LiDAR.

tableau 1). Ces cibles au sol n'étaient pas doublées d'une autre verticale sur trépied, et étaient réparties à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte du marégraphe, suffisamment loin pour caler précisément le modèle 3D photogrammétrique. D'autres cibles ont servi pour le géoréférencement des photos et du LiDAR (2<sup>e</sup> ligne du tableau 1). Enfin, certaines cibles n'ont pas pu être déterminées par GNSS, du fait des fortes occlusions entre le bâtiment du marégraphe et la terrasse au niveau de la corniche du Président-John-Fitzgerald-Kennedy (cf figure 8). Ces cibles ne sont pas des points de calage, mais peuvent être déterminées par intersection spatiale en photogrammétrie, pour mieux géoréférencer les nuages de points LiDAR (3<sup>e</sup> ligne du tableau 1).

	GNSS	Photo	LiDAR
Calage photo	X	X	
Calage photo&LiDAR	X	X	X
Liaison photo&LiDAR		X	X

Tableau 1. Usage des points de calage et de liaison. La première ligne correspond à des cibles damier placées au sol, les deux dernières lignes correspondent à un couple de cibles : une au sol, l'autre sur trépied comme sur la figure 3.

Le site du marégraphe se distingue par une particularité en géomatique : la présence de nombreux points de nivellement de précision submillimétrique. En particulier, le repère fondamental peut être considéré par convention comme

de précision absolue. Les observations GNSS, en revanche, ont une précision altimétrique de 3 cm. Ainsi, si la planimétrie peut être déterminée par GNSS, l'altimétrie peut être corrigée grâce aux repères de nivellement. La comparaison entre les données géoréférencées et les repères de nivellement ont fait apparaître un systématisme de 22 mm qui peut être corrigé par simple translation verticale des données. La procédure de géoréférencement est résumée par la figure 4.

## Vérifications qualitative et quantitative des résultats

Les critères de qualité que nous avons vérifiés sont la résolution, la précision, l'exactitude, l'exhaustivité.

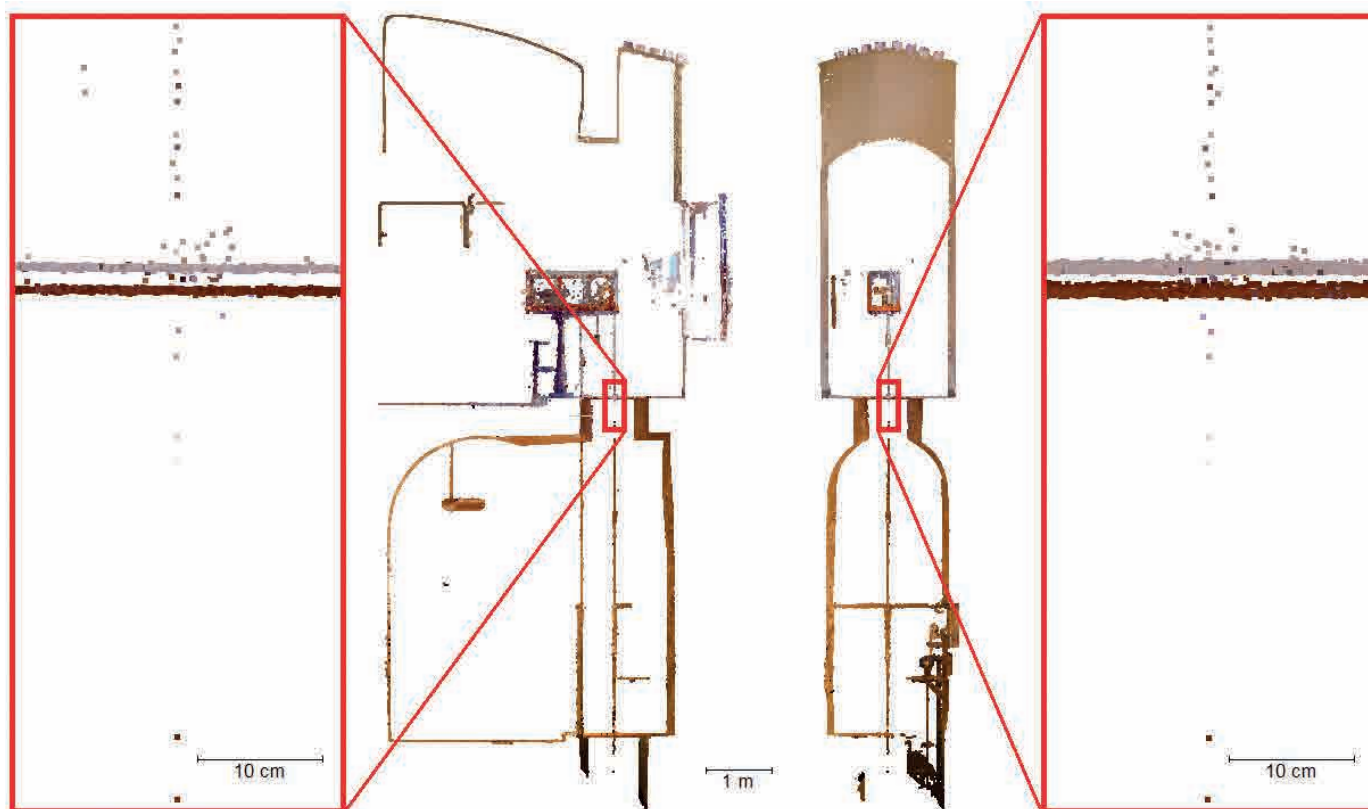
Le mode opératoire choisi permet de couvrir l'extérieur du marégraphe par photogrammétrie avec une résolution (taille du pixel au sol) semi-centimétrique, ce qui permet d'obtenir un nuage de points dense peu bruité avec un pas (distance maximale entre deux points) centimétrique. En lasergrammétrie, la résolution de scan était de 2,6 mm à 5 m, ce qui permet de couvrir l'intérieur du marégraphe avec un espacement de 1 point tous les 3 mm.

L'exhaustivité désigne le fait que l'ensemble des objets à cartographier l'ont été. Malgré le soin apporté lors de la numérisation pour effectuer suffisamment de stations pour scanner l'intégralité des salles et des objets sans masque, une vérification visuelle du nuage de points final est nécessaire.

Finalement, seul le mécanisme du marégraphe présente une densité non convenable, du fait de la présence de surfaces très réfléchissantes. Un relevé photogrammétrique a alors été effectué (figure 7), mais celui-ci reste incomplet et n'est pas suffisamment détaillé pour décrire suffisamment finement les mouvements d'horlogerie.

Le passage le plus crucial en matière de précision est la descente de l'escalier en colimaçon (voir page de couverture de ce numéro et figure 2) pour accéder à la chambre souterraine (figure 7). Les stations effectuées dans cette pièce constituent une antenne sans aucun lien vers l'extérieur. Les erreurs de recilage relatif des stations par méthode nuage à nuage s'accumulent au fur et à mesure de la descente. Une vérification planimétrique est effectuée grâce aux points mesurés sur le fil de suspension du flotteur (cf. [5] section "le fil de suspension du flotteur" page 193) qui joint la chambre des appareils à la chambre souterraine. Une vue en coupe permet de vérifier l'alignement de ce fil au-dessus et au-dessous de son passage à travers un orifice percé dans une plaque qui sépare les deux étages (figure 5).

Les points mesurés au-dessus et au-dessous de cette plaque peuvent être visualisés en planimétrie (avec une vue de dessus, figure 6). La différence de la moyenne des coordonnées X et Y est de 1,5 mm alors que la dispersion des mesures sur le fil a pour écart-type 3 mm.



**Figure 5.** Coupes longitudinale et latérale du marégraphe avec un zoom sur le fil de suspension du flotteur .

Le repère fondamental de nivellement est ancré sur le sol de la chambre souterraine. Un étage plus haut, un second repère est situé sous l'appareil du marégraphe. La mesure de la différence altimétrique entre ces deux repères est connue de manière submillimétrique. La méthode mise en œuvre par les topographes de l'IGN utilise deux mires —une à l'endroit, une à l'envers— mises talon contre talon (cf. [5] section *"Transport de l'altitude depuis le repère fondamental vers*

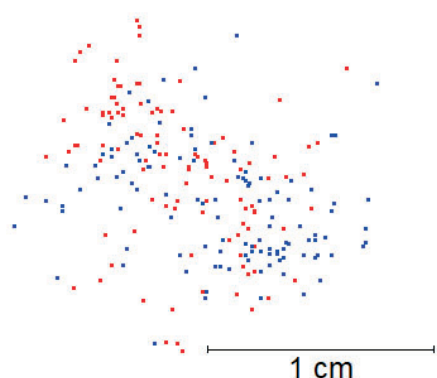
*l'extérieur"* page 440). Cette différence altimétrique, représentée par la double flèche bleue dans la *figure 8*, peut être comparée à la différence altimétrique mesurée dans le nuage de points résultant de l'assemblage nuage à nuage des stations laser. Le calcul de ces doubles différences fit apparaître une erreur de 2 mm.

L'estimation de l'exactitude a été effectuée ponctuellement de manière très classique en étudiant les écarts de fermeture sur des points de contrôle. En supposant une absence de systématisme sur les coordonnées des

points de calage (mesurés par GNSS avec des durées d'observation de plus d'une heure répartie sur une période de trois jours), on peut alors estimer l'exactitude de notre modèle à 3 cm (plus de détails dans le rapport rendu par les étudiants [11]).

## Conclusion

Une fois les différents produits 3D créés et validés, il a été possible d'en dériver des produits 2D : coupe (*figure 7*), plans (*figure 9*), écorché (*couverture*).



**Figure 6.** Points relevés sur le fil, vu de dessus, en rouge pour les points au-dessus de la plaque, en bleu pour les points en dessous.



**Figure 7.** Premier modèle 3D du mécanisme du marégraphe.

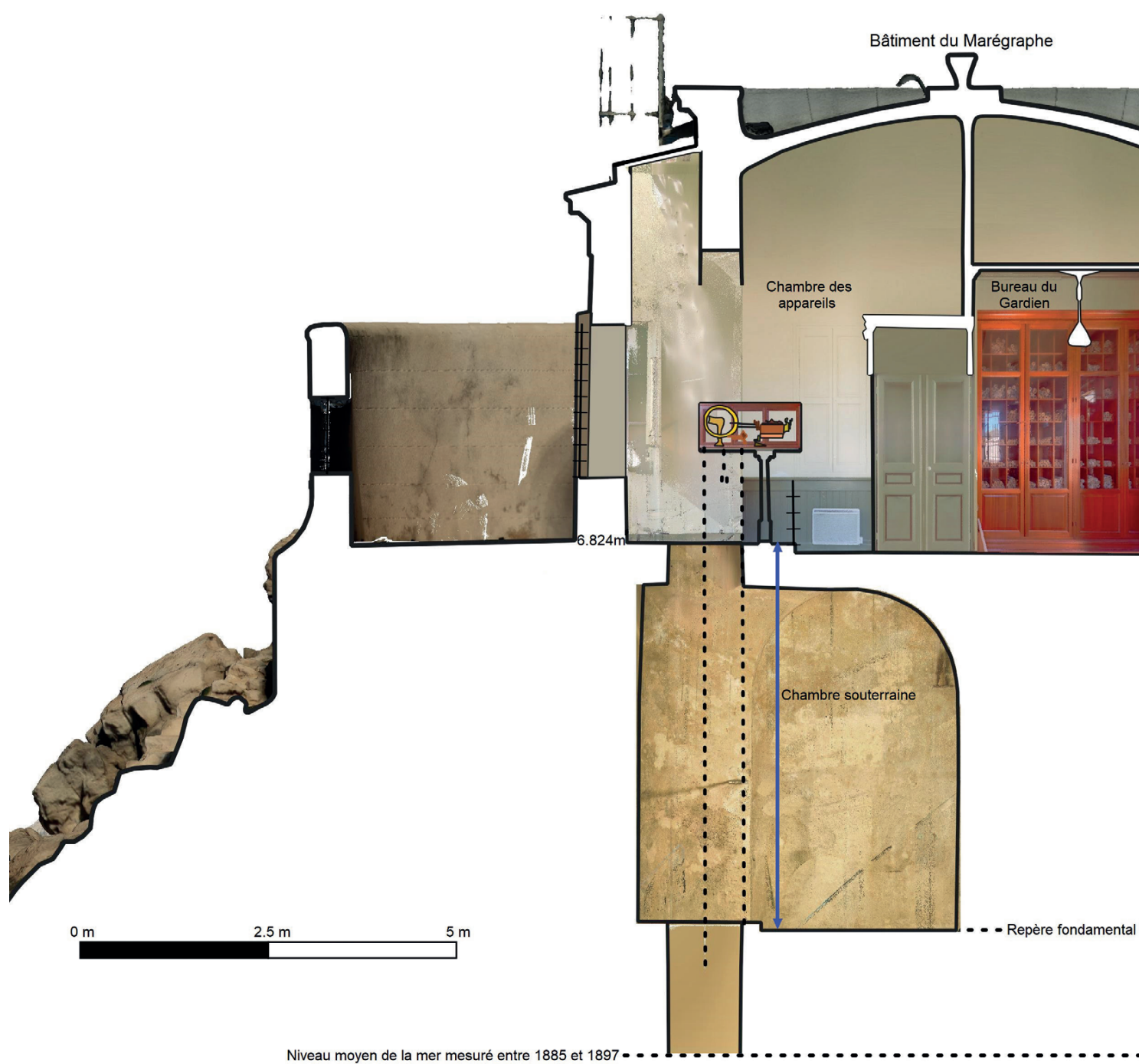
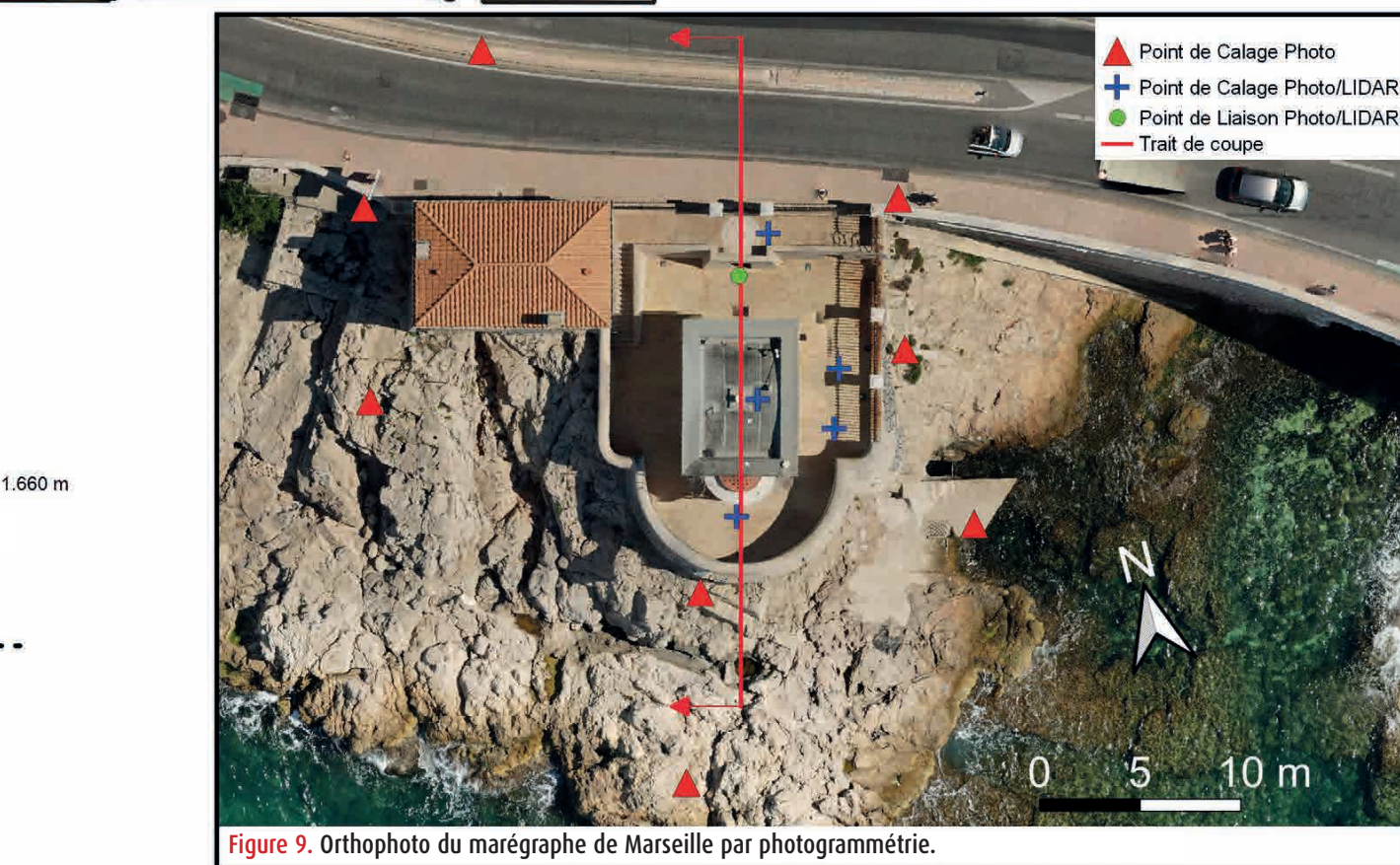
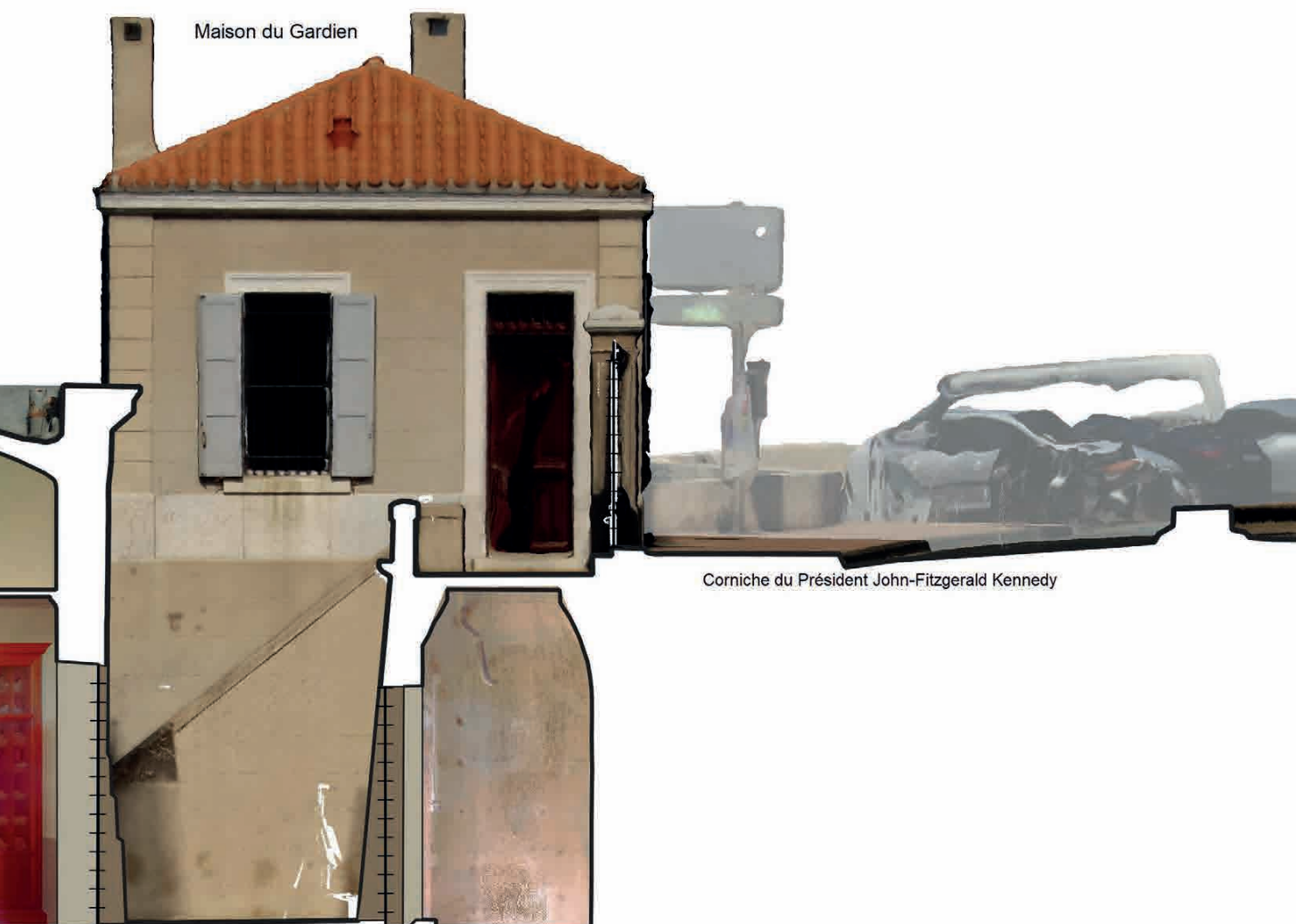


Figure 8. Coupe longitudinale du marégraphe de Marseille par photogrammétrie et lasergrammétrie.





Ces données vont être valorisées en étant diffusées sur Internet pour permettre à tous de découvrir le marégraphe sans se déplacer physiquement. En particulier, la visite virtuelle du marégraphe sera l'occasion de tirer parti des compétences d'étudiants dans un autre domaine : le tourisme. L'exercice, qui sera proposé par Emmanuelle Prevost, enseignante pour le BTS Tourisme du Lycée La Cadennelle, aura pour but de rendre cette visite plus ludique et ergonomique.

Toutes les étapes qui ont été effectuées pour le bâtiment du marégraphe, allant de la redéfinition du cahier des charges jusqu'à la valorisation des données, pourraient être répétées pour le mécanisme du marégraphe lui-même. Sa restauration [6] a mis en exergue sa haute complexité. Les centaines de pièces qui ont été répertoriées par les horlogers pourraient être modélisées sous forme d'un modèle 3D CAO mécanique (Conception assistée par ordinateur) pour assister la conservation.

## Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier Lionel Gaudiot et Patrick Leboeuf, responsables du marégraphe à l'IGN, pour nous avoir permis d'effectuer les relevés dans le bâtiment. Nous souhaitons remercier l'Association des amis du marégraphe de Marseille et en particulier Alain Coulomb et Thierry Person pour avoir commandité ce projet et financé le logement sur place ; Rémi Bruno, le pilote du drone, pour son acquisition photogrammétrique.

Nous souhaitons remercier Patricia Pellardi, responsable du centre IGN de Forcalquier et des travaux terrain de l'ENSG pour avoir mis en relation les commanditaires avec nous, et pour avoir aidé à la gestion logistique et administrative de la mission. Enfin, nous souhaitons remercier Jean-François Hangouet pour sa relecture et son aide à la rédaction. ●

## Contacts

Emmanuel CLÉDAT  
emmanuel.cledat@ensg.eu

Clovis BERGERET  
Clovis.Bergeret@ensg.eu  
Marius DAHURON  
Marius.Dahuron@ensg.eu  
Lilian WECKER  
Lilian.Wecker@ensg.eu  
Frédéric YE  
Frederic.Ye@ensg.eu

## Bibliographie thématique

### Historique du marégraphe de Marseille

- [1] BODC British Oceanographic Data "GLOSS Station Handbook" [https://www.bodc.ac.uk/resources/inventories/gloss\\_handbook/stations/205/](https://www.bodc.ac.uk/resources/inventories/gloss_handbook/stations/205/) site web consulté le 18/08/2022, dernière mise à jour le 04/12/1993
- [2] Lahaye-Collomb A. "Le marégraphe de Marseille" Revue Chasse Marée n° 97 pages 32-33 Avril 1996
- [3] Wöppelmann G., Simon B., Boucher C. "Suivi du niveau moyen de la mer par marégraphe et par GPS" Revue XYZ N° 83 pages 23-29, 2000
- [4] Coulomb A. "Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité" Revue XYZ N° 118 pages 17-24, 2009
- [5] Coulomb A. "Le marégraphe de Marseille, De la détermination de l'origine des altitudes au suivi des changements climatiques : 130 ans d'observation du niveau de la mer" Presses des Ponts, ISBN : 978-2-85978-481-2, 2014
- [6] Le Garde Temps "Réparation du marégraphe de Marseille le Garde-Temps lui redonne vie, suivez notre aventure !" <https://www.le-garde-temps.fr/reparation-du-maregraphe-de-marseille/> site web consulté le 18/08/2022, remise en état du marégraphe totalisateur en 2018
- [7] AAMM "Les amis du marégraphe de Marseille" <https://amis-maregraphe-marseille.fr/> site web consulté le 18/08/2022, création de l'association en 2021
- [8] Coulomb A. "L'association des amis du marégraphe de Marseille" Revue XYZ N° 166 pages 8-9, 2021
- [9] RGP IGN "Réseau GNSS Permanent" <https://rgp.ign.fr/STATIONS/#MARS> site web consulté le 26/09/2022, Dernière installation d'un récepteur GNSS en 2021
- [10] Coulomb A. "Les hauteurs d'eau mesurées au marégraphe de Marseille" Revue XYZ N° 171 pages 40-42, 2022

[11] Bergeret C., Dahuron M., Wecker L., Ye F. "Projet de modélisation du marégraphe de Marseille du 04/07/2022 au 22/07/2022" Rapport de stage ENSG, IGN <http://dfi.ensg.eu/Terrain/> 2022

### Méthodes topographiques

- [12] Besl P. J., McKay N. D., "A method for registration of 3-D shapes," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, doi: 10.1109/34.121791, Feb. 1992
- [13] Grussenmeyer P., Alby E., Assali P., Poitevin V., Hullo J-F, Smigiel E. "Accurate Documentation in Cultural Heritage by merging TLS and high resolution photogrammetric data" Conference Paper in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering · June 2011
- [14] Héno R., Chandelier L. "Numérisation 3D de bâtiments, cas des édifices remarquables" ISTE Éditions, collection SIG et intelligence territoriale 2014
- [15] Buchaut R. "L'information géographique à l'épreuve de la pérennité" Décryptagéo Les Rencontres <https://www.dailymotion.com/video/x1nnf9s> 2014
- [16] Hullo J-F, Thibault G, Boucheny C, Dory F, Mas A. "Multi-Sensor As-Built Models of Complex Industrial Architectures". Remote Sensing; 7(12): pages 16339-16362. <https://doi.org/10.3390/rs71215827> 2015
- [17] Hullo J.-F, Thibault G., Boucheny C. "Advances in multi-sensor scanning and visualization of complex plants: the utmost case of a reactor building" ISPRS Arch. XL-5/W4 pages 163-169 doi:10.5194/ispr-sarchives-XL-5-W4-163-2015 2015

## ABSTRACT

The tide gauge building of Marseilles is a cultural heritage owned by the French National Institute of Geographic and Forest Information (IGN). Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning have been used to produce a 3D model inside and outside the building, a cross-section and a plan. These mapping products were sponsored by the AAMM (association des amis du marégraphe de Marseilles: Association of the Friends of the Marseilles tide gauge building) to allow virtual visits to a large number, and to help future renovation.

## Des mesures hors du commun

■ Paul COURBON - Claude JACQUES

*L'électronique et l'informatique se sont emballées. Avec l'apparition de la technique des diodes laser pulsées, la lasergrammétrie a révolutionné la topographie. Certains lasergrammètres prennent jusqu'à un million de points à la seconde avec une précision qui laisse rêver. Le plus bel exemple en est la reconstitution 3D de la cathédrale de Paris qui pourra être reconstruite à l'identique après son incendie. Mais, ces prouesses techniques n'ont-elles pas mis au rencart certaines aventures humaines ?*

**N**ous allons rappeler quatre de ces aventures vécues en 1973, puis 1985, 1988 et 1989 par nos amis Paul Courbon, Claude Jacques et Thierry Mercier. Elles sont liées à la technique de déplacement sur corde apparue en spéléologie en 1970 (1, 2). Si aujourd'hui cette technique s'est développée, créant le métier de cordiste et permettant l'éclosion de nombreuses entreprises de travaux acrobatiques en falaise ou en façade, ce n'était pas encore le cas à l'époque.

### ■ Rappel sur les déplacements sur corde

Il fallut attendre les années 1960 pour voir l'apparition d'appareils qui allaient révolutionner les techniques spéléologiques et supprimer l'emploi des échelles. C'étaient le descendeur sur corde (figure 1) et le frein (figure 2) inventés par Bruno Dressler. Le Jümar (figures 2 et 3), mâchoire autobloquante, inventé en 1958 par les Suisses Adolph Juesi et Walter Marti pour permettre aux alpinistes de se tirer d'embarras lors d'une descente sur une corde de rappel trop courte, ne fut connu que plus tard, faute de publicité.

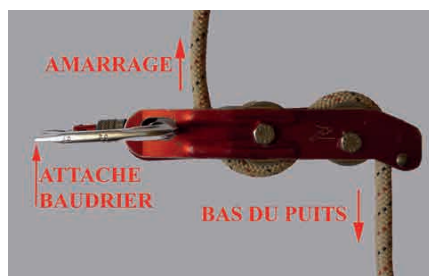


Figure 1. Première invention du "cordisme" : le descendeur de Bruno Dressler qui remplaçait le rappel, permettait de descendre sur corde plus facilement.

En 1970, les spéléologues Georges Marbach, Jean-Claude Dobrilla et Paul Courbon mettaient au point une méthode permettant d'utiliser ces appareils pour explorer les gouffres uniquement sur corde. Ils l'expérimentaient lors de l'exploration en première d'un grand gouffre pyrénéen : les Arres Planères (-772 m) où plusieurs puits de 60 m séparaient la surface de la rivière souterraine située 360 m plus bas (1, 2). Grâce au Jümar, on se servait de la puissance des jambes (figure 4) pour remonter sur la corde. Adieu les échelles ! En 1973, tandis

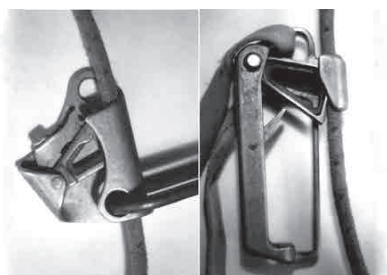


Figure 2. En haut à gauche le frein Dressler qui empêchait la descente sur corde et à droite le premier Jümar qui bloquait aussi la descente.



Figure 3. En haut, la poignée Petzl qui améliore le Jümar.

### ■ MOTS-CLÉS

Auscultation, métrologie, corde, cibles, hauteur

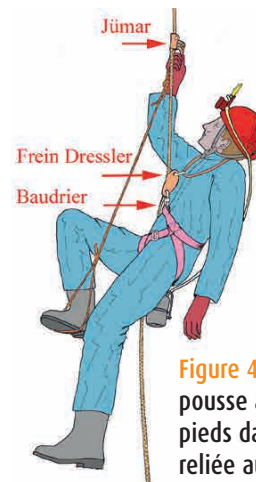


Figure 4. Le spéléologue pousse avec un ou deux pieds dans la longe reliée au Jümar pour progresser. Le frein Dressler l'empêche de redescendre.

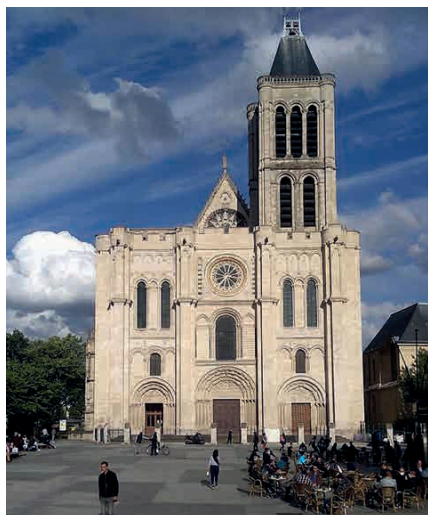
que Paul Courbon publiait le premier Atlas des grands gouffres du monde, G. Marbach et J.-C. Dobrilla publiaient les Techniques de spéléologie alpine qui allaient permettre, petit à petit, la généralisation de cette méthode et, surtout, son enseignement à l'École française de spéléologie dépendant de la fédération du même nom.

### La basilique Saint-Denis (1973)

L'extension de la ligne 13 du métro, sur 2,4 km, jusqu'à Saint-Denis, fut inaugurée le 21 mai 1976. Mais, elle passait à proximité de la basilique-cathédrale, monument qui à partir de la mort du roi Dagobert en 639 et jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, accueillait les sépultures de 43 rois de France. Lors de sa réalisation, on voulut s'assurer que le chantier de creusement n'avait aucune incidence sur la stabilité de la basilique.

En 1973, les travaux spéciaux de l'IGN furent contactés pour contrôler cette stabilité. Pour ce faire, il fallait, à partir de stations fixes déterminées avec précision les unes par rapport aux autres, faire à intervalles réguliers des visées angulaires sur des cibles précises placées sur les parois.

Autrefois, la flèche nord de la cathédrale s'élevait à 85 m de hauteur. Elle fut démontée en 1846 après une tornade



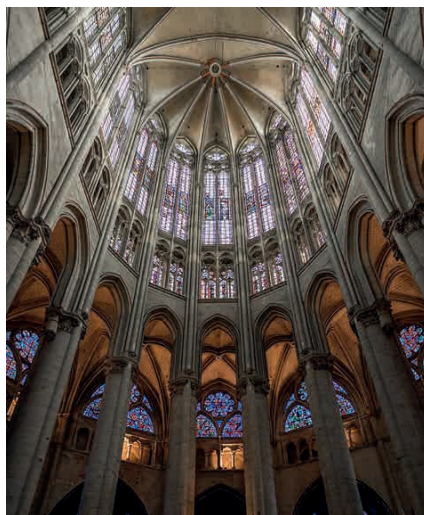
**Figure 5.** La rambarde du clocher de Saint-Denis est à près de 50 m de haut. Une corde y fut attachée pour aller sceller les mires plus bas.



qui l'endommagea. Mais en 1818 a été prise la décision de la remonter avec des fonds privés et des dons. Reste la flèche sud, haute de 58 m à la croix (figure 5).

Comme vu précédemment, à l'époque les techniques de déplacement ou remontée sur corde en étaient à leur tout début. Il n'existait pas, comme aujourd'hui, des entreprises de travaux acrobatiques pour les travaux en falaise, ou en milieu exposé. Aussi avait-on fait appel aux pompiers de Paris pour aller placer ces cibles jusqu'à près de 50 m de hauteur sur la façade de la basilique. On se doute des problèmes que cela posait pour mettre en place des échelles de cette hauteur avec un minimum de sécurité. De plus, une voie de circulation automobile importante, qu'il était difficile d'interrompre, passait encore à l'époque devant la façade.

Rentrant d'une mission de quatre mois en Vanoise, Paul Courbon apprit le problème de la basilique Saint-Denis. Il alla voir aussitôt Jean Carré qui le mit en contact avec les travaux spéciaux en charge de cette opération. Il sut les convaincre, et équipé du léger matériel de progression, armé d'une seule corde accrochée à la rambarde en pierre, il alla se déplacer le long de la façade pour sceller les cibles où on le lui indiquait, équipé d'un sac avec un léger matériel de scellement. Cinquante ans après, il a oublié les noms de ceux qui le guidèrent et demande qu'on l'en excuse.



**Figure 6.** Le travail se fit cette fois-ci à l'intérieur de la cathédrale, dans le magnifique chœur, haut de 48,5 m.

### Cathédrale de Beauvais (1985)

Il fallut attendre douze ans avant que l'IGN soit à nouveau impliqué dans un travail faisant appel aux techniques de déplacement sur corde. Ils concernèrent la cathédrale de Beauvais.

Les concepteurs de cette cathédrale avaient l'ambition de construire le plus grand édifice gothique de France. De 1569 à 1573, avec une croix à 153 m du sol, ce fut la plus haute construction humaine au monde. Mais elle fut victime de plusieurs écroulements et incendies. Aujourd'hui elle reste inachevée puisque seuls le chœur et le transept subsistent. Elle possède le plus haut chœur gothique au monde avec une hauteur sous voûte de 48,50 m (figure 6).

### ■ Comment apparut un problème

Dans les années 1960, les tirants de fer jugés inesthétiques et inutiles furent retirés provoquant des désordres et, vingt ans plus tard, des fissures apparurent.

La DRAC (Direction régionale des affaires culturelles) fit appel à l'IGN pour surveiller la stabilité de la construction. Comme pour la surveillance de barrages, des structures verticales et comme précédemment pour la basilique de Saint-Denis, il fut décidé de faire des visées angulaires sur des cibles collées sur les piliers de la cathédrale.

Problème : comment placer des cibles sur les piliers jusqu'à 45 m de haut ?

Fallait-il employer échelles, échafaudages, grues ? Trop cher, trop lourd, voire impossible.

Restait alors une solution en utilisant des techniques de remontée sur corde utilisées en spéléologie et à Saint-Denis, comme nous l'avons vu précédemment.

Sous la responsabilité de Fred Clerfayts, Didier Drucker, Pierre Kermaïdic, Claude Jacques et Thierry Mercier se portèrent volontaires pour effectuer ces travaux du 20 au 24 mai 1985.

### ■ Application de la méthode

Les bâtisseurs de cathédrales avaient en leurs temps aménagé des trous dans les voûtes pour leur permettre de tirer et monter des charges à l'aide de cordes souvent reliées à une "cage à écureuil" (figure 7).

C'est là que se trouvait la solution. Restait à enlever les bouchons de bois qui obturaient ces trous, et y faire passer nos cordes. Mais bien sûr, aucun trou ne se trouvait à l'aplomb d'un pilier et proche des parois ! Cela nous posait de gros problèmes pour aller sceller des cibles sur les piliers.

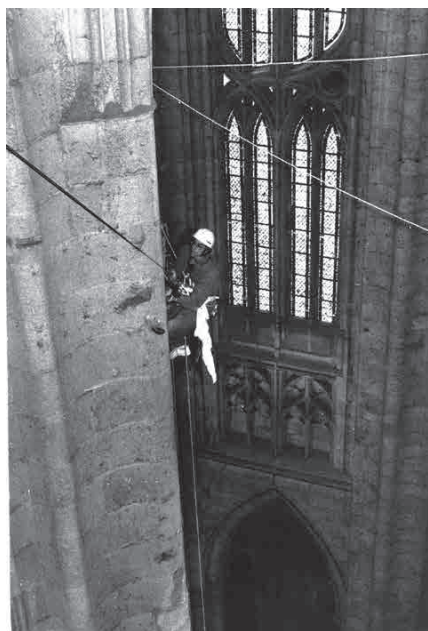
Après plusieurs essais, nous avons décidé d'utiliser les deux trous les plus proches encadrant un pilier. Deux cordes, étaient fixées dans les



**Figure 7.** Dans la voûte, encadrant les piliers : les "trous" !



**Figure 8.** Nos amarrages aux poutres de la charpente, pour arriver à la verticale des trous.



**Figure 9.** Grâce au Jümar, nous pouvions remonter sur la corde jusqu'à la bonne hauteur.

combles et sortaient, par ces deux trous (figure 8). Munis de notre attirail (mirettes, colles, chiffons, pinceaux), nous montions sur une des deux cordes (figure 9), et arrivés à la bonne hauteur, nous tirions sur l'autre corde de manière à nous situer dans l'axe du pilier. Le frein et le Jümar nous permettaient de monter et de nous bloquer à la bonne hauteur sur la corde pour effectuer ces manœuvres. Mais bien qu'arrivés en face du pilier, nous en étions encore éloignés et il fallait se



balancer quelque peu et enserrer le pilier le temps de fixer la cible.

Une fois la mirette collée (figure 11), il était délicat de passer du frein et du Jümar qui nous bloquaient à la bonne hauteur, au descendeur qui nous permettait de redescendre au sol. Toutes ces manipulations se sont faites en respectant les règles de sécurité et sans aucun incident.

Il suffisait de deux personnes dans les combles pour déplacer et arrimer les cordes et deux autres pour effectuer les travaux à l'intérieur de la cathédrale, les deux équipes reliées par talkie-walkie. Nous n'avons pas compté le nombre de fois que nous avons gravi le petit escalier menant aux combles et sur le toit !

Bien sûr il y eut quelques mots inconvenants pour les lieux, lâchés par les opérateurs lors de problèmes, et certains paroissiens qui auraient cru voir voltiger des anges bien au-dessus de leur tête en furent terrifiés ! Un homme pendu à une corde à 40 m dans cette immense cathédrale ne se remarque pas (figures 10a-10b). Mais quelle surprise quand celui-ci descend subitement devant vous depuis le haut des voûtes ! Effet garanti...

Quant aux ouvriers qui travaillaient sur un échafaudage intérieur et qui nous ont vus arriver avec nos cordes et accessoires, ils furent très dubitatifs quand nous leur avons expliqué ce que nous allions faire. Notre travail



**Figures 10a et 10b.** Impressionnant pour le spectateur et encore plus pour l'acteur !



**Figure 11.** La mirette collée est bien gardée !

terminé, ils nous ont très longuement interrogés sur nos "instruments" qui nous ont permis de faire ce travail rapidement, avec cet équipement très léger, et pas cher. Seraient-ils depuis devenus cordistes ?

### ■ Suite

Malheureusement, cette belle aventure n'eut pas les résultats escomptés. Yves Egels a eu la gentillesse de nous les communiquer:

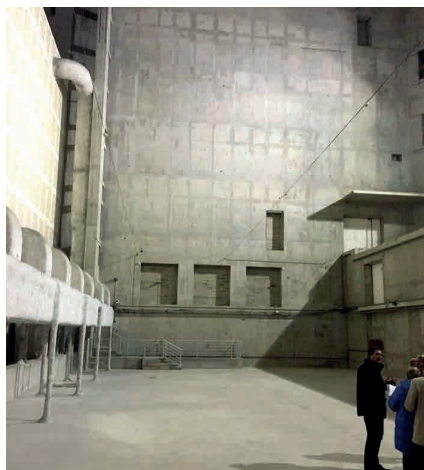
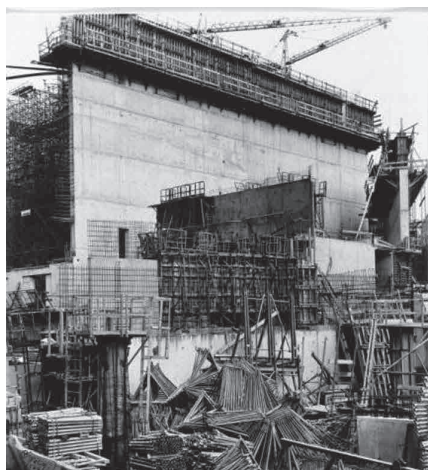
*Quand on compara deux séries (espacées de quelques mois, pour étudier les variations temporelles), catastrophe ! Les piliers faisaient n'importe quoi, s'allongeant, se raccourcissant, se déplaçant sans aucune logique. Quand on est les meilleurs, ça fait mauvais effet !*

*Daniel Schaelstraete chargé des calculs suspecta vite la cause du défaut : le chœur étant très étroit, la plupart des visées étaient proches de la verticale, et comme le calcul était fait traditionnellement en plani puis en alti, le moindre défaut plani était très amplifié par la pente. Et il avait entendu dire que j'avais développé un logiciel de topo "à la mode photogrammètre", tout en 3D, il me demanda d'essayer. Tout rentra en ordre, et, en analysant de plus près, il y avait une station assez mal centrée, qui, comme par hasard était, non sur un repère, mais sur un clou !*

*Mais il y eut une suite, photogrammétrique cette fois : le relevé des arcs-boutants du chœur.*

### Opéra Bastille (1988)

Les travaux de l'Opéra Bastille commencèrent en 1984 avec la démolition de la gare Paris-Bastille. Certains d'entre nous se souviennent sans doute d'avoir pris cette ligne de chemin de fer pour descendre en gare de Saint-Mandé tout



Figures 12a et 12b. Les murs incriminés du chantier de l'Opéra Bastille.



près de l'IGN ! C'était plus proche que l'actuelle gare de Vincennes du RER A. L'inauguration de l'Opéra Bastille aura lieu le 13 juillet 1989.

Mais, déjà en 1988, des malfaçons étaient signalées. Il y en eut bien d'autres, dont la dégradation très rapide de la façade qui a nécessité la pose de 5 000 m<sup>2</sup> de filets de sécurité.

Toujours en 1988, il y eut conflit entre l'entreprise qui installait la couverture métallique d'une salle modulable de l'Opéra et l'entreprise qui avait coulé et élevé les murs de béton sur les 70 m de hauteur. Ceux-ci étaient-ils plans et bien verticaux ? La structure métallique ne pouvait s'y inclure.

Les mêmes types de mesures d'angle sur des cibles collées aux murs, à partir d'une station fixe, devaient lever le doute. Et nous voilà encore une fois avec nos cordes de rappel et nos pinceaux, colle et mirettes ! Cette fois, il suffisait d'arrimer nos cordes à la charpente métallique en construction au sommet et de se laisser glisser jusqu'aux points

à cibler. Pas besoin d'échafaudage, ni de grue, ni de chariot élévateur (figures 12a-12b).

Après le travail exécuté du 2 au 4 novembre 1988, par Claude Jacques, Thierry Mercier et Philippe Nicolon, il s'avéra que l'édification des murs n'était pas conforme.

### Muséum d'histoire naturelle (1989) la grande galerie de l'évolution

En 1989 étaient prévus des travaux de rénovation de la galerie de l'évolution au Muséum d'histoire naturelle de Paris. On voulait s'assurer que les surcharges créées au cours de ces travaux de rénovation n'allaient pas créer de déformations sur les piliers de fonte soutenant le bâtiment. Comme précédemment, cette stabilité pouvait être mesurée par des visées sur des cibles à partir de points connus avec précision. Thierry Mercier et Philippe Nicolon colleront des mirettes sur les piliers en fonte

(figure 13) avant le début des travaux, suspendus à leur corde de rappel.

### Et depuis...

Les travaux sur cordes se sont généralisés et un nombre considérable d'entreprises de travaux acrobatiques se sont constituées pour nettoyer des falaises au-dessus des routes et voies ferrées, les vitres sur des tours, ou même emballer l'Arc de Triomphe, et encore nettoyer Notre-Dame de Paris ! En 1989, les travaux sur cordes sont réglementés par l'article R4323-89 qui impose, entre autres, une formation adéquate et spécifique aux opérations envisagées. On compte actuellement plus de 8 500 cordistes en France. Ils doivent suivre obligatoirement une formation et obtenir un certificat de qualification professionnelle (trois niveaux). Plusieurs agents de l'IGN, ont obtenu ce diplôme. Reste à trouver ce genre de travail !

Il y avait bien le changement des prismes dans le stade Charléty à Paris, que l'IGN auscultait tous les ans, du matériel neuf avait été racheté, mais le contrat n'a pas été reconduit... Depuis, d'autres travaux de ce genre ont été effectués à la cathédrale d'Amiens par Jacques Beilin (enseignant à l'ENSG). Souhaitons que les compétences et le matériel acquis puissent encore servir. ●

### Contacts

Paul COURBON - paul.courbon@yahoo.fr  
Claude JACQUES - clodjac@gmail.com

### Bibliographie

- (1) Paul Courbon, 2003, *Chroniques souterraines*, Chap. XVI L'évolution de la spéléologie, p. 223-230, Éd. les Abymes,
- (2) Paul Courbon, 2015, *Spéléo magazine* N° 92, Histoire, La progression sur corde, pp. 30-35



Figure 13. La galerie de l'évolution.

### ABSTRACT

*This paper describes methods for setting up targets at great heights during the monitoring of historic buildings. During the 70's and 80's, rope ascents were used at IGN (French Geographical Institute), inspired by caving and climbing methods revived by the authors.*

4L TROPHY 2023

# LES AVENTURIERS DU TACHÉO PERDU

Deux jeunes de l'ESGT se lancent dans la folle aventure du plus grand raid humanitaire. Nicolas et Cécile vous emmènent avec eux pour parcourir le désert marocain.

## QU'EST-CE QUE LE 4L TROPHY ?

- Un raid humanitaire de 10 jours entre Biarritz et Marrakech
- 3 pays traversés, 5 000km parcourus
- Aide apportée à des enfants au Maroc et à des familles françaises
- Plus de 900 équipages de jeunes
- Une incroyable aventure dont vous pouvez faire partie



Le 4L Trophy collabore avec 2 associations : Enfants du Désert et La Croix Rouge Française. Ainsi, chaque équipage achemine des fournitures scolaires et sportives qui seront redistribuées à des enfants marocains dans le besoin, par l'association Enfants du Désert.

Avec la Croix-Rouge Française, 10 kg de denrées non périssables sont récoltés par les équipages à destination de familles dans le besoin en France.

## QUI SOMMES-NOUS ?

Nous sommes tous deux étudiants en deuxième année du cycle ingénieur de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes.



Notre école encourage aussi les projets humanitaires avec diverses associations qui œuvrent dans des pays étrangers et c'est fort de ce soutien que nous nous lançons dans l'aventure 4L.

## COMMENT NOUS AIDER ?



Pour nous lancer dans cette aventure et faire face aux rudes obstacles que le désert nous réserve, il nous faudra nous équiper. Les moyens de nous aider sont nombreux : un don financier déductible des impôts, qui nous aidera à financer l'inscription, acheter et préparer la 4L avant le voyage, un don matériel comme des fournitures scolaires (papiers, stylos, cartables, cahiers...) ou encore un partenariat sous forme de publicité sur la 4L ou sur nos réseaux.

Si vous êtes intéressés pour nous aider dans cette aventure, vous pouvez nous envoyer un mail sur notre adresse : [aventuriers.tacheo@gmail.com](mailto:aventuriers.tacheo@gmail.com)

Si vous avez envie de suivre le déroulement de nos péripéties, nos comptes Facebook et Instagram (@tacheo2023) sont là pour relayer les dernières avancées de l'équipe.

Vous pouvez aussi scanner le QR Code ci-dessous qui vous donnera accès à présentation de notre projet plus détaillée et à notre cagnotte.



Nous comptons sur le monde des géomètres !

# Charles Pollock à l'ombre de Jackson

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Les expositions des fonds régionaux d'art contemporain (FRAC) contribuant grandement aux connaissances et vulgarisation de l'art géométrique, la rubrique "Art et géométrie" y a déjà puisé plusieurs sujets. À l'été 2022, celui de Clermont-Ferrand a permis de découvrir et d'apprécier le travail de Charles Pollock dont l'œuvre s'est trouvée quelque peu en retrait de celle de son frère cadet, Jackson, un des maîtres de l'abstraction du XX<sup>e</sup> siècle.*

## Le FRAC Auvergne

Institution reconnue d'intérêt général, soutenue par le conseil régional Auvergne-Rhône-Alpes, la DRAC Auvergne-Rhône-Alpes, Clermont Auvergne Métropole, la ville de Clermont-Ferrand et le conseil départemental du Puy-de-Dôme, le FRAC Auvergne a été créé en 1985 pour servir la création artistique contemporaine, de préférence celle relative à l'image. En 1998, un club de mécènes s'est constitué pour soutenir ses attractivités culturelle et économique qui concourent à l'enrichissement de la collection et à la gratuité de l'offre d'une vingtaine d'expositions par an. En attendant d'investir prochainement l'ancienne halles aux blés en cours de rénovation, un bâtiment du XVIII<sup>e</sup> siècle emblématique de la ville, le FRAC accueille les visiteurs dans un ancien magasin de la rue du Terrail, au cœur du centre historique.

Après l'acquisition, en 2021 d'une importante peinture et d'un collage pour sa collection, le FRAC Auvergne a consacré en 2022 à son auteur, Charles Pollock, une exposition à caractère rétrospectif pour présenter un peintre dont l'œuvre est méconnue en France.

## #78

C'est en 1967 que Charles Pollock a réalisé #78, une peinture acrylique sur toile de 213,5 cm x 127 cm. Le tableau,



qui s'impose par sa dimension, sa présence dans l'espace, présente une composition géométrique opposant des couleurs chaudes et des couleurs froides. Les aplats s'inscrivent dans des polygones quasi réguliers étant observé que leurs couleurs sont légèrement nuancées, de façon inattendue, puisqu'elles s'éclaircissent depuis le haut vers le bas. La bande orangé rouge, verticale au centre gauche qui forme un trapèze abouti, presque rectangle, attire le regard et se

présente comme la figure dominante du tableau. Si l'on en reste à la vision dans le plan vertical, la juxtaposition des deux figures oblongues de chaque côté de la forme rouge génère un effet "accordéon" et conduit à la perception d'un semblant de mouvement.

*A contrario*, si l'on regarde le tableau comme une vue de dessus on pourrait alors se trouver devant un parcellaire agricole et son chemin d'exploitation, après remembrement, aux couleurs revisitées.



## NY18 1969

De même hauteur que #78, mais plus large encore (152,5 cm) NY18, la deuxième pièce maîtresse de l'exposition 2022, datée de 1969, tout aussi géométrique et acrylique sur toile, présente cette fois des polygones réguliers rectangle, parallélogrammes et presque trapèzes. Pour autant, la géométrie ne prime pas. En effet, elle s'efface devant les couleurs du tableau qui attirent l'œil et le retiennent comme un aimant. Jean-Charles Vergne, directeur du FRAC explique l'évolution de la peinture de Charles Pollock au fil des décennies par *"la manière dont il s'est progressivement approché de la couleur, de ses résonances avec la lumière, de ses agencements complexes avec des systèmes de composition toujours expérimentés dans une succession d'intervalles et d'écarts précautionneux"*.

Le plus saisissant est l'encadrement du sujet aux diverses bandes, présentées de travers, par des couleurs évanescentes qui renvoient aux palettes de Josef Albers ou de Mark Rothko.

## Charles Pollock

Né en 1902 à Denver (Colorado) et mort à Paris en 1988, Charles Pollock, est un peintre américain. Aîné d'une fratrie de cinq garçons, dont le benjamin est Jackson, il passe son enfance dans l'ouest des États-Unis. Ses études artistiques révèlent un intérêt pour les arts mexicains, en particulier pour la peinture murale. À New York, où il s'installe en 1926, il rencontre le peintre Thomas Hart Benton, dont il deviendra l'élève, l'assistant et l'ami, qui influencera son œuvre jusque dans les années 40. En 1934, il a effectué avec son frère Jackson qu'il a pris sous son aile, un long voyage, par un certain côté initiatique, à travers les États-Unis alors en récession. Admiratif de la vocation de Charles, Jackson avait dès lors décidé de peindre comme lui et le rejoint à New York dès 1930, à 18 ans.

Charles Pollock est d'abord un peintre figuratif notamment tourné vers le social qui, à la fin des années 40, devient un peintre abstrait. Il se révèle coloriste raffiné, maîtrisant à sa façon les



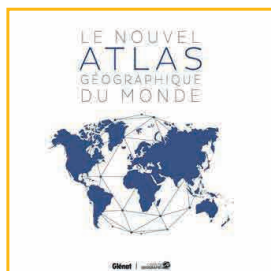
© FRAC Auvergne Collection privée

nuances, les valeurs et les atmosphères, tout en retenue. Dans sa carrière, il a été tour à tour créateur d'affiche, caricaturiste, maquettiste ou encore enseignant, mais sans jamais cesser de peindre. Il se retire en famille à Paris en 1971, où sa fille est née, où il se sentait plus proche des impressionnistes et de leurs œuvres qu'il appréciait tant.

Pour sa part, Jackson acquiert la notoriété jusqu'à devenir l'un des plus importants peintres de l'expressionnisme abstrait au monde, notamment par l'utilisation de la peinture en gouttes, en coulures et autres éclaboussures, sur grand format. Il est mort prématurément dans un accident de voiture en 1956. Le film Pollock (2001) réalisé par Ed Harris retrace sa vie.

\*\*\*

Depuis plus de vingt ans, convaincues de la qualité de la production de Charles Pollock, sa fille Francesca et sa femme Sylvia veillent à la promotion de son œuvre. Leur long travail d'archivage et de diffusion a permis aux créations de sortir de l'ombre, non seulement afin de les faire connaître, mais aussi pour montrer que Jackson a un aîné dont le travail mérite grandement d'être connu et exposé. Elles réparent ainsi la volontaire éclipse de celui qui, conscient de la valeur des créations de son plus jeune frère, savait bien que l'élève a fait mieux que son tuteur. ●



## ■ Le nouvel atlas géographique du monde Un livre de référence pour partir à la découverte du monde !

Conçu par les plus grands spécialistes internationaux de cartographie, Libreria Geografica et les Éditions Glénat, cet atlas est l'ouvrage de référence indispensable pour tous les curieux et passionnés de cartes du monde. Grâce aux méthodes de pointe de la cartographie numérique, les cartes bénéficient d'une précision exceptionnelle.

Libreria Geografica a recueilli le patrimoine de l'Istituto Geografico De Agostini, éditeur depuis plus d'un siècle des atlas géographiques et cartographiques dont la qualité est mondialement reconnue. L'atlas s'articule en diverses sections : cartes physiques et politiques entièrement à jour ; photographies satellite de la Terre et du Système solaire en grand format ; cartes thématiques de la France : géologie, météorologie, économie, démographie... ; tableau d'assemblage pour faciliter la consultation des cartes par zone géographique ; toponymie exploitant les noms locaux officiels ; planisphère indiquant les fuseaux horaires terrestres ; index répertoriant 120 000 noms de lieux ; glossaire de 1 000 termes géographiques.

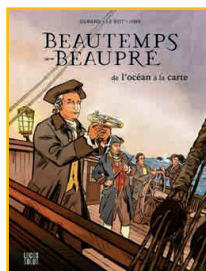
Cet ouvrage de référence propose une nouvelle réponse aux défis posés par la modernité, tout en préservant sa vocation première de promouvoir la culture géographique.

### ► GLÉNAT

**LIBRERIA GEOGRAFICA**  
35,50 € - 368 pages  
ISBN : 978-2-34-405404-8

## ■ Beautemps-Beaupré De l'océan à la carte Malo DURAND - Erwan LE BOT - Jiwa

Quand Lapérouse et son Astrolabe disparaissent dans le Pacifique Sud, c'est un véritable drame national.



L'expédition d'Entrecasteaux part en 1791 à sa recherche et embarque un aréopage de scientifiques, astronomes, botanistes... Parmi eux, un hydrographe d'exception : Charles-François Beautemps-Beaupré. L'homme qui inaugure l'ère de l'hydrographie de précision, a-t-on dit lors de son entrée à l'Académie des sciences... Pour raconter en BD ce personnage méconnu et pourtant essentiel de l'histoire maritime française, les auteurs ont choisi le moment particulier de cette dernière et périlleuse exploration au siècle des Lumières, lancée en pleine Révolution française.

Ils embarquent les lecteurs dans une aventure avant tout maritime vers les mers du Sud inexplorées, mais aussi historique et scientifique, avec l'objectif de faire connaître ce que l'on doit à Beautemps-Beaupré et à ses méthodes, reprises dans le monde entier. Artisan d'une cartographie exhaustive des côtes françaises, il forme les premiers ingénieurs hydrographes au sein d'un service créé par Louis XV en 1720 qui est l'ancêtre du Shom.

On fête en France les 300 ans d'hydrographie française et la permanence de ce service qui réalise notamment les cartes marines, les annuaires des marées...

**Malo DURAND** est scénariste BD, notamment dans la revue *Casier(s)*. Il préside le festival Brest en Bulle (12 000 visiteurs en 2019).

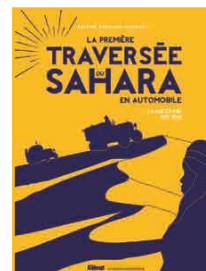
**Erwan LE BOT**, dessinateur formé à l'école de BD d'Angoulême, est aussi carnetiste et professeur d'arts plastiques sur une île bretonne.

**Jiwa** est parfois musicien ou graphiste mais souvent auteur-illustrateur (Maison du Rhu, KVB, *Casier(s)*...).

Tous les trois ont signé *Jazz Lieutenant*, album BD très remarqué, paru en 2018 chez Locus Solus.

### ► LOCUS SOLUS

En partenariat avec le Shom & la ville de Brest - Bande dessinée  
16 € - 72 pages couleur avec cahier documentaire & historique  
ISBN : 978-2-36-833289-4



## ■ La première traversée du Sahara en automobile Le raid Citroën 1921-1922

Ariane AUDOUIN-DUBREUIL

Une édition anniversaire pour célébrer les 100 ans d'une traversée transsaharienne historique.

Le 17 décembre 1922, André Citroën lance sur les pistes chamelières de Tombouctou une flottille d'autochenilles. Pour la première fois, des automobilistes partant d'Algérie atteignent les rives du Niger à Tombouctou. Ce raid, en quinze étapes et vingt et un jours, va permettre d'établir une liaison entre l'Afrique du Nord et le Soudan, et ouvrir une voie d'accès vers les pays du cœur d'Afrique, à l'époque terriblement isolés.

Cette première transsaharienne automobile met un point final à la longue et lente pénétration du Sahara par l'automobile et l'avion, en 1910 et 1921. Durant cette époque, des hommes courageux, automobilistes et aviateurs des escadrilles d'Algérie et de Tunisie, tentèrent de franchir le Grand Erg et le Tanzeurout ; certains y laissèrent la vie. Leurs périlleuses tentatives ouvrirent la voie au raid Citroën.

Pour nous faire revivre les différentes étapes de cette Croisière des sables, Ariane Audouin-Dubreuil a réuni des documents inédits tirés de riches archives léguées par son père, qui fut l'un des pionniers de l'exploitation du Sahara.

Elle est la fille du commandant Louis Audouin-Dubreuil, chef des missions Citroën Centre-Afrique 1924-25 et Centre-Asie 1931-32. Elle a effectué de nombreux voyages, dont une traversée de l'Afrique jusqu'à Madagascar dans les années 1960, avec une troupe théâtrale missionnée par André Malraux, membre du conseil d'administration de la Société de Géographie, Ariane Audouin-Dubreuil organise régulièrement des conférences sur le thème des croisières Citroën.

### ► GLÉNAT

35,50 € - 144 pages  
ISBN : 978-2-34-405553-3



## ■ L'univers comme vous ne l'avez jamais vu

Charles LIU

*Spectaculaire périple à la découverte du cosmos, "l'univers comme vous ne l'avez jamais vu" vous raconte la naissance et l'évolution de l'Univers, du Big Bang à nos jours et au-delà.*

Étape par étape, Charles Liu retrace l'histoire de l'espace et du temps depuis les premiers instants après le Big Bang jusqu'à la création de notre Système solaire, l'apparition de la vie sur Terre, son peuplement, la naissance des civilisations et l'essor de la science et des technologies. La flèche du temps, qui court de page en page, vous donne des repères tout au long de ce voyage initiatique, illustré par des images saisissantes. Une chronologie fascinante de l'Univers en expansion et de notre place dans cette histoire !

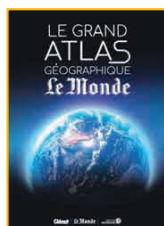
Charles LIU est professeur de physique et d'astronomie au College of Staten Island à New York, président de l'Astronomical Society of New York et membre de l'American Astronomical Society. Ses recherches portent sur les galaxies et l'histoire de la formation des étoiles dans l'Univers. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages de vulgarisation, dont 3 minutes pour comprendre 50 grandes théories et découvertes sur l'Univers.

Traduit de l'anglais (États-Unis) par Charles FRANKEL.

► DUNOD - 25 € - 192 pages  
ISBN : 978-2-10-084269-8

## ■ Le grand atlas géographique du monde (5<sup>e</sup> ED)

Auteur(s) : Collectif



C'est la réédition du grand atlas géographique. Un tour du monde en 400 pages avec cet ouvrage de référence, véritable invitation au voyage et porte d'entrée sur la géographie plurielle de notre planète bleue.

► GLÉNAT - LIBRERIA GEOGRAFICA  
59,95 € - 464 pages  
ISBN : 978-2-34-405529-8



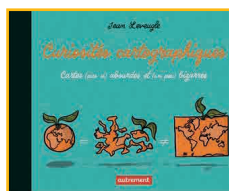
## ■ Osons la nuit - Manifeste contre la pollution lumineuse

Johan EKLÖF

*"Dans le ciel jaune des villes (que nous avons créées), les étoiles sont rares, et beaucoup d'entre nous ne savent même plus à quoi ressemble la Voie lactée. Nous sommes privés de l'une des grandes expériences de la nature : le spectacle de la voûte céleste, avec ses perspectives vertigineuses, ses étoiles filantes, voire, en quelques occasions choisies, la beauté stupéfiante de ses aurores boréales."*

Johan EKLÖF est un chercheur et écologiste suédois, titulaire d'un doctorat de zoologie, enseignant à l'Université de Stockholm dans le département de l'Écologie, l'Environnement et des Sciences du Végétal. Il est l'auteur d'ouvrages sur l'évolution des animaux de la nuit, notamment du livre Bats, In A World of Echoes (Springer), consacré aux chauves-souris, dont il est une référence de renommée internationale. Alarmé par les conséquences de l'activité humaine sur la nature, témoin des impacts de la pollution lumineuse sur la vie nocturne, il s'engage écologiquement pour nous partager ses découvertes scientifiques et sa passion poétique pour la nuit.

► TANA  
19,90 € - 270 pages  
ISBN : 979-1-03-010433-2



## ■ Curiosités cartographiques Cartes (pas si) absurdes et (un peu) bizarres - Quand la BD rencontre la cartographie

Jean LEVEUGLE

Les cartes disent-elles toujours la vérité ? Comment ne plus confondre méridiens et parallèles ? Une carte à grande échelle tient-elle dans la poche ? À quoi ressemblerait une carte dessinée par Mondrian ou Kandinsky ? Que voit un

daltonien quand il regarde une carte ? Pour ou contre la cartographie ? L'auteur répond (ou pas) à toutes ces questions et surprend le lecteur, qu'il soit géographe ou simple curieux, avec plus de 100 cartes impertinentes et drôles, parfois absurdes mais (presque) toujours sérieuses. Il s'amuse avec les conventions cartographiques, en prend le contre-pied, brouille les cartes... Honnêtement, on en perdrait presque le nord !

Jean LEVEUGLE est géographe et auteur de bandes dessinées de vulgarisation scientifique. Lorsqu'il découvre les terribles déformations inhérentes à toute projection cartographique, il achète un globe, jurant, mais un peu tard, que l'on ne l'y prendrait plus.

► AUTREMENT GÉOGRAPHIE  
19,90 € - 128 pages  
ISBN : 978-2-74-676276-3



## ■ 365 jours avec Jammy On en apprend tous les jours !

Jamy GOURMAUD

Un jour, une page, un festival de découvertes... Chaque jour, une petite gorgée de savoirs drôlement instructifs avec Jamy Gourmaud pour apprendre une foule de choses sur notre quotidien, l'histoire, les sciences, la langue française, les voyages, la cuisine... Un beau livre tout illustré qui rassemble le talent, la science et l'humour de Jamy, la superstar des savoirs pour tous les Épicuriens et Épicurieuses. Plus de 1 000 articles et 1 500 anecdotes insolites et des jeux, à portée de main tous les jours. C'est une véritable bible familiale, éclectique, actuelle et soyeuse, qui aborde une foule de sujets pour se cultiver et s'évader.

Jamy GOURMAUD, journaliste et animateur de télévision depuis 1993, est un passeur de savoir et un conteur d'histoires populaires et accessibles.

► NATHAN - 22,90 € - 384 pages  
ISBN : 978-2-09-249784-5

### Répertoire des annonceurs - n° 173

LEICA GEOSYSTEMS	4 <sup>E</sup> DE COUV.
REIS STOLZEL	3
SinoGNSS (publireportage)	2
SinoGNSS	2 <sup>E</sup> DE COUV.

# Continuer de plaider pour l'équité et l'égalité homme femme en Afrique de l'Ouest : quelques constats

■ Claire GALPIN

*Si le cadre juridique – corpus des lois formelles – a majoritairement transcrit les engagements internationaux des États en matière d'équité de genre, force est de constater que les discriminations notamment portées par les normes et pratiques qui régissent les sociétés urbaines et rurales en Afrique de l'Ouest, influent sur l'éducation des filles et entravent gravement l'autonomisation des femmes.*

C'est dans la sphère familiale que les femmes et les filles semblent confrontées aux niveaux de discrimination les plus élevés. Les stéréotypes sont vivaces et le constat que l'homme est le chef du ménage est encore très prégnant. Il est perçu comme chef de famille et aussi comme celui qui décide en dernier ressort en ce qui concerne l'éducation et la santé

des enfants, ainsi que les dépenses du ménage, petites et grandes.

Selon les pratiques traditionnelles, la femme est cantonnée à la sphère domestique, passant beaucoup plus de temps que les hommes dans un travail domestique non rémunéré. La culture traditionnelle/stéréotype veut que l'homme assure les revenus de la famille. Tous ces constats conduisent à observer une influence profonde sur l'éducation et la scolarisation des filles. En matière d'éducation, il est culturellement admis que les tâches ménagères sont partie intégrante de l'éducation des filles. Dans l'inventaire des facteurs limitant l'accès équitable des filles à l'instruction secondaire et supérieure, il faut également évoquer le mariage précoce et les grossesses qui en résultent. Bien que dans de nombreux pays la loi interdit le mariage avant la majorité (souvent fixée à 18 ans), la pratique est encore assez courante dans les sociétés rurales d'Afrique de l'Ouest. Elle influe fortement sur le décrochage scolaire des filles. D'une manière générale, les parents nourrissent de grandes ambitions pour leurs garçons et beaucoup moins pour leurs filles. Dans certains groupes, il est même admis que les garçons sont naturellement plus forts dans le domaine scientifique et les mathématiques et que les filles ont une propension naturelle dans le domaine du soin et social. Cela renforce la perception de la division genrée des métiers et se traduit par de fortes disparités dans les résultats et l'accès des filles aux études supérieures et notamment scientifiques.

Les discriminations et la persistance des stéréotypes contraignent l'autonomisation économique des femmes en restreignant la participation à la vie active et leur propriété de biens.

Les femmes travaillent principalement dans le secteur informel souvent à faible valeur ajoutée (commerce et restauration) où elles occupent des emplois précaires et vulnérables. De même, de nombreuses études et résultats de projet de développement montrent qu'en moyenne les femmes en Afrique de l'Ouest possèdent entre 5 et 10 % des terres agricoles et moins encore leur maison. D'une manière générale, le contrôle des femmes sur les terres et leur pouvoir de décision en matière foncière sont extrêmement limités. Dans de nombreuses sociétés d'Afrique de l'Ouest, l'accès à la propriété s'effectue par l'héritage et la loi dispose que les épouses et les enfants ont droit à une part de l'héritage. Cette mesure est insuffisamment mise en œuvre (souvent faute d'être connue) et, dans la réalité, sont appliquées des pratiques successorales traditionnelles très discriminatoires qui excluent les veuves et les filles et qui réduisent leurs droits fonciers et limitent la capacité des femmes à contrôler des biens de production.

Une récente étude sur les discriminations dans les institutions sociales<sup>1</sup> récemment conduite par l'OCDE conclut que "tant que la société continuera de défendre des normes sociales qui établissent la domination des hommes au sein du ménage et de la famille, il est fort probable que les discriminations à l'égard des filles et des femmes perdurent dans toutes les autres sphères de leur vie" et recommande notamment de renforcer la qualité et la portée du système éducatif comme moyen en soi de transformer les normes sociales. ●

<sup>1</sup> OCDE (2022), Institutions sociales et égalité femmes-hommes en Côte d'Ivoire : Rapport pays SIGI, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/c798990a-fr>.



© Gayatri Singh, 2022



## Bulletin d'adhésion 2023

à retourner à l'AFT par courrier ou courriel sauf inscription par Internet

*Les adhésions s'entendent par année civile entière.*

*Les démissions sont à adresser à l'AFT et prennent effet en fin de l'année en cours.*

☐ **Je souhaite adhérer à l'Association francophone de topographie et souscrire l'abonnement à la revue XYZ au tarif TTC de 45 €, tarifs TTC valables pour la France et pour l'étranger**

- ☐ technicien ou enseignant, si règlement sur compte personnel, ou étudiant, ou chômeur, ou retraité ..... 10 € + 45 € = **55 €**
- ☐ cadre ou personne morale, et pour tout règlement émanant d'une administration ou d'une entreprise ..... 45 € + 45 € = **90 €**
- ☐ Le règlement se fait :
- ☐ par carte bancaire, via notre site Internet [www.aftopo.org](http://www.aftopo.org) (seulement depuis un pays à monnaie transférable)
  - ☐ par chèque émis en France à l'ordre de l'AFT, accompagné de ce bulletin dûment rempli
  - ☐ par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR sans omettre d'adresser le bulletin dûment rempli par courrier ou courriel

☐ **L'abonnement à la revue XYZ sans adhésion à l'AFT est à souscrire en passant par l'intermédiaire d'une agence d'abonnement, le tarif est de 90 € TTC pour la France et de 93 € pour l'étranger.**

☐ **Je souhaite adhérer à l'AFT sans abonnement à la revue XYZ, au tarif de 45 €**

Le règlement se fait uniquement par chèque émis en France à l'ordre de l'AFT ou par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR sans omettre d'adresser le bulletin dûment rempli par courrier ou courriel

☐ **Je fais un don à l'AFT, avec reçu fiscal, d'un montant de : \_\_\_\_\_ €**

Le règlement se fait par chèque ou par virement selon les modalités ci-dessus

☐ **Je vous adresse** un bon de commande afin de recevoir une facture au préalable

☐ **Je désire recevoir un reçu après règlement**

M/Mme Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal :      Ville : \_\_\_\_\_ Pays : \_\_\_\_\_

Tél. :           Portable :

Courriel : \_\_\_\_\_

Date / / Signature

# Scanner laser 3D Leica RTC360



## **Solution de capture de la réalité 3D rapide, agile et précise**

Acquisition de 2 millions de points par seconde

Assemblage automatique des positions en temps réel sur site

Numérisation en moins de 2 minutes avec images sphériques en HDR

**Leica Geosystems SAS**  
[www.leica-geosystems.fr](http://www.leica-geosystems.fr)



- when it has to be **right**

**Leica**  
Geosystems

contactez-nous : [info.france@leica-geosystems.fr](mailto:info.france@leica-geosystems.fr)