

Évaluation de la qualité de modèles 3D issus de nuages de points page 14



Le cheminement du douzième parallèle page 53

Lexique GNSS pour le positionnement

Commission GEOPOS
Groupe de travail GNSS



Édité par l'Association francophone de topographie (AFT)

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 - Téléchargement gratuit en format PDF.

SOMMAIRE

Directeur des publications

Tania Landes
Maître de conférences
INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Flavien Viguier
Ingénieur topographe

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe

Rédacteur en chef adjoint

Flavien Viguier

Comité de rédaction

André Bailly
Ingénieur géomètre ETP
Françoise Duquenne
Ingénieur général des Ponts honoraire
Stéphane Durand
Maître de conférences à l'ESGT
Ghyslain Ferré
Enseignant en topographie
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg

Michel Kasser
Professeur des universités
Jean-Pierre Maillard
Géomètre-expert foncier
Emmanuel Natchitz
Ingénieur géomètre

Elodie Sissler
Enseignant en topographie et foncier

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothee Picard

Imprimerie Decombat

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



Dépôt légal

2^e trimestre 2022 ISSN 0290-9057
Tirage de ce numéro : 800 ex

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 : Haut : campement agréable à Ambidédi
(ouest de Kayes), sur la rive du fleuve Sénégal ;
Bas : passage de la rivière Falémé, frontière entre le
Sénégal et le Mali. © JCL

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 - Site Internet : <http://www.aftopo.org>

Éditorial	3
Infotopo	
> Les informations de la profession	4
Hommage	
> Hommage à Jean Combe	7
Manifestation	
> Bim World 2022, une session qui a tenu toutes ses promesses Emmanuel NATCHITZ	8
> Webinaire Cadastre RPAG Fabrice IRIÉ - Marie MAKUATE - Thierno DIALLO ..	9
La vie des écoles	
> Création de la licence professionnelle collaborateur géomètre Jean-Marie NEUMULLER	12
> La chaire "Jumeaux numériques de la construction et des infrastructures dans leur environnement" engage ses travaux au service de la décarbonation du secteur Rani El MEOUCHE	13
Lasergrammetrie	
> Évaluation de la qualité de modèles 3D issus de nuages de points Tania LANDES	14
Compensation	
> Ajustement en bloc des données de stations totales et de récepteurs GNSS dans les études de déformation Joël VAN CRANENBROECK Nicolas VAN CRANENBROECK	25
Foncier	
> Délimitation du domaine public maritime en province Sud de la Nouvelle-Calédonie Ludovic RUFFENACH	33
GNSS	
> Estimation <i>a priori</i> de l'incertitude altimétrique des positionnements GNSS en RTK ou en statique post-traité : existe-t-il un modèle ? Thomas TOUZÉ	39
Hydrographie	
> Les hauteurs d'eau mesurées au marégraphe de Marseille Alain COULOMB	40
Photogrammétrie	
> Prototypage, analyse et qualification d'une solution de photogrammétrie mobile Guillaume NIEDERBERGER	43
Géodésie	
> La déviation de la verticale, mal-aimée de la géodésie Thomas TOUZÉ	47
Topo vécue	
> Le cheminement du douzième parallèle (première partie) Jean-Claude LEBLANC	53
Art et géométrie	
> Nathalie du Pasquier : <i>Campo di marte</i> Masaki Nakayama : <i>Body scale, circle triangle square</i> Jean-Pierre MAILLARD	68
Ouvrages	
André BAILLY	70
GSF	
> Le cadre intégré de l'information géospatiale (IGIF), une opportunité pour les spécialistes géodésiens, géomètres et géomaticiens ? Claire GALPIN	72
Pour la recherche de nos annonceurs, consulter la p. 71	



> Nathalie du Pasquier : *Campo di marte*
Masaki Nakayama : *Body scale, circle triangle
square*
Jean-Pierre MAILLARD

Ouvrages
André BAILLY

GSF
> Le cadre intégré de l'information géospatiale
(IGIF), une opportunité pour les spécialistes
géodésiens, géomètres et géomaticiens ?
Claire GALPIN

Pour la recherche de nos annonceurs, consulter la p. 71

PROCHAIN XYZ - n° 172
Généralisation des réfractions terrestres
et bathymétriques : simulations sur des levés sonars
et LiDAR

INNOVATION

Leica AP20 AutoPole

Le Leica AP20 AutoPole est un système intelligent qui augmente la productivité des stations totales robotisées en supprimant les dernières saisies manuelles. Facile à utiliser, l'AP20 AutoPole réduit les corrections fastidieuses lors du post-traitement au bureau avec trois fonctions qui transforment votre façon de travailler.

- Compensation d'inclinaison : mesure avec une canne inclinée
- PoleHeight : actualisation automatique de la hauteur de canne dans le carnet de terrain
- TargetID : recherche et verrouillage d'un prisme spécifique

AP20 AutoPole

#ConçuPourLesGéomètres



DECOUVRIR L'AP20

Leica Geosystems SAS
www.leica-geosystems.fr



- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

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



Au revoir

Quand vous lirez ces lignes, mon troisième mandat de membre du conseil de l'AFT sera arrivé à son terme, après dix-huit années d'engagement accompli.

Le 19 avril 2000, en participant à un colloque sur la toponymie organisé par l'AFT, je n'avais pas mesuré, un comble pour un géomètre, combien mon emploi du temps allait évoluer avec le service de l'association. En effet, encouragé par André Bailly, j'ai écrit un sujet toponymique paru cette année-là dans XYZ, précisément son n° 84. Depuis, je n'ai jamais oublié de contribuer à chacun de ses sommaires avec des articles sur l'urbanisme, la restitution de nombreuses manifestations et la rubrique Art et géométrie. Ainsi, je me surprends aujourd'hui à avoir signé un ou plusieurs articles dans 87 numéros de suite.

J'ai apprécié la richesse et la diversité des échanges professionnels avec de nombreux membres de l'association et, au-delà, avec tous les correspondants des autres organisations centrées sur l'information géographique. J'ai contribué, avec le conseil, à l'amélioration de la visibilité de l'AFT et participé à son administration. Au cours de mes mandats, j'ai vécu la renaissance du forum de l'AFT, constaté la multiplication, par trois, du nombre des publications, éditées ou coéditées, accompagné, de très loin, la mise en place de l'informatisation des données et celle du site Internet. J'ai enfin apprécié que l'association soit devenue francophone et reconnue d'intérêt général. C'est dire le chemin parcouru sous les présidences de Michel Kasser et de Françoise Duquenne avec qui j'ai eu plaisir à travailler.

Comme d'autres, j'ai représenté l'AFT dans de nombreuses manifestations et souvent tenu un stand. Ainsi, on a pu me rencontrer aux journées francophones esri, au festival international de géographie de Saint-Dié-des-Vosges, aux GeoDataDays organisé par l'AFIGEO et DécryptaGéo, au salon imagina à Monaco du temps de son existence, aux congrès annuels de l'ordre des géomètres-experts, aux journées de la topographie de l'INSA Strasbourg, aux rencontres de l'UNGE jusqu'à participer au congrès de la fédération internationale de géomètres à Istanbul en 2018. La dernière fois, le 11 mars 2022, j'ai représenté l'AFT au salon de la topographie organisé par la chambre syndicale nationale des géomètres-topographes, une façon de renouer la relation avec une organisation qui rassemble une part notable de la profession.

Le goût pour l'écriture m'a conduit, avec la confiance du conseil de l'association, à porter la fonction de rédacteur en chef de XYZ, de 2005 à 2014, et, par la suite, celle de vice-président. Au moment de tourner la page, je tiens à témoigner de mon expérience comme une contribution à l'éveil de vocations au service de l'AFT. Si vous souhaitez donner du temps à une entreprise collective et désintéressée, n'hésitez pas à contribuer aux actions de l'association, par exemple en soumettant des articles à paraître dans XYZ, en participant aux commissions "Actualisation du lexique topographique" ou encore à celle "Lettre d'informations topographiques numérique". En revanche, il vous faudra maintenant attendre deux ans pour briguer un poste de membre du conseil de l'AFT, statuts obligent.

Je sais gré à mon successeur à la rédaction en chef, Bernard Flacelière, d'avoir bien voulu mettre la page éditoriale à ma disposition pour me permettre de saluer tous les membres de l'AFT que j'ai rencontrés au fil des années, de remercier tous mes lecteurs, sans oublier les permanentes de l'association avec qui j'ai travaillé : Evelyne, Monique, Lucie et Véronique.

Pour répondre à la demande, je n'espère pas perdre le virus du journalisme et continuer à proposer la rubrique "Art et géométrie", autant que possible.

Jean-Pierre Maillard, membre du conseil de l'AFT

Le conseil de l'AFT et le comité de rédaction de XYZ remercient Jean-Pierre Maillard pour ses nombreuses actions au sein de l'association et lui souhaitent un repos bien mérité, en espérant, comme proposé, quelques contributions et collaborations futures.

■ La FFB et le Pôle Habitat FFB lancent l'appel à Projets "BIM POUR TOUS"



La Fédération française du bâtiment (FFB) et son Pôle Habitat, partent du principe que c'est à la maîtrise d'ouvrage d'impulser, au bénéfice partagé du projet et des acteurs de l'acte de bâtir, une démarche BIM sur un projet de construction. Dans ce cadre, ils lancent un appel à projets baptisé "BIM POUR TOUS", afin d'accompagner trois projets impliquant leurs adhérents respectifs. Ces projets viseront à utiliser le BIM à deux phases clés du projet, la phase DCE et la phase chantier, en regroupant un maximum de parties prenantes.

■ Une station CoastSnap pour surveiller le littoral à Groix

Lorient Agglomération, en partenariat avec l'Université Bretagne Sud (UBS), installe la première station CoastSnap insulaire de l'hexagone sur la plage des Grands Sables à Groix. Ce dispositif innovant va permettre au public de contribuer au suivi d'un site unique en Europe en réalisant des photos. Six stations CoastSnap sont désormais opérationnelles sur plusieurs plages du territoire. Une station CoastSnap offre la possibilité à chacun de devenir acteur de la protection du littoral en collaborant à la surveillance de l'érosion côtière, mais également au suivi de l'une des seules plages convexes d'Europe. La mise en œuvre est simple. Le public est invité à prendre une photo avec un téléphone en le plaçant sur la station à l'endroit prévu et calculé pour optimiser le cadrage. La prise de vue est ensuite adressée par mail ou partagée sur une plateforme gérée par l'UBS via les réseaux sociaux.

La compilation des photos permet d'enregistrer l'évolution des plages à court, moyen et long terme.



■ Loi 3DS et Toponymie



La loi 3DS a été publiée le 21 février 2022. Elle impose notamment à toutes les communes, quelle que soit leur taille, de dénommer leurs voies et lieux-dits, y compris les voies privées ouvertes à la circulation. Pour mettre en œuvre cette obligation, la Commission nationale de toponymie du CNIG présente aux élus un guide pratique "Décider du nom d'un lieu". Ce guide comporte trois volets apportant des conseils pour le choix d'un nom, pour les règles d'écriture, et pour les compétences et procédures. Ce guide peut être plus largement utile à tous ceux qui s'intéressent aux noms de lieux et aux processus présidant à leur adoption.

► Lien : http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2021/01/D%C3%A9cider_du_nom_dun_lieu_01-2021.pdf

■ L'Atlas Bleu, la revue cartographique de valorisation sur les mers et les littoraux

Le laboratoire LETG (Littoral, environnement, télédétection, géomatique, UMR 6554 Cnrs-Universités) a annoncé en mars 2022 le pré-lancement de l'Atlas Bleu, revue cartographique bilingue français/anglais des mers et des littoraux. Comme indiqué dans son projet éditorial, "l'Atlas Bleu est une revue en ligne, en accès libre et ouvert, évaluée par des pairs (relectures en aveugle), dont l'objectif est double : diffuser sous forme cartographique en les rendant accessibles des résultats d'études et de recherches scientifiques sur les espaces littoraux et maritimes, tout en interrogeant de manière réflexive les pratiques cartographiques."

► Lien : <https://atlas-bleu.cnrs.fr/>



■ La suite logicielle Limit Addict complète son module Scanner

Limit Addict est une suite logicielle basée sur le moteur TopStation de la société JSInfo qui automatise la création de plans et de documents administratifs pour les géomètres. Elle complète aujourd'hui son module Scanner avec l'extraction automatique de profils en long et en travers, et ajoute l'imagerie pour une identification plus facile des petits objets sur le nuage de points. Le module Scanner accompagne l'utilisateur dans la réalisation de plans à partir de nuage de points ; il permet de coupler un visualiseur de nuage de points et l'applicatif de dessin DAO-CAO.



LOGICIEL MÉTIER DÉDIÉ
GÉOMÈTRES EXPERTS

■ Renouvellement du GdR MAGIS



Le projet pour le Gdr MAGIS 2022-2026 (Groupe de recherche "Méthodes et applications pour la géomatique et l'information spatiale") a été accepté par le CNRS avec une structuration autour de cinq chantiers transversaux :

- l'animation de 14 actions de recherche ;
- le développement d'un réseau de jeunes chercheur(e)s et ingénieur(e)s ;
- l'analyse de 40 ans de géomatique et une prospective pour 2040 ;
- l'ouverture du réseau à l'international ;
- les actions de valorisation de l'expertise des membres du GdR MAGIS.

Créé le 1^{er} janvier 2009, le Gdr MAGIS a pour mission : d'accompagner la recherche sur l'information géographique dans toute sa diversité, de fédérer une communauté scientifique pluridisciplinaire en géomatique et de diffuser les connaissances produites (résultats théoriques, méthodologiques et technologiques).

► Lien : <http://gdr-magis.imag.fr/>

■ Solutions géospatiales de Leica Geosystems pour les pelles Zaxis-7 d'Hitachi



Souhaitant étendre son offre de machines connectées, Hitachi Construction Machinery Europe (HCME) dote désormais ses pelles Zaxis-7 (de 10 à 50 tonnes) de solutions de guidage 2D et 3D de Leica Geosystems. Du simple nivellement aux coupes transversales, l'automatisation de commandes offre aux opérateurs un système facile à utiliser pour creuser rapidement dans le respect du cahier des charges. Les options suivantes sont disponibles sur des pelles Hitachi : le guidage 3D intégral, le guidage 2D, le guidage 2D préparé pour la 3D avec les supports et câbles pour passer à la 3D au moment voulu.

■ La société Kermap lance Nimbo Maps

Nimbo Maps est une nouvelle plateforme d'observation de la Terre développée par Kermap. Elle offre des images satellite chronologiques, sans coutures et sans nuages suite à un traitement par intelligence artificielle d'images satellite Sentinel du programme européen Copernicus.



Pour cette réalisation, Kermap a bénéficié du soutien de l'Agence spatiale européenne, ainsi que de l'accompagnement du CNES (Centre national d'études spatiales). L'accès à Nimbo Maps est ouvert à tous sur inscription et gratuit, la création d'un compte incluant un forfait mensuel de crédits de navigation pour bénéficier de l'ensemble des fonctionnalités de la plateforme sur ordinateur.

► Lien : <https://maps.nimbo.earth/>

■ Formation : un nouveau master à l'ESGT

L'ESGT (École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes) ouvre en septembre 2022 le master MOSAE (Méthodes, outils de suivi pour l'aménagement et l'environnement), co-accrédité avec Le Mans Université. Il a pour objectif de former des professionnels ayant une double compétence en acquisition et traitement de l'information géographique et en aménagement, urbanisme et environnement.

► Pour plus d'information : <https://www.esgt.cnam.fr/formations/masters/master-mosae/>

■ Application GeoRIVIÈRE de Makina Corpus

L'application métier open source GeoRIVIÈRE a été lancée par Makina Corpus. Elle est un outil métier SIG permettant le suivi et la gestion des cours d'eau sur un territoire : une carte interactive affiche les rivières, bassins versants, stations de mesure et toutes les données nécessaires à leurs gestions. GeoRIVIÈRE est ainsi au service des missions GEMAPI (Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) des gestionnaires de cours d'eau.



► Lien : <https://makina-corpus.com/georiviere>

■ Prix de l'innovation Enedis pour la société TERIA

La société TERIA a été primée, parmi 37 finalistes, à la 4^e édition du Concours Start-up d'Enedis dans la catégorie "Performance industrielle". Ce concours est destiné aux start-up et PME proposant des solutions innovantes contribuant à l'accélération de la transition écologique. TERIA bénéficiera ainsi du soutien d'Enedis pour développer son projet : une solution métier sur mesure de géoréférencement en temps réel de réseaux, y compris en zone blanche.



■ La Telescop s'associe au spécialiste de la pollution lumineuse Darkskylab

Afin de renforcer une collaboration de longue date, la start-up coopérative La TeleScop est rentrée en mars 2022 dans le capital de DarkSkyLab, bureau d'étude spécialisé dans l'expertise scientifique de la pollution lumineuse. Après la région Occitanie, une étude commune pour la production de cartographie de pollution lumineuse à partir de données satellitaires est en cours à l'échelle de la Métropole du Grand Paris. DarkSkyLab et La TeleScop collaboreront également à la recherche et au développement sur les biais de la modélisation de la pollution lumineuse : halo lumineux, effets barrière, lumière bleue...



ERRATUM

Dans le n° 170 de la revue, dans l'article "Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : nouveau modèle dans le cas d'une stratification verticale de la célérité en Terre localement sphérique", une même erreur s'est glissée à plusieurs endroits. Le coefficient d'asymétrie κ de la déviation angulaire, généralisant le modèle général de l'arc de cercle, quand κ vaut $\frac{1}{2}$, est un nombre sans unité. De ce fait, il y a une erreur dans les formules 81 et 86, ainsi que dans le formulaire en conclusion. Pour corriger ces trois formules, veuillez considérer l'expression suivante :

$$\kappa = \frac{\sum v_i v'_i s_i}{S \sum v_i v'_i}$$

Thomas Touzé - thomas.touze@edf.fr



■ Métropole de Rennes : cartographie de la nouvelle ligne de métro



Des étudiants du master SIGAT (Systèmes d'information géographique et analyse des territoires) de l'université Rennes 2 ont créé à l'occasion de l'ouverture de la ligne B du métro de Rennes, attendue ce printemps 2022, une carte glissante en 3D permettant d'appréhender l'accessibilité à pied aux stations avant et après cette création.

► Cette carte en ligne est à découvrir sur le lien suivant :

https://sites-formations.univ-rennes2.fr/mastersigat/WebMaps/Metro_Swipe.html

📅 Agenda des manifestations 2022

■ Du 11 au 15 septembre, XXVIIth FIG Congress, à Varsovie, Pologne
<https://www.fig.net/fig2022/Welcome.htm>

■ Du 13 au 15 septembre, 46^e congrès des géomètres-experts, au Havre
http://www.geometre-expert.fr/oge/medias-et-publications/a-la-une/46e-congres-des-geometres-experts-ensemble-prenons-la-mesure-de-lavenir-prod_20465145

■ Du 14 au 15 septembre, GeoDataDays au Futuroscope de Poitiers
<https://www.geodatadays.fr>

■ Du 19 au 23 septembre, ION GNSS+ 2022, à Denver, Colorado, USA
<https://www.ion.org/gnss/>

■ Du 21 au 23 septembre, 19^e journées de la topographie à l'INSA Strasbourg
<https://topographie.insa-strasbourg.fr/sujet/journees-de-la-topographie/>

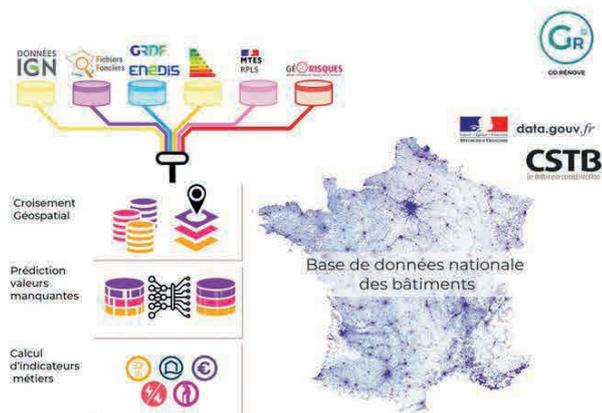
■ Du 30 septembre au 2 octobre, FIG Saint-Dié-des-Vosges
<http://fig.saint-die-des-vosges.fr/>

■ Du 10 au 14 octobre, [Live+] SIG 2022, le Géo événement, des événements physiques au sein de l'évènement digital, par esri France
<https://www.geo-evenement.fr/>

■ Le 17 novembre, 17^e forum de la topographie, au lycée des métiers Gaudier-Brzeska à Saint-Jean-de-Braye, près d'Orléans
<https://www.billetweb.fr/forum-aft>

■ Du 6 au 8 décembre, HYDRO 2022, IFHS, Monaco
<https://hydrography.earth/hydro22/>

■ Sortie de la Base de données nationale des bâtiments



La Base de données nationale des bâtiments (BDNB) est sortie dans sa première version open data. Elle est une cartographie du parc de bâtiments existants, construite par croisement géospatial d'une vingtaine de bases de données issues d'organismes publics. Structurée à la maille "bâtiment", elle contient une carte d'identité

pour chacun des 20 millions de bâtiments, résidentiels ou tertiaires. La BDNB a vocation à être mutualisée et à constituer un référentiel ouvert, socle de développement de multiples services portés par des acteurs publics et privés, mais aussi lieu de capitalisation des connaissances sur les bâtiments existants.

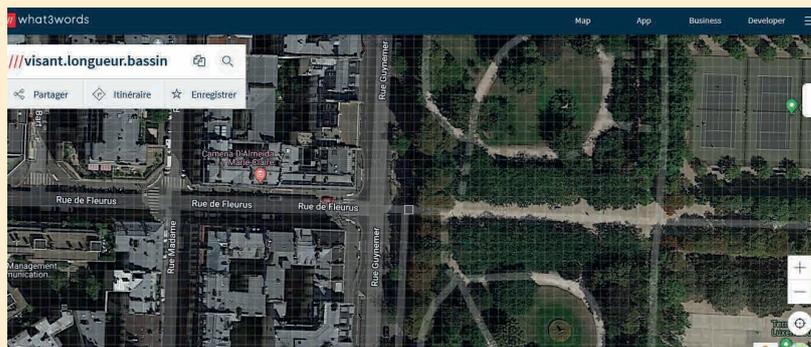
► Lien : [https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/](https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-nationale-des-batiments-version-0-6/#description)

[base-de-donnee-nationale-des-batiments-version-0-6/#description](https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnee-nationale-des-batiments-version-0-6/#description)

■ La technologie what3words avec Geoloc 18-112 à disposition des pompiers

Geoloc 18-112 devient le premier dispositif français d'aide à la localisation des appels d'urgence à adopter la technologie d'adressage universel what3words. Tous les sapeurs-pompiers du territoire ont ainsi accès à cet outil qui contribue à sauver des vies. Outre les pompiers français, d'autres centres de réception des appels d'urgence ont désormais également accès à what3words, comme les CROSS métropolitains et ultra-marins pour le sauvetage en mer (196), le CNR114 pour les sourds et malentendants (114) et l'ARCC de Lyon Mont-Verdun pour le sauvetage aérien (191).

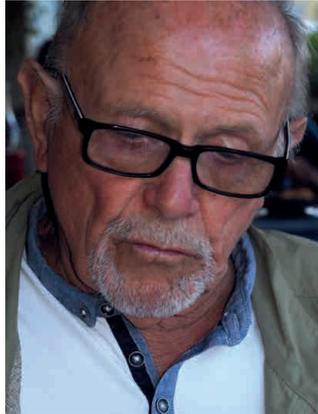
► Pour découvrir what3words : <https://what3words.com/>



Hommage à Jean Combe (08.07.1936 - 06.02.2022)

■ Par Michel TROUILLET

Jean Combe était diplômé de l'ESGT. Il a fait toute sa carrière à EDF, au sein de la direction de l'Équipement, l'unité d'ingénierie chargée de la construction des ouvrages de production d'électricité, hydro-électriques, thermiques et nucléaires.



Il a débuté à l'échelon topographique d'Aix-en-Provence où il a participé à la construction des ouvrages hydro-électriques dans les Alpes du Sud, notamment sur la Durance, le Verdon et en Corse.

Avec les évolutions des organisations pour la construction des centrales nucléaires, il créa en 1974 la Division topographie de Tours avec des agents venant des services topographiques d'Aix-en-Provence et d'Albertville et des embauches de jeunes topographes.

En 1982, il remplace Louis Catinot, qui part à la retraite, à la Direction de l'Équipement à Paris. Il se charge de mettre en place les évolutions d'organisation des services topographiques.

Avec l'arrivée de l'assurance de la qualité sur les chantiers de construction d'ouvrages de production, il s'occupe de définir des principes d'organisation et de les faire appliquer dans les divisions de topographie. Il réalise de nombreux audits sur la qualité dans les services d'EDF et dans les entreprises sur les sites de construction des ouvrages, jusqu'à son départ à la retraite en 1991.

Il a participé à la création de l'AFT et fut membre du conseil de 1978 à 1994. Il a rédigé plusieurs articles dans la revue XYZ.

■ Par Gérard BIENVENU

Pendant les quinze premières années de ma vie professionnelle, Jean Combe a été pour moi un chef, un mentor et un ami.

Sa forte personnalité s'exprimait comme un leader exigeant, mais aussi par son attention humaine vis-à-vis de chacun.

Actif, créatif, visionnaire et persévérant, il était toujours en avance pour proposer des solutions nouvelles.

Il ne laissait jamais personne indifférent aux valeurs du service public qu'il défendait et à la reconnaissance du métier de la topographie au sein de l'ingénierie d'EDF et à l'Association francophone de topographie.

Profondément enraciné dans son Queyras natal, Jean Combe a rénové une ferme avec respect du style de sa région en utilisant les matériaux et les meubles locaux : pour cela, il s'est fait aménageur et tailleur de pierres.

Il défendait les valeurs de solidarité et d'entraide des gens des campagnes et les valeurs de modernité des ingénieurs.

Jean Combe était un homme d'une très grande valeur humaine.

Hommage à Louis Tschaen (22.08.1924 – 10.04.2022)

La rédaction de XYZ vient de perdre un illustre auteur, parti dans sa 98^e année. Professeur ENSAM retraité en 1988, Louis Tschaen enseignait notamment la topographie, la géodésie et l'astronomie de position à l'ENSAIS (actuelle INSA Strasbourg). Un hommage lui sera rendu dans le prochain numéro.

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

Reinhard Stölzel

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

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

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

Bim World 2022, une session qui a tenu toutes ses promesses

Les 5 et 6 avril derniers, le BIM WORLD ouvrait une nouvelle fois ses portes. Ce rendez-vous est devenu l'incontournable pour les professionnels, les collectivités territoriales et plus généralement pour l'ensemble des usagers du BIM et du numérique au service de la construction et de l'aménagement du territoire. The Place to be pour échanger, partager, collaborer ou simplement s'informer des nouveautés et des orientations dans un domaine en plein essor.

Ce millésime était très innovant sur le fond et la forme. Avec un programme de conférences très ouvert sur la gestion de la donnée, il était aussi jumelé avec le salon des solutions bas-carbones, en partenariat avec l'observatoire *Low-Carbon World*, qui rassemblait de son côté les acteurs de la transition écologique, de la construction et des territoires.

Plus de 10 000 visiteurs, près de 1 700 participants aux conférences du salon et quasiment 1 500 personnes ont répondu à l'invitation de *Building Smart France – Mediaconstruct* – qui coorganisait les premières rencontres des jumeaux numériques avec le groupe de recherche MINND.

La donnée a été aux cœurs des débats, des conférences et des stands dans cette édition 2022 du BIM WORLD : comment la collecter, comment l'organiser, comment la partager et tout simplement comment la gérer. Les visiteurs pouvaient rencontrer 300 exposants présents dont 20 sur le village BIM pour tous – convergence numérique. Tous les stands offraient un visage dynamique et innovant ouvert sur le futur de nos métiers. Visiter le salon permettait de voir l'étendue des solutions de capture, traitement et usage des données.



Les thématiques des conférences et *workshop* s'articulaient autour de sujets complémentaires et d'actualité. Nous noterons l'approche systématique du BIM avec des présentations allant de l'initiation à la numérisation dans le travail, aux géoréférences des projets OpenBIM, en passant par la mise en place de process collaboratifs et interopérables. L'ensemble des conférences était passionnant et la liste est trop longue pour en faire, ici, un report complet. N'hésitez pas à la consulter sur le site de l'évènement. Pour faire simple, les plus grands noms du secteur ont, une fois de plus, participé à cette session, apportant leurs visions et leurs retours d'expérience. Les témoignages des professionnels, des clients ou des usagers montraient tous une vision pragmatique sur des sujets globaux.

L'alliance du BIM WORLD 2022 et du salon des solutions bas-carbones est un indicateur fort de la promotion et du rôle du numérique dans la transition énergétique, ou comment le BIM devient un outil incontournable dans la mise en place de la Réglementation environnementale RE 2020.

L'organisation des premières rencontres des jumeaux numériques a été un autre moment clé de cette année. Parler de BIM en 2022, c'est évoquer les concepts liés jumeaux numériques dans l'analyse du cycle de vie global de la construc-

tion. Les organisateurs, Building Smart France – MediaConstruct, en association avec le projet de recherche NINND, ont proposé un programme riche et détaillé couvrant des questions techniques et fondamentales sur l'évolution vers la construction 4.0. Une richesse aussi dans ces conférences avec des thématiques nouvelles comme l'intégration de l'intelligence artificielle, de l'industrialisation agile de la construction, le déploiement de la construction hors site ou l'ouverture vers le Metaverse et son impact sur nos activités.

Tous ces échanges montrent l'importance du jumeau numérique dans les questions environnementales. Une grande étape est franchie pour le domaine de la construction ; il ne reste plus qu'à l'intégrer dans nos habitudes. Le rendez-vous est pris pour la prochaine édition de BIM World qui aura lieu les 5 et 6 avril 2023 avec les secondes rencontres des jumeaux numériques et d'autres nouveautés à attendre. Vous pouvez, dès à présent, suivre l'actualité de ces rencontres sur les sites des organisateurs. ●

► Liens : <https://bim-w.com/>
<https://www.minnd.fr/>
<https://buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/>

Emmanuel NATCHITZ

Directeur du développement de l'ESITC-Paris, administrateur du collège Formation/ R&D, membre du Comité Scientifique et Technique – Building Smart France – MediaConstruct

Webinaire Cadastre RPAG

■ Fabrice IRIÉ - Marie MAKUATE - Thierno DIALLO

Le Réseau des professionnels africains de la géomatique (RPAG) est une organisation non gouvernementale créée le 1^{er} octobre 2020 à Abidjan et qui comprend plus de 700 membres dans 28 pays d'Afrique. Le RPAG se donne pour mission de faire usage de la géomatique pour fournir des solutions adaptées aux États africains. Dans le cadre de ses activités, le RPAG organise un certain nombre d'activités parmi lesquelles les Geotalks. En mars 2022, le Geotalk portait sur le thème "états des lieux du cadastre en Afrique : modernisation, enjeux et perspectives". Ce webinaire a réuni un ensemble de responsables du cadastre des pays africains notamment le Cameroun, la Guinée Conakry, la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso et le Sénégal. Ces responsables ont tour à tour échangé sur l'état du cadastre dans leur pays et sur les différentes perspectives. Nous allons dans la suite développer le contenu de ces échanges.

GEOTALK Modérateurs
 Marie Brigitte MAKUATE Ingénieur d'états
 Dr Labaly TOURE Professeur-Chercheur à l'Université du Sine Saloum

Thème: **Etat des lieux des Cadastres dans des pays Africains: modernisations, enjeux et perspectives.** Date: **Samedi 19 Mars 2022 de 10h à 12h UTC**

Les Experts

 Mme Demba DIENG FRÉROTTE Inspectrice du cadastre Directrice du Cadastre SENEGAL	 M. Noufou OUEDRAOGO Inspecteur du Cadastre Directeur du Cadastre BURKINA FASO	 M. Appolinaire BOUA SAHI Admin. des services financiers Directeur du Cadastre COTE D'IVOIRE	 M. Wilfrid EVAGA EYEBE Sous Directeur des Etudes et des Normes à la Direction du Cadastre CAMEROUN	 M. Lamine DIAKITE Directeur du cadastre GUINÉE CONAKRY
----------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------

Le Cameroun

Le sous-directeur des études et des normes du MINDCAF (Ministère des Domaines, du cadastre et des affaires foncières) du Cameroun, M. Evaga Wilfrid, a présenté le contexte géographique, les structures politiques ainsi que les organisations administratives du Cameroun.

Il a ensuite fait un état des lieux du système cadastral camerounais en développant les aspects technologiques, historiques, juridiques et économiques le régissant.

Enfin, il a parlé des enjeux et des perspectives du cadastre au Cameroun. En conclusion, il en ressort que le Cameroun, comme la plupart des pays africains, gagnerait à redynamiser son cadastre et le rendre numérique afin de mieux répondre aux préoccupations de la population.

Le Burkina Faso

M. Ouedraogo Noufou, directeur du cadastre du Burkina, est intervenu

sur les missions et organisations du système cadastral au Burkina. Il a ensuite présenté les enjeux de la modernisation du cadastre, notamment l'utilisation de la technologie de l'informatique, la contribution du secteur privé dans la mise en œuvre du cadastre, le recouvrement des coûts de sa mise en œuvre.

L'expérience burkinabée de modernisation du cadastre fait référence au projet cadastre fiscal (2018-2020), au système d'inventaire et d'évaluation des biens imposables, le système automatisé du cadastre et des domaines ainsi que le e-cadastre.

En termes de perspectives, le Burkina entend se lancer dans la numérisation des archives foncières avec le projet d'appui au cadastre ; la consolidation de l'information géographique et la création d'un système d'information foncière national avec l'accompagnement de la Banque mondiale (projet PARGFM) ; les connexions des informations cadastrales aux informations des réseaux de la distribution d'eau, de l'électricité avec l'accompagnement de la Confédération suisse.

La Guinée Conakry

M. Lamine Diakite, directeur national des domaines et du cadastre de Guinée Conakry, a indiqué durant son intervention que le cadastre guinéen a perdu de son efficacité depuis l'accession du pays à l'indépendance en 1958. Cette situation a engendré certaines conséquences, notamment : l'urbanisation anarchique et galopante, l'insécurité foncière, les conflits domaniaux, l'étalement urbain non contrôlé.

Sous sa houlette, le cadastre a engagé des actions et réformes au nombre desquelles :

- l'organisation des états généraux du foncier ;
- la numérisation du cadastre guinéen en collaboration avec le Maroc, un véritable exemple de collaboration sud-sud qui a permis la réalisation de deux séances de formation : la première à Conakry et la seconde au Maroc. Ceci dans le but de faire monter en compétence le personnel du cadastre guinéen dans la mise en place et l'exploitation des outils de collecte, de traitement et de diffusion des données géolocalisées.



À court terme, la Guinée souhaite numériser ses données foncières afin d'améliorer le service aux usagers. Les autorités guinéennes sont conscientes que la sécurisation des droits fonciers par la numérisation des titres de propriété (actes domaniaux notamment) renforce considérablement la confiance des investisseurs locaux et étrangers. La Guinée est en phase d'informatiser son cadastre (maintenu manuellement depuis 1958) en vue de réduire les délais de consultation de 365 jours à quelques minutes.

La Côte d'Ivoire

M. Zizonhi Tiede Robert, conseiller technique du directeur du cadastre est intervenu au titre de la Direction du cadastre (DCAD) de Côte d'Ivoire. Il a présenté les différentes missions du cadastre ivoirien : une mission technique, fiscale, économique, foncière, juridique, d'évaluation immobilière et documentaire. Pour atteindre ces missions, la DCAD est organisée en trois sous-directions et dix services centraux. Elle compte par ailleurs 135 services opérationnels sur l'ensemble du territoire national (45 services techniques, 45 services d'assiette d'impôt foncier et 45 services de recettes d'impôt foncier).

Sous la houlette du directeur, M. Apollinaire Boua Bahi, le cadastre ivoirien a entrepris un certain nombre de réformes dont la principale est la plateforme e-cadastre. Cette plateforme permet d'intégrer et de connecter plusieurs bases de données métiers afin d'offrir une vue à 360° des informations liées à la parcelle.

En termes de perspectives, le cadastre envisage de poursuivre l'enrichissement de sa plateforme pour intégrer davantage de données de qualité et s'ouvrir aux systèmes d'informations des autres administrations.

Le Sénégal

Le Sénégal est intervenu via son directeur du cadastre, Mme Demba Dieng Frerotte. Elle a succinctement présenté

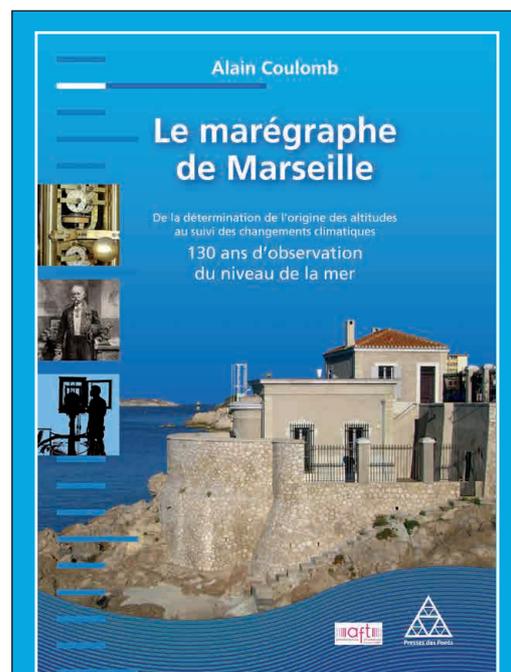
l'historique du cadastre du Sénégal. Ensuite, elle a fait part des grands travaux qui ont été réalisés et qui sont en cours de réalisation avec la participation de la direction du cadastre au Sénégal, notamment les aspects de maîtrise de l'information sur l'occupation des terres : les projets TER, BRT, PMUS, DP WORLD, KMS3 entre autres. Elle a également présenté les travaux portant sur la densification et la maintenance du canevas du 3^e ordre du RRS04, l'extension de la couverture cartographique par drone ainsi que le recensement des lotissements réalisés sur les terres du domaine national (non titrés).

Tous les projets de l'État du Sénégal sont ralentis par le défaut d'existence d'un cadastre national. Les informations disponibles ne couvrent pas tout le territoire. Le plaidoyer du directeur avec l'ensemble de ses homologues est d'œuvrer par la mise en place de cet outil pour permettre d'aller vers une réforme du foncier en Afrique de l'Ouest, pour la résolution des conflits liés à l'accaparement des terres, pour une meilleure planification de l'espace, une rationalisation des ressources des États, le développement des infrastructures et ainsi aller vers l'émergence.

Dans les perspectives du cadastre, le Sénégal entreprend la mise en place d'un cadastre universel, ainsi que la sécurisation du foncier vers un cadastre rural (PROCASEF).

Conclusion

Le système cadastral de plusieurs pays en Afrique a connu un certain retard par rapport à la démographie et à l'urbanisation des grandes villes. Cependant, les administrations sont résolument engagées vers une modernisation qui leur permettra de répondre aux besoins socioéconomiques du continent. De nombreux défis sont à relever pour y arriver. L'usage des nouvelles technologies de l'information et de la communication est une opportunité et cela est très bien compris par les responsables des différents cadastres. ●



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 : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

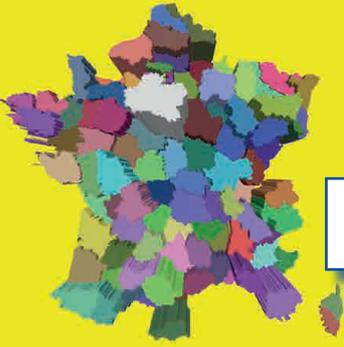
Courriel : _____

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



FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2022



le 17^e Forum de la topographie jeudi 17 novembre 2022

Au lycée des métiers Gaudier-Brzeska
à Saint-Jean-de-Braye, près d'Orléans

L'intégration de solutions connectées sur les chantiers

CONTACTS ET RENSEIGNEMENTS :

POUR LES EXPOSANTS communication@aftopo.org

POUR LES PARTICIPANTS forum@aftopo.org

à bientôt sur

www.billetweb.fr/forum-aft

Association francophone de topographie

73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ Cedex – Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

Création de la licence professionnelle collaborateur géomètre

Le BTS Métier du géomètre-topographe et de la modélisation numérique a intégré la transformation technologique qui bouleverse la profession, tant au niveau de l'acquisition des données (drone, scanner laser) que de leurs traitements (nuages de points, modèles numériques). Si cette évolution décuple les possibilités de mesures et d'exploitations de celles-ci, elle nécessite beaucoup de pratique pour les maîtriser complètement. À travers l'exploration de ces techniques, les étudiants doivent surtout travailler les fondamentaux de la profession : connaissance des systèmes utilisés, stratégie pour assurer la qualité des mesures et garantir les précisions attendues.

La modélisation numérique, en s'ajoutant au programme du BTS Technicien géomètre (ancienne version du BTS MGTMN), a notablement allégé la part de l'enseignement juridique, spécialité des géomètres-experts. Fort de ces constats, après de nombreux échanges avec le Conseil régional de l'Ordre des géomètres-experts de la région Centre-Val de Loire, il a semblé nécessaire de proposer une formation qui approfondisse cette partie juridique et réponde au manque de techniciens du foncier pour cette profession. Parallèlement à cette démarche, la Fédération régionale des travaux publics Centre a souhaité développer un diplôme qui permette d'approfondir l'étude et la conception de projets de voirie et réseaux divers. En effet, ce secteur en croissance recherche des techniciens maîtrisant la topographie et la conception de projets routiers.

Le Conservatoire national des arts et métiers et l'École supérieure des géomètres-topographes sont associés au lycée Gaudier-Brzeska pour la création d'une Licence professionnelle collaborateur géomètre répondant à ces deux demandes en région Centre. Cette licence se décompose en deux spécialités, chacune répondant aux demandes des corps professionnels :

1. Collaborateur géomètre : assistant d'opérations foncières ;
2. Collaborateur géomètre : projeteur en travaux publics.

Un tronc commun sera présent au premier semestre (anglais technique, management d'équipe, communication professionnelle, topographie, implantation). Puis, chaque spécialité suivra des cours spécifiques pour la suite :

1. Assistant d'opérations foncières (réfrentiel foncier et juridique, bornage, copropriété et division en volumes, aménagement et urbanisme opérationnel, techniques des mesures et acquisitions) ;
2. Projeteur en travaux publics (projets linéaires, plateformes, tranchées techniques, réseaux d'assainissement, sécurité et qualité de l'environnement, conception 3D).

Un projet tutoré sera mené en fin de formation ainsi qu'un stage en entreprise. La pédagogie sera basée sur des projets issus des entreprises partenaires avec des restitutions devant les professionnels intervenants.

Nous sommes très heureux de vous annoncer leurs ouvertures en septembre 2022, par la voie de l'alternance. ●

Jean-Marie Neumuller

Pour tout renseignement :

https://www.cnam-centre.fr/batiment-et-construction/nouveau-licence-pro-collaborateur-geometre/article_2_626.html

CNAM : lea.geniteau@lecnam.net

Professeurs du lycée Gaudier-Brzeska :

- Assistant d'opérations foncières : bertrand.lazime@ac-orleans-tours.fr
- Projeteur et travaux publics : jean-marie.goetz@ac-orleans-tours.fr

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

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*.

La chaire “Jumeaux numériques de la construction et des infrastructures dans leur environnement” engage ses travaux au service de la décarbonation du secteur

Réinventer l’acte de construire : c’est ce qui anime ce collectif constitué de l’ESTP, Egis, Bouygues Construction, Schneider Electric, le BRGM, SNCF Réseau et Arts et Métiers. Cette alliance inédite pour une chaire de recherche porte l’ambition d’accélérer la digitalisation du secteur en ayant une approche holistique impliquant les différentes parties prenantes de la chaîne de valeur et d’apporter des clés d’optimisation pour des infrastructures plus durables et résilientes. La chaire offre un environnement de travail particulièrement riche, en interaction avec de multiples experts académiques et professionnels. Elle prévoit de recruter plusieurs doctorants qui travailleront sur des problématiques complémentaires et collaboreront pour lever les différents verrous scientifiques et techniques du domaine.



Dans le cadre de la mise en place de la chaire, nous recherchons quatre candidats pour des postes de doctorant d’une durée de trois ans pour 4 projets financés :

- diagnostic et évaluation d’un jumeau Numérique pour la gestion automatique d’alerte, cas d’étude : réseau ferroviaire ;
- jumeau numérique sismique multi-physique multiéchelle en milieu géologique complexe pour les risques industriels ;
- étude de jumeaux numériques de la construction de l’ouvrage d’un projet d’infrastructure ;
- le(s) jumeau(x) numérique(s) pour un territoire durable – optimiser, sécuriser et pérenniser l’information par une approche holistique et multiéchelle, avec en cas d’étude : Métropole de Nice, Tramway de Marseille.

L’objectif général de la chaire est de développer des activités de recherche au niveau international dédiées à la thématique “jumeaux numériques” et de créer une communauté d’intérêt autour du jumeau numérique des ouvrages. Elle regroupe des parties prenantes et acteurs de la chaîne de valeur de la construction d’un ouvrage afin de développer l’efficacité de la filière à travers la digitalisation des

ouvrages, la création et l’exploitation de leur jumeau numérique.

La chaire doit permettre d’inscrire le jumeau numérique comme un outil de la transition numérique pour le secteur de la construction, au service de la digitalisation pour la continuité numérique, la pérennité des données et leur interopérabilité.

Les principaux enjeux de la chaire se regroupent autour de quatre grands thèmes :

- le jumeau numérique pour piloter et suivre la décarbonisation de la filière et de son environnement ;
- le jumeau numérique pour assurer la constructibilité des ouvrages dans ses différentes phases en prenant en compte ses usages ;
- le jumeau numérique pour assurer la durabilité de l’objet construit ;
- le jumeau numérique pour transformer durablement la ville.

Dans le cadre de ces enjeux, les six principaux axes de recherche de la chaire sont :

1. l’acquisition, l’intégration et la structuration de données pendant le cycle de vie de l’ouvrage et la mise à jour de son jumeau numérique ;

2. la continuité numérique appliquée aux jumeaux numériques aux différents stades de la maquette (interopérabilité des maquettes et des données) ;
3. l’architecture des jumeaux numériques : lien entre l’ouvrage physique et le JN ;
4. le couplage avec les technologies d’intelligence artificielle et de simulation pour la prise de décision ;
5. la contribution à la transition écologique et énergétique ;
6. la gouvernance des jumeaux numériques.

De plus amples informations sur la chaire sont disponibles sur les liens suivants :

- <https://lnkd.in/gcVJqWk> ;
- <https://www.estp.fr/la-chaire-jumeaux-numeriques-engage-ses-travaux-au-service-de-la-decarbonation-du-secteur>.

Si vous souhaitez candidater, n’hésitez pas à contacter Rani EL MEOUCHE (relmeouche@estp-paris.eu), titulaire de la chaire jumeaux numériques de la construction et des infrastructures dans leur environnement. ●

Rani El Meouche



Évaluation de la qualité de modèles 3D issus de nuages de points

■ Tania LANDES

La modélisation 3D répond à la fois à un enjeu économique, mais aussi environnemental, que ce soit à l'échelle du bâtiment ou de la ville. Ces dix dernières années, les techniques d'acquisition ont considérablement évolué du point de vue de leur rapidité, du volume de données à gérer, de l'hétérogénéité des informations acquises par les systèmes multiscanneurs, de même que des méthodes de traitement des données. De nouveaux processus sont nés de ces bouleversements, comme le processus "scan-to-BIM", caractérisant les étapes menant du nuage de points à une maquette numérique intelligente. En adoptant la maquette numérique, intégrée dans un processus collaboratif BIM (Building Information Modeling), les acteurs du bâtiment sont en mesure d'effectuer des simulations et de réduire, en plus des coûts, l'impact environnemental lié aux interventions sur le bâtiment, tout au long de son cycle de vie. En pratique, pour aboutir à une maquette numérique intelligente du bâtiment à partir d'un relevé de l'existant, de nombreux verrous technologiques sont à lever. Dans ce contexte, j'ai eu l'occasion d'encadrer divers travaux de recherches portant sur les thématiques allant de l'acquisition de données 3D (généralement sous forme de nuages de points 3D) à leur traitement, jusqu'à la production de la maquette numérique comme résumé dans le numéro 167 de la revue XYZ [Landes, 2021]. Dans la continuité de ce résumé, et comme l'annonçait la conclusion de ce dernier, cette suite se concentre sur la question de la qualité des livrables 3D détaillés dans [Landes, 2020].

■ MOTS-CLÉS

Qualité, précision, exactitude, modèle 3D, segmentation, reconstruction

Décomposée en évaluation qualitative et quantitative, l'évaluation d'un résultat fait appel à des connaissances techniques pour analyser les erreurs susceptibles d'affecter chaque étape de la chaîne de traitement mise en place dans un processus "scan-to-BIM" et, par voie de conséquence, amène à établir un bilan des erreurs. Nous ne nous attarderons pas sur l'évaluation qualitative, à savoir un contrôle visuel du résultat, réalisé d'office, mais nous concentrerons dans cet article essentiellement sur les méthodes d'évaluations quantitatives mises en œuvre dans nos projets.

Quelques rappels terminologiques

Du fait que la technologie des scanners laser ai rapidement été adoptée par des corps de métier de divers horizons et, qu'au travers de leurs interfaces, les instruments ou logiciels transmettent un vocabulaire souvent inapproprié (provenant parfois d'une traduction peu rigoureuse de la version anglaise), la terminologie relative à la lasergrammétrie est fréquemment employée à

tort. Ainsi, pour ne citer qu'un exemple, les notions de résolutions ou de pas sont souvent confondues avec l'exactitude ou encore la précision. Il nous semble utile de faire un petit rappel ci-dessous.

La résolution : un instrument de type scanner laser terrestre (SLT) est un appareil qui mesure des distances par incréments égaux d'arc et produit une image de distance [Lichti, 2017]. Le balayage laser s'effectue selon une trame spécifique dont les paramètres sont à définir par l'utilisateur, qui fixe le pas angulaire vertical et horizontal de son choix. Le plus petit pas angulaire disponible correspond à la résolution angulaire, et caractérise donc la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes. Si l'on rapporte l'écart angulaire à un déplacement à une certaine portée, on parlera de résolution spatiale d'un scanner laser terrestre. La résolution spatiale représente donc le plus petit espace entre deux points successifs que l'on puisse mesurer à l'aide du scanner laser à une distance objet-scanner fixe. Cette distinction avait déjà été souli-

gnée dans les revues XYZ n^{os} 128 et 129 [Landes et al., 2011a et 2011b].

La précision décrit la dispersion de mesures autour de la valeur la plus probable de l'échantillon. Le critère statistique correspondant est l'écart-type σ (*standard deviation*, en anglais). L'écart-type d'une variable aléatoire l s'écrit :

$$\sigma = \sqrt{E\{(l - L)^2\}}$$

Il représente la dispersion des mesures l autour de leur espérance et est habituellement utilisé comme critère de précision (*precision* en anglais). Si on note L l'espérance de l ou encore la valeur la plus probable de l , l'écart-type s'écrit aussi :

$$\sigma = \sqrt{E\{(l - E(l))^2\}}$$

On considère souvent l'espérance mathématique comme le centre de la variable aléatoire, c'est-à-dire la valeur autour de laquelle se dispersent les autres valeurs. Si la loi de probabilité est symétrique par rapport à la valeur centrale L , alors $E(l) = L$ où L est la moyenne arithmétique dans le cas d'observations directes de même précision (valeur la plus probable).



Si la valeur de L est calculée par moyenne de n observations directes l , on dira que les v_i sont des écarts apparents et l'écart-type se calcule alors par la formule de Bessel :

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

Cette grandeur, au carré, caractérise la variance et intervient dans la propagation de la variance [Mikhail, 1982], lorsque l'on souhaite par exemple analyser l'effet d'imprécisions de mesures (angles et distances) sur le résultat que sont les coordonnées des points du nuage.

L'exactitude décrit la dispersion de mesures autour de la valeur vraie de la grandeur mesurée et est représentée par l'erreur moyenne quadratique, notée "mq" (ou encore "RMSE", *root mean square error*, en anglais).

L'erreur moyenne quadratique d'une mesure représente la dispersion des mesures l autour de leur valeur vraie et est habituellement utilisée comme critère d'exactitude (*accuracy*, en anglais). Donc, une erreur moyenne quadratique (mq) qualifie l'exactitude d'une série de mesures par rapport à une valeur vraie L . Elle se calcule à partir d'écarts vrais (e_i) et d'un nombre d'observations noté n :

$$mq_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$$

Cela veut dire qu'un résultat / instrument peut être précis sans pour autant être exact ! Évidemment, les valeurs vraies ne sont que rarement connues, c'est pourquoi une mesure indépendante, de meilleure qualité, qualifiant la valeur vraie est nécessaire. Des points de contrôle ou des mesures de distances observés par tachéométrie sont couramment utilisés à cette fin. Par exemple, les coordonnées des centres de cibles observées par lasergrammétrie peuvent être comparées aux coordonnées obtenues par tachéométrie (ou encore des mesures de distances entre cibles) pour quantifier l'exactitude de mesure d'un système. L'erreur moyenne quadratique peut comporter une composante systématique ($e_i - v_i = a$). Les écarts individuels

e_i peuvent en effet être composés d'erreurs systématiques et accidentelles $e_i = a + v_i$. On peut donc écrire la relation suivante :

$$emq = \sqrt{\sigma^2 + \beta^2}$$

où β représente un biais à caractère systématique.

En l'absence de systématismes (présence de corrélations entre observations), écart-type et erreur moyenne quadratique peuvent être considérés comme sensiblement identiques à condition de disposer d'un échantillon d'observations de taille significative.

Exactitude et précision appliquées à une droite :

La *figure 1* illustre les écarts apparents ou écarts à la valeur la plus probable (v_i) et les écarts vrais (e_i) dans le cas de points ajustés par une droite.

Exactitude et précision appliquées à une maquette numérique :

La *figure 2* illustre les notions d'exactitude et de précision rapportées à la numérisation d'un bâtiment. La précision du nuage de points est liée à la dispersion des points autour du plan moyen ("le plus probable") ajusté au nuage. L'exactitude du nuage définit sa fidélité à la réalité, cette réalité étant observée dans un référentiel cartogra-

phique spécifique. Elle caractérise la dispersion des points autour du plan de référence (plan "vrai"). Les critères de qualité que nous allons voir s'appuient sur des comparaisons entre un résultat produit par la chaîne de traitements et un résultat de référence, produit manuellement ou avec une technique plus exacte que celle ayant servi à la production du livrable.

Bilan des erreurs

Une bonne connaissance des sources d'erreurs et une compréhension des relations qui les lient est nécessaire pour quantifier la qualité d'un résultat. Le besoin de qualifier le résultat se fait d'autant plus ressentir avec l'avènement d'outils de traitements rapides, mais trop souvent opaques. Les erreurs affectant un résultat peuvent être classifiées selon quatre catégories :

- erreurs liées à l'acquisition des données (erreurs instrumentales, erreurs liées au couplage des composants du système, erreurs liées à la géométrie de prise de vue, à la technologie employée, au mode opératoire mis en œuvre, au choix des paramètres de balayage) ;
- erreurs liées à l'objet numérisé (étendue, couleur, géométrie, matériaux) ;
- erreurs environnementales (température ambiante, pression, humidité),

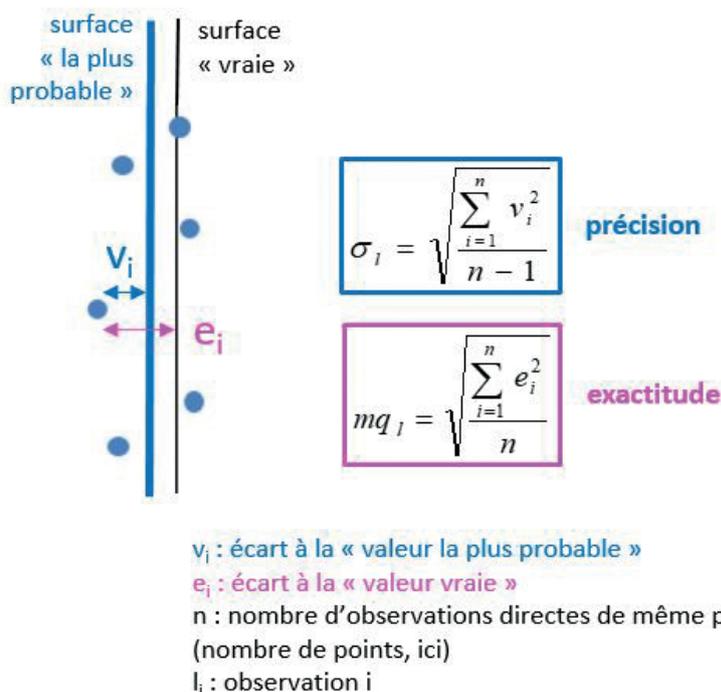


Figure 1. Écarts entrant dans les calculs d'écart-type et d'erreur moyenne quadratique.

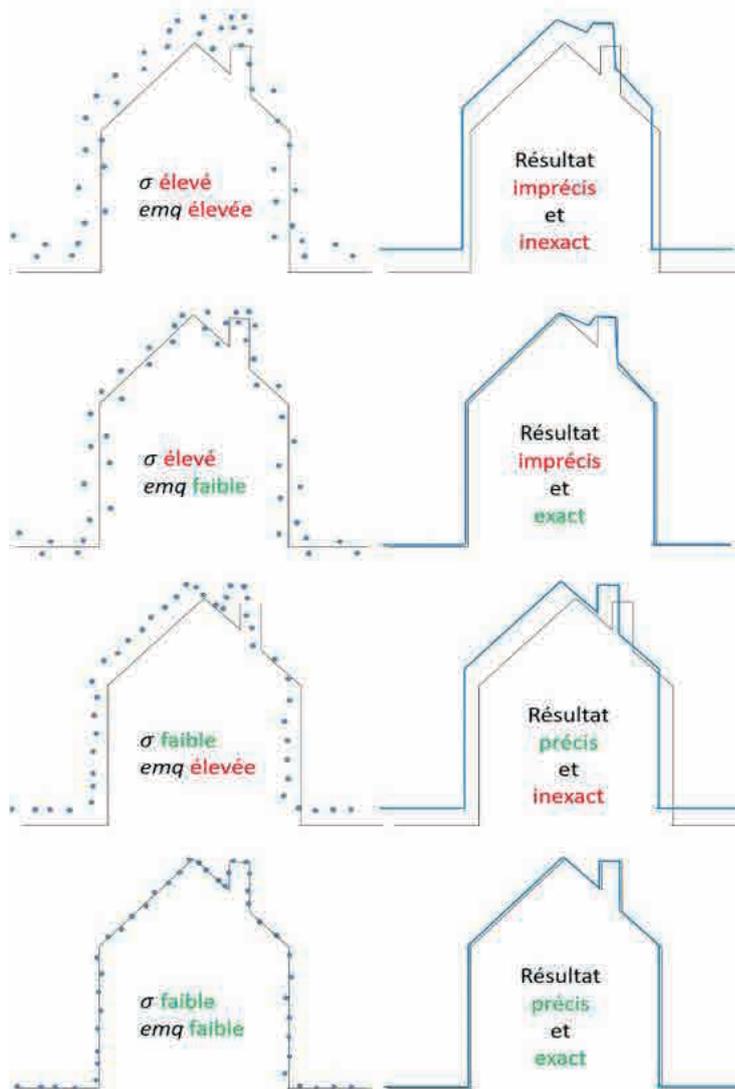


Figure 2. Critères de précision et d'exactitude rapportés à la modélisation de bâtiments à partir de nuages de points (adaptée de YellowScan@2020) ; vérité terrain en gris, points du nuage en bleu et modèle calculé en trait bleu continu.

comparaison de segments plans obtenus automatiquement sur des façades de bâtiments, avec ceux extraits d'une segmentation de référence générée manuellement [Landes et al., 2012a]. Elle s'appuie sur l'analyse d'indices de qualité permettant de déterminer le degré de similitude entre les segments plans calculés et ceux de référence. Le degré de similitude tient compte de deux critères :

- la qualité de détection des segments plans comparée au résultat issu d'une segmentation manuelle, au travers d'opérateurs booléens (énumérés dans la figure 3) ;
- les paramètres mathématiques des plans ajustés (analyse des écarts angulaires entre normales des plans extraits et leurs homologues dans la référence).

La figure 4 présente, en image, un exemple d'application de l'approche d'évaluation mise en place. Le résultat de la segmentation automatique appliquée à un nuage couvrant une façade de l'INSA est comparé à une segmentation de référence issue d'un traitement manuel et le tableau recensant les indices de qualité est reporté en figure 4c.

Une mesure globale de la qualité de la segmentation consiste à diviser le nombre de points extraits correctement par le nombre de points contenus dans l'ensemble des segments de référence (indice TDR(i)). Dans l'exemple précédent, ce taux s'élève à 0.97, ce qui signifie qu'en moyenne 97 % des points ont été extraits conformément à la référence.

Segmentation "indoor"

L'approche d'évaluation de l'outil de segmentation d'intérieurs de bâtiments développée dans la thèse de [Marcher, 2017] s'appuie sur l'analyse de la classification des segments plans. Dans les travaux précédemment cités, la géométrie des segments plans de façade revêtait une importance primordiale puisque les contours des segments plans allaient décrire le contour des objets recherchés (toits, façades). Les indices de qualité basés sur la comparaison de surfaces couvertes par les segments calculés et de référence prenaient donc tout leur sens.

- ▶ affectant l'indice de réfraction du milieu traversé par l'onde ;
- erreurs liées à la chaîne de traitements et au degré d'intervention humaine ; en d'autres termes, les erreurs susceptibles d'intervenir dans les étapes nécessaires au passage de la donnée brute au modèle 3D final.

Hormis les erreurs environnementales que nous n'avons pas eu l'occasion d'analyser, chacune de ces catégories d'erreurs est détaillée dans [Landes, 2020]. Le présent article reprend les approches mises en place pour évaluer les étapes de la chaîne de traitements développée par notre équipe.

Au cours de chaque thèse abordant la génération de modèles 2D ou 3D à partir de nuages de points, une approche d'évaluation de la qualité des

résultats a été proposée. Pour cela, il a été nécessaire de considérer l'apport de chaque étape de traitement conduisant à la génération du modèle 3D final, soit à évaluer les résultats de segmentation ainsi que les résultats de reconstruction.

■ Approches mises en place pour évaluer l'étape de segmentation

L'évaluation de la qualité d'une segmentation dépend de la qualité des résultats qu'elle produit, c'est-à-dire en premier lieu des segments (de points) détectés, car ils jouent un rôle crucial dans les processus ultérieurs de reconstruction.

Segmentation "outdoor"

L'approche d'évaluation de l'outil de segmentation de façades développée dans [Boulaassal, 2010] est basée sur la

$A(i)$: segment plan extrait automatiquement
 $SR(i)$: segment plan de référence
 $Card(A)$: cardinal du segment, c'est-à-dire le nombre de points composant le segment
 $I(i) = A(i) \cap SR(i)$: points du segment i correctement extraits; il s'agit du nombre de points communs aux deux segments comparés
 $D^-(i) = SR(i) \setminus A(i)$: points affectés de manière erronée à un autre segment que $A(i)$
 $D^+(i) = A(i) \setminus SR(i)$: points devant appartenir à un autre segment que $A(i)$
 $TDA(i)$: taux de points correctement détectés dans $A(i)$
 $TDR(i)$: taux de points correctement détectés par rapport aux $SR(i)$

$$TDA(i) = \frac{I(i)}{Card(A(i))} \quad TDR(i) = \frac{I(i)}{Card(SR(i))}$$

Figure 3. Indices de qualité pour évaluer la segmentation en plans de façades de bâtiments.

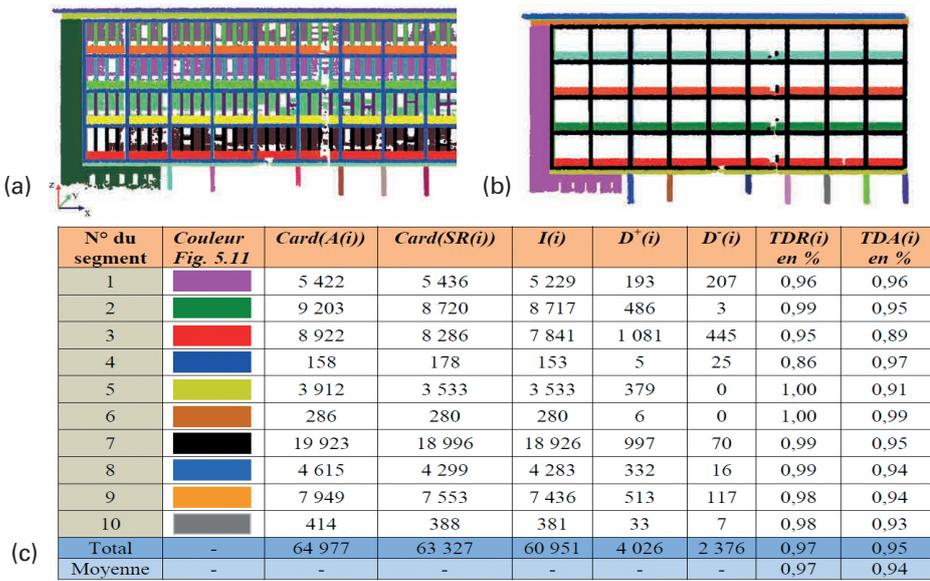


Figure 4. Évaluation de l'étape de segmentation de façades appliquée au nuage de l'INSA ; a) résultat de la segmentation automatique ; b) segmentation de référence ; c) tableau d'évaluation pour un échantillon de 10 segments plans.

En intérieur, les obstacles situés entre le scanner et les objets sont tellement nombreux qu'il est utopique d'en tirer des contours directement exploitables. Les indices de qualité basés sur les surfaces que couvrent les segments plans sont donc inappropriés. En revanche, la capacité à classer les segments en classes d'objets est primordiale ici. C'est pourquoi la précision de la classification des points en sol, mur, plafond a été placée au centre de cette évaluation.

Des métriques semblent s'imposer progressivement comme métriques standards pour évaluer les performances d'approches de segmentations sémantiques. On peut citer notamment la "précision" (*correctness* ou *precision*, en anglais), le "rappel" (*completeness* ou *recall*, en anglais) ou encore le "score F1" qui est une fonction des deux métriques précédentes [Heipke et

al., 1997 ; Roynard et al., 2018]. Elles se calculent à partir de "vrais positifs (VP)", "faux positifs (FP)", "vrais négatifs (VN)", "faux négatifs (FN)", qui supposent l'existence d'une segmentation de référence. Ainsi, une segmentation manuelle effectuée sur un nuage de points d'intérieur de bâtiment et distinguant les classes d'intérêt (plafonds et sols, murs, objets) a été comparée au résultat de la segmentation développée. La comparaison de ces nuages de points a permis

		Plafonds et sols	Murs	Objets
Maison individuelle	VP	99 %	89 %	94 %
	FN	3 %	1 %	21 %
Bâtiment de bureaux	VP	99,5 %	93 %	81 %
	FN	4,5 %	9 %	8 %

VP = vrais positifs ; FN = faux négatifs

Tableau 1. Évaluation de la classification des points en plafonds et sols, murs et autres [Macher, 2017].

de déterminer le pourcentage de vrais positifs et le pourcentage de faux négatifs pour chacune des catégories et pour deux jeux de données (tableau 1).

Nous pouvons conclure, sans grande surprise, que les segments "plafonds et sols" sont mieux extraits (VP élevés et FN faibles) que les murs ou objets de la scène et qu'un contrôle visuel reste de mise.

Les livrables issus des algorithmes de segmentation ont ainsi été évalués. Nous pouvons nous pencher à présent sur les approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation.

■ Approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation

Nous considérerons, dans cette partie, les approches développées en vue d'évaluer la qualité des modèles 3D de bâtiments, de façades et d'intérieurs de bâtiments.

Modélisation de bâtiment entier

Un des volets de la thèse de [Mohamed, 2013] a consisté à proposer une approche multidimensionnelle standard pour évaluer la qualité de modèles 3D simples de bâtiments produits par technique lasergrammétrique [Landes et al., 2012b], photogrammétrie (stéréorestitution) ou par combinaison des deux [Mohamed et al., 2013]. Les modèles 3D de bâtiments considérés ici sont vectoriels, de géométrie très simple (figure 5). L'approche d'évaluation exige toutefois de posséder, pour chaque modèle de bâtiment à évaluer, un modèle de référence.

L'évaluation 1D se base sur l'analyse de l'exactitude des points décrivant la géométrie du bâtiment, selon chaque direction (erreur moyenne quadratique en X, Y et Z), calculée à partir des écarts entre les deux modèles (référence et test). Elle peut également s'appuyer sur



le contrôle du respect d'une classe de précision, suivant le modèle standard proposé dans le Journal officiel du 30 octobre 2003.

L'approche d'évaluation 2D qualifie, au travers de facteurs de qualité, le degré de superposition des faces (contours de façades ou de pans de toits en 2D) du modèle test et du modèle de référence. Ces indices font intervenir des opérations booléennes (figure 6a). Une évaluation 2D satisfaisante ne valide toutefois pas encore le modèle reconstruit, en raison de sa sensibilité à la taille des polygones étudiés et du fait que deux plans parfaitement superposés dans le système d'axes parallèles au plan sont susceptibles d'être décalés en profondeur. Ce défaut ressort au plus tard dans l'étape de l'évaluation 3D.

L'évaluation 3D analyse les bâtiments en tant qu'objets à part entière en estimant le degré de superposition entre volumes à comparer (figures 6b et 6c). Les indices de qualité, déduits de ceux définis en 2D, se rapportent, dans ce cas, au degré de superposition du volume testé et du volume de référence. Ces indices avaient déjà été développés antérieurement à ce projet [Landes et al., 2012a] pour répondre au besoin de reconstruction des façades (nous les verrons dans le tableau 2). Pour évaluer les vecteurs 3D, les critères statistiques classiques (erreur moyenne quadratique et écart-type) étant quelque peu restrictifs, ils ont été complétés par des cartes d'erreurs. Bien entendu, l'inspection visuelle reste indispensable.

Les statistiques sur les indices de qualité 2D et 3D calculées sur plusieurs jeux de données ont révélé que les modèles reconstruits à partir des données LiDAR ou de la combinaison des données LiDAR et d'images aériennes (produites selon [Zhang et al., 2011]) sont moins exacts que les modèles 3D de bâtiments extraits à partir de couples d'images stéréoscopiques.

L'originalité de cette approche d'évaluation réside dans le fait qu'elle est applicable aussi bien à des modèles vectoriels qu'à des modèles sous forme de voxels. Elle mérite toutefois d'être approfondie et étendue à des modèles 3D plus complexes de bâtiments.

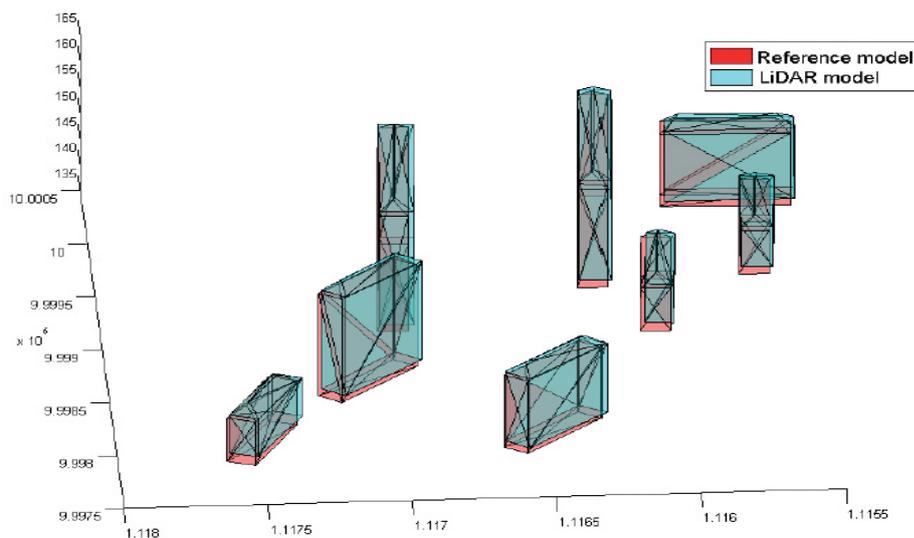


Figure 5. Modèles 3D obtenus sur la base de données LiDAR exclusivement et comparés à leur référence [Mohamed et al., 2013].

Dans la continuité de l'évaluation 3D, lorsque le bâtiment à évaluer a été construit par ajustement de primitives géométriques, comme mis en œuvre dans Tarsha-Kurdi, 2008], il est intéressant de confronter le modèle calculé au nuage brut ayant servi à le produire. Ainsi, l'évaluation portant sur la qualité de reconstruction de plans décrivant les toits scannés par LiDAR aéroporté couvre deux volets :

- l'analyse de la précision des plans composant les toits, par analyse de critères statistiques tels que l'écart-type en distance (dispersion des points couvrant le toit autour du plan moyen calculé à partir de ces points) ;
- l'analyse des erreurs de modélisation au travers d'une "carte des erreurs", dans laquelle sont reportés les écarts entre chaque point et son plan moyen (figure 7).

Globalement, les résultats obtenus à l'issue de la longue chaîne de traite-

ments semi-automatique menant du nuage de points LiDAR aéroporté au modèle 3D reconstruit du bâtiment sont très satisfaisants au regard de tous les facteurs d'influence que sont, entre autres, le bruit de mesure, les détails non modélisables ou encore la densité de points. Ces facteurs sont susceptibles de fausser l'équation mathématique de chaque plan composant le bâtiment et de générer par voie de conséquence des déformations dans sa géométrie.

Modélisation de façades

Dans le processus de reconstruction de façades à partir de nuages de points, les segments plans évalués préalablement servent de base à la création de contours d'ouvertures. Pour évaluer de façon quantitative les résultats de la reconstruction géométrique, des indices de qualité 2D ont été proposés pour comparer le contour calculé et sa référence, non pas à l'échelle des

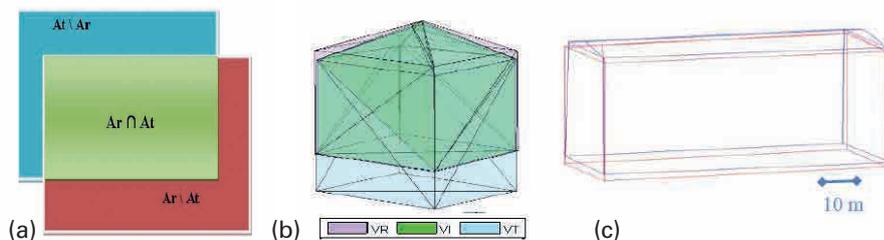


Figure 6. Comparaison du modèle testé à sa référence ; a) en 2D par analyse de surfaces ; b) en 3D par analyse de volumes entre modèles de référence (VR) et testé (VT) et volume d'intersection désigné par $VI = VR \cap VT$; c) superposition d'un modèle 3D du modèle extrait (en bleu) et de référence (rouge) [Landes et al., 2012b et Mohamed et al., 2013].



points constituant le contour, mais en termes de surfaces de polygones (figure 8).

Une question importante dans l'évaluation des résultats est le choix du modèle de référence, qui sera généré différemment suivant le critère statistique que nous souhaitons analyser. Ainsi, pour évaluer la précision du résultat, les polygones de référence sont digitalisés sur la base du nuage de points. Pour évaluer l'exactitude du résultat, les polygones de référence sont obtenus par mesures tachéométriques. En comparant les coins levés à ceux détectés par traitement automatique des données laser, l'effet de toutes les erreurs intervenant depuis l'acquisition jusqu'à la modélisation de la façade peut être mis en évidence. Les indices de qualité employés sont en grande partie inspirés de la littérature et s'appuient sur des opérations booléennes d'analyses spatiales basées sur des ensembles constitués par les surfaces des polygones étudiés (tableau 2). Si la comparaison des surfaces couvertes par les polygones calculés et de référence est un premier indicateur, il reste toutefois insuffisant, car la surface commune ne garantit pas l'exactitude de la géométrie des polygones. Par conséquent, cette évaluation quantitative a été complétée par des calculs d'écart 3D entre polygones homologues [Landes et al., 2012a]. L'écart moyen en distance s'élevait à 4 cm avec un écart-type de 2 cm, ce qui est satisfaisant vu l'état de la façade, et bien sûr, les erreurs potentielles attribuables à la chaîne de

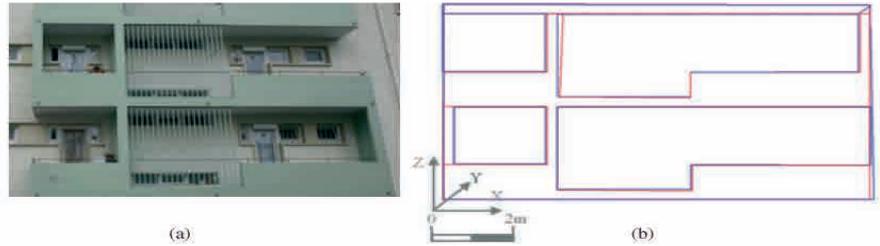


Figure 8. Évaluation de la qualité de détection de contours sur une façade d'un immeuble à Strasbourg ; a) photographie ; b) superposition de polygones modélisés (en rouge) et de référence (en bleu) [Landes et al., 2012a].

Indice	Formule	Signification
Taux de détection	$\rho d = \frac{ SR \cap SA }{ SR }$	ρd exprime le rapport entre la surface d'intersection des deux modèles et la surface de référence. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρd est proche de 1, plus le modèle est proche du modèle de référence.
Indice de qualité	$\rho q = \frac{ SR \cap SA }{ SR \cup SA }$	ρq exprime le rapport entre les parties communes aux deux modèles et l'union des deux modèles. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρq est proche de 1, plus le modèle obtenu sera de bonne qualité.
Facteur d'excédent	$\rho b = \frac{ SR \setminus SA }{ SR \cap SA }$	ρb exprime le rapport entre la partie du modèle qui n'appartient pas au modèle de référence et l'intersection des deux modèles. Sa valeur peut être supérieure à 1, mais elle est toujours positive. Si ρb est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Facteur de déficit	$\rho m = \frac{ SA \setminus SR }{ SR \cap SA }$	ρm exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et l'intersection des deux modèles. Il peut avoir une valeur supérieure à 1 mais il est toujours supérieur à 0. Si ρm est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Indice d'échec	$\rho f = \frac{ SA \setminus SR }{ SR }$	ρf exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et la superficie du modèle de référence. ρf est compris entre 0 et 1. Si ρf est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.

Tableau 2. Indices de qualité utilisés pour quantifier la qualité de polygones produits par l'approche de modélisation de façade, avec SR : Surface du modèle de référence ; SA : Surface du modèle obtenu automatiquement ; |X| : surface du polygone X [Boulaassal, 2010].

traitements (calcul de points d'intersection de contours construits sur la base d'un nuage de points, utilisation de seuils, etc.).

L'analyse des indices de qualité et des écarts 3D a montré que la précision des polygones est systématiquement supérieure à leur exactitude. Ce constat permet de valider le fonctionnement de

l'algorithme et de rappeler l'influence de la qualité des données brutes sur la qualité des modèles 3D finaux de façades.

Modélisation de murs intérieurs de bâtiments

Nous nous intéressons ici à la qualité géométrique des résultats de la reconstruction 3D des murs. L'approche d'évaluation, qui a porté sur plusieurs jeux de données, s'attache à procéder en deux temps [Macher et al., 2017] :

- inspecter les murs reconstruits, puis
- analyser la précision de leur reconstruction.

Inspection des murs reconstruits

Les plans d'intérieurs en 2D réalisés par digitalisation sur les nuages de points constituent une référence intéressante pour évaluer la performance de l'algorithme de reconstruction. La superposition des fichiers .obj produits par l'algorithme (en rouge sur la figure 9) avec les plans 2D des bâtiments permet d'inspecter les murs

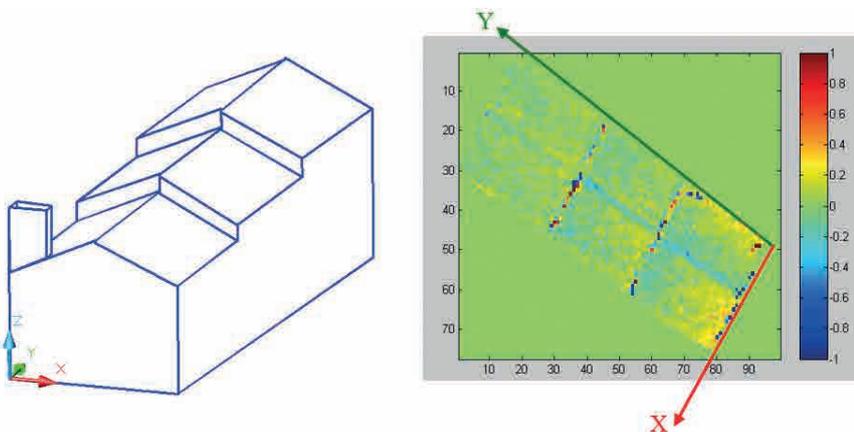


Figure 7. Modèle 3D d'un bâtiment et carte des erreurs de modélisation du toit associé [Tarsha-Kurdi, 2008].

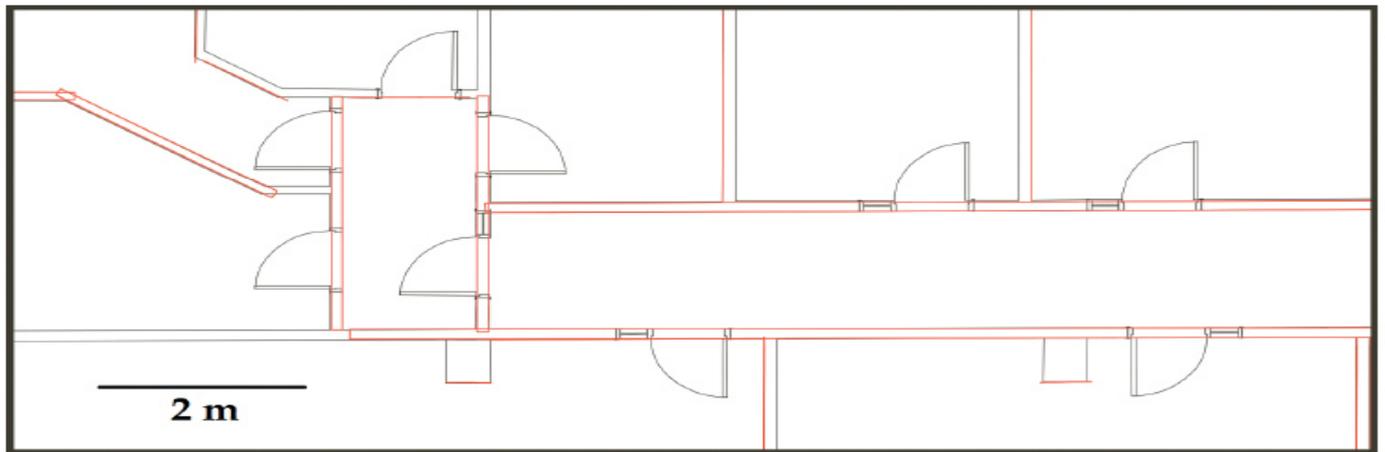


Figure 9. Superposition du modèle créé (en rouge) avec le modèle de référence (plan 2D, en noir), sur un étage de bâtiment composé de bureaux [Macher et al., 2017].

reconstruits et de repérer les erreurs de reconstruction.

Sur les jeux de données employés, plus de 88 % des objets sont correctement positionnés ; les éléments mal positionnés ou orientés sont majoritairement des portions de murs de façades. Pour les éléments correctement positionnés, des écarts en distance de 2 cm maximum ont été constatés, ce qui nous autorise à valider la reconstruction.

Analyse de la précision de reconstruction des murs

Pour estimer la qualité de reconstruction de chaque mur constituant le modèle 3D de l'intérieur du bâtiment, un écart-type a été affecté à chacun d'eux. Cet écart-type est calculé à partir des distances non signées qui séparent les points composant le

segment "mur" de son modèle (figure 10). La visualisation des écarts-types à l'aide d'une palette de couleurs permet de repérer rapidement les murs ou portions de murs qui ont été définis de façon imprécise sur un étage.

L'analyse seule de l'écart-type associé à un mur reste néanmoins insuffisante pour juger de la qualité de reconstruction, car un mur peut présenter un écart-type important tout en étant correctement reconstruit (objets situés de part et d'autre du mur, par exemple). C'est pourquoi il est intéressant de compléter l'étude par l'analyse des écarts entre points de nuage et mur reconstruit (figure 11). Cette analyse met clairement en évidence les éléments trop proches du mur pour pouvoir être écartés au moment de la segmentation (stores, radiateurs, tableaux, coffres de volets).

Cette approche d'évaluation de reconstruction a été intégrée sous forme de plug-in, dans un logiciel commercial (Revit d'Autodesk), comme expliqué dans [Marcher et al., 2019].

La question de la qualité à présent abordée, il nous semble intéressant de nous pencher sur la notion de niveau de détail et de mettre en lumière celui ou ceux que nous avons réussi à atteindre en sortie de nos chaînes de traitements pour les bâtiments.

Qualité et niveau de détail

La qualité d'un modèle est parfois et à tort confondue avec le niveau de détail d'un modèle, comme on peut le constater sur un site de référence dans la transition numérique du bâtiment. On peut y lire, à tort, que "Le niveau

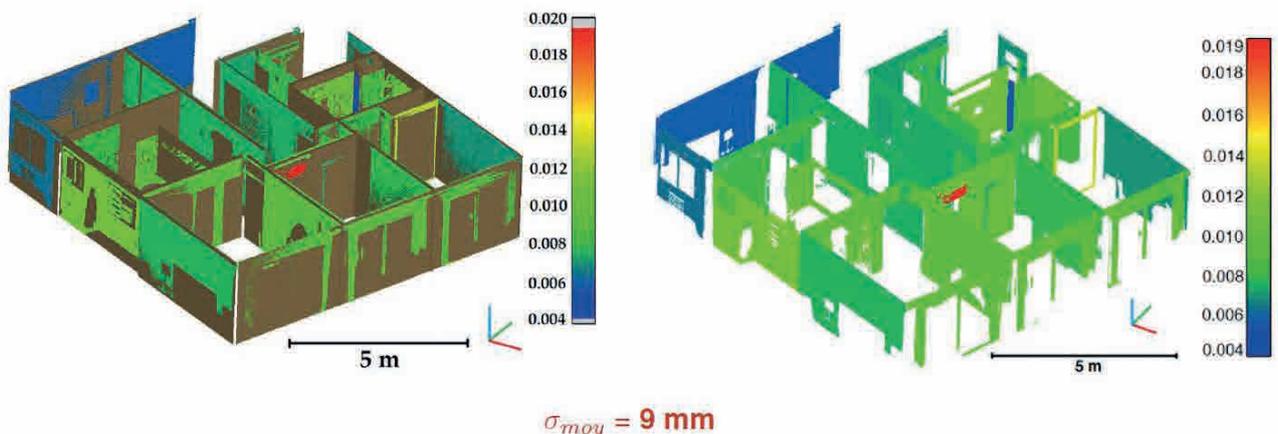


Figure 10. Résultats de la reconstruction des murs et dalles et visualisation des écarts-types associés aux murs ; a) superposition des murs reconstruits et des points ayant servi à les construire ; b) nuage de points seul, avec représentation en pseudocouleurs des imprécisions associées [Macher, 2017].

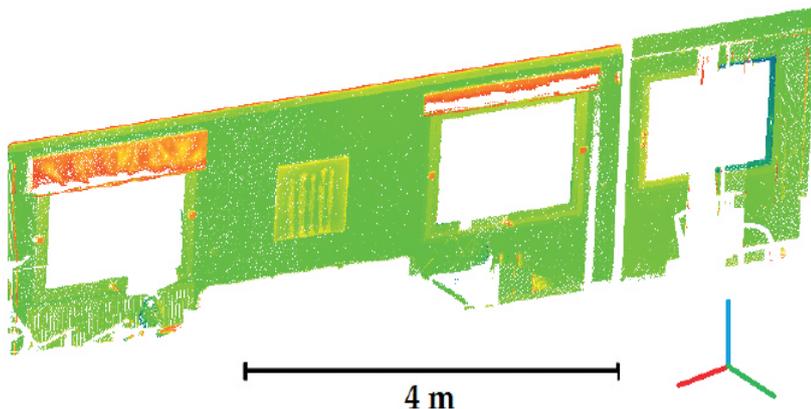


Figure 11. Nuages de points colorisés en fonction des distances signées entre points et modèle pour une face de mur.

de détail (...) correspond à la précision géométrique d'une maquette numérique, caractérisée par la précision des objets 3D qui la constituent".

Comme le soulignent [Oude Elberink & Vosselman, 2011], le fait de spécifier le niveau de détail associé à un modèle ne signifie pas que la précision géométrique du modèle ait été déterminée. Le niveau de détail est un critère visant à quantifier l'information minimale nécessaire pour un certain usage, ce qui ne détermine aucunement le niveau de précision associé au modèle. Bien qu'il existe un lien entre les deux (les représentations à des échelles plus fines ont tendance à être de meilleure qualité), il s'agit de deux concepts indépendants [Chrisman, 1991]. Par exemple, deux objets géographiques peuvent avoir le même niveau de détail, mais une précision spatiale (précision de positionnement) différente. En outre, dans certains cas, des bâtiments peuvent être caractérisés par un niveau de détail élevé, tandis que leur géométrie peut considérablement s'écarter de la réalité.

Le niveau de détail appelé communément LOD, de l'anglais "Level of Detail", est un concept employé dans diverses disciplines. Intimement lié au concept d'échelle en cartographie et très étudié en infographie, il s'est fortement développé avec l'avènement des SIG et plus précisément la modélisation 3D des villes. Le standard CityGML (*Open Geospatial Consortium*, 2012) fournit un mécanisme standard pour décrire les objets 3D du point de vue de leur géométrie, leur topologie, leur sémantique et leur apparence, selon cinq niveaux de détail différents.

Le niveau de détail associé au modèle à produire dépend évidemment du cahier des charges, car il influence la façon d'approcher l'objet à étudier. Lorsque le niveau de détail concerne la géométrie du livrable, il influencera d'une part le protocole d'acquisition (choix des technologies et méthodes, de la densité des données, de la précision de mesure), mais aussi le processus de traitement des données (nuages ou autres). Évidemment, ce choix impactera le budget à allouer au projet.

Dans la littérature, sont souvent mentionnées les normes britannique et américaine qui toutefois se rejoignent. Elles subdivisent les LOD en niveaux de développement des attributs graphiques (géométriques, LOG) et non graphiques (informationnels, LOI). D'après Objectif BIM1, les niveaux de détails américains (LOD 100 à LOD 500) se sont imposés en France. Au stade de reconstruction que nous avons atteint au travers de nos recherches, aucun de ces LOD ne convient à la description de nos modèles 3D, mis à part si nous envisageons une combinaison de plusieurs LOD. Nos modèles sont fiables géométriquement, mais ne fournissent pas le niveau de détail requis, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur, ni du point de vue sémantique, pour être validé en LOD 500 [Yang, 2018]. Même si un objet peut être décrit par des LOD distincts (bâtiments en LOD 2 et intérieur en LOD 4), cette nomenclature manque de flexibilité. En effet, les éléments graphiques et sémantiques associés à nos modèles sont hétérogènes au niveau de leur présence (ouvertures de

type fenêtres, mais sans portes), de leur complexité géométrique (bâtiments cubiques ou avec toits à deux pans) et de leur dimensionnalité (fenêtres sous forme de contours simples 2D ou de modèles 3D issus d'une bibliothèque de symboles).

À l'ère du numérique, où les modèles produits sont amenés à être fusionnés avec des bases de données existantes, la question du niveau de détail de nos modèles mérite d'être approfondie dans un futur proche, en particulier lorsque se pose la question de la mise à jour de la maquette HBIM (*Heritage Building Information Modeling*), équivalent du BIM appliqué au patrimoine culturel [Fai et Rafeiro, 2014].

La question de la qualité d'un algorithme ou du niveau de détail le plus approprié devient secondaire lorsque l'existence même de l'objet d'étude est hypothétique. Nous nous sommes penchés sur cette question de l'évaluation de la qualité de modèles virtuels construits sur la base d'hypothèses archéologiques dans la partie suivante.

Évaluation de modèles restitués à partir de connaissances

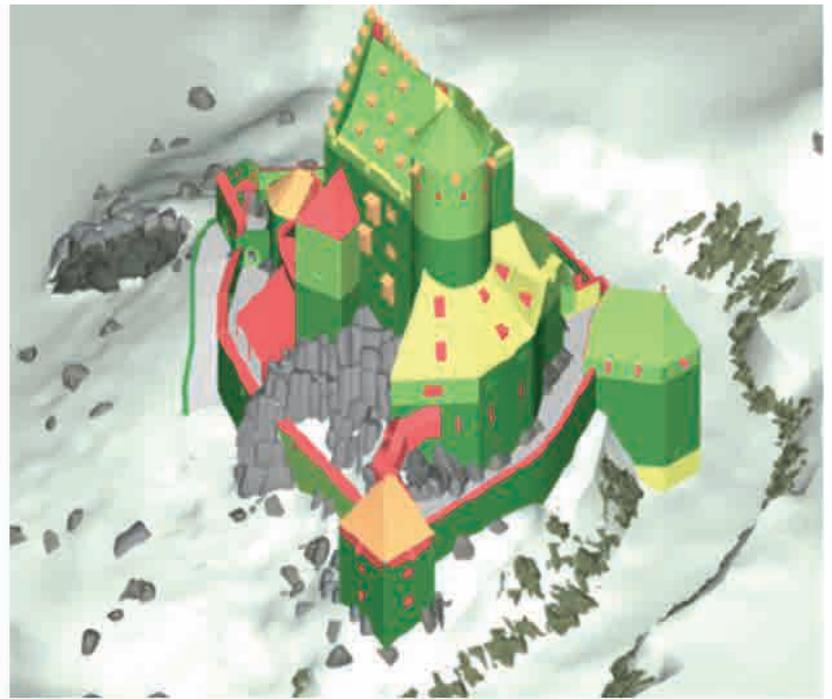
Dans le domaine du patrimoine culturel, nombreux spécialistes comme les archéologues, les architectes, les géomaticiens, les historiens sont amenés à collaborer sur un même site ou vestige, ce qui justifie l'intérêt de travailler sur une maquette numérique commune. Il va de soi que le modèle 3D ne peut pas être réduit à un simple moule reproduisant la forme de

1 Objectif BIM, www.objectif-BIM.com

l'objet étudié, c'est-à-dire en se limitant à sa géométrie, que cette dernière soit sous forme de volume ou de surface. Il devrait être, au travers de l'analyse de l'objet, le reflet de sa complexité suivant différents aspects, dont les aspects géométriques, les caractéristiques historiques, esthétiques et architecturales du bâtiment. L'intégration d'informations dans le HBIM provenant de sources diverses a été analysée dans [Yang et al., 2020].

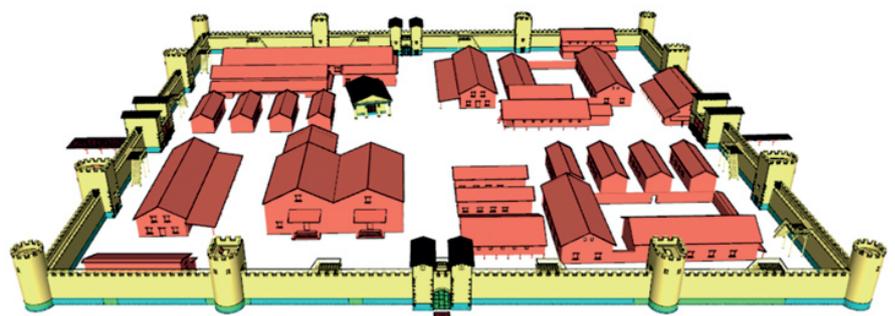
La fidélité du modèle virtuel à sa réalité est une question de première importance dans la modélisation du patrimoine culturel. Afin de maîtriser la fiabilité du modèle 3D reconstruit à partir de données souvent hétérogènes (relevés précis, fouilles, informations tangibles et intangibles, hypothèses archéologiques), il est d'une importance cruciale d'intégrer le niveau d'incertitude associé au modèle 3D reconstruit. Une approche permettant non seulement de quantifier, mais aussi de visualiser les incertitudes issues d'hypothèses archéologiques a été abordée dans le cadre de travaux de fin d'études [Benazzi, 2018 et Nivola, 2018] et a donné lieu à une publication [Landes et al., 2019]. D'un point de vue géométrique, l'incertitude est souvent définie, quantifiée et exprimée à l'aide de mesures statistiques. Cependant, pour les objets reconstruits sur la base d'hypothèses archéologiques et aboutissant à un modèle "restitué", les critères de qualité du type mesures statistiques ne sont pas appropriés.

Nous avons mené une réflexion sur l'idée de décomposer les modèles 3D en niveaux d'incertitude (LoU pour *Level of Uncertainty*) et sur la meilleure façon de les visualiser à travers deux études de cas situées en Alsace : le Château de Kagenfels (XIII^e siècle) et le Castellum d'Horbourg-Wihr (XVI^e siècle). Tandis que le premier site est très bien documenté au travers de relevés et de fouilles toujours en cours, le second site a disparu avec l'urbanisation de la ville et n'a laissé que peu de traces tangibles. Concernant le Château du Kagenfels, pour évaluer le degré d'incertitude des éléments restitués, nous avons réalisé un tableau à double entrée confrontant la nature de



a

		Level of knowledge				
		Pure assumption (LoU5)	Weak knowledge (LoU4)	Moderate knowledge (LoU3)	High knowledge (LoU2)	Very high knowledge (LoU1)
Wall	No remain, nor iconography or document. But supposed to exist for defensive, structural or formal necessities	Remain of low height (<1m). But no data about initial height nor shape or function of the wall	Remain of more than 1m. But no data about initial height, nor shape or function of the wall	Proven existence with uncertainties: uncertain height, but shape / function known	Proven existence with known height (or assessable) and shape / function known	



b

		Level of knowledge			
		Pure assumption (LoU4)	Moderate level of knowledge (LoU3)	High level of knowledge (LoU2)	Very high level of knowledge (LoU1)
	Restituted by hypotheses (buildings inside the camp)	Modeled by analogy (towers and doors)	Restored by logical deduction (without excavation results)	Confirmed by excavations and survey (foundations, passage slabs)	

Figure 12. Décomposition du modèle 3D reconstruit en niveaux d'incertitude (LoU pour *Level of Uncertainty*) ; a) Château du Kagenfels ; b) Castellum d'Horbourg-Wihr [Landes et al., 2019].



l'élément évalué (mur, toiture, encadrement, etc.) au niveau de connaissance qui lui est associé.

Nous avons fait le choix de fusionner les incertitudes géométriques et les incertitudes de positionnement, du fait de leur forte corrélation, en proposant une classification hiérarchique permettant d'organiser les données en fonction de leur niveau d'incertitude (LoU). Il prend en compte cinq niveaux d'incertitude allant de simples suppositions (LoU le plus élevé) à un niveau de connaissance très élevé (LoU le plus bas). Afin de visualiser ces LoU, nous avons appliqué au modèle 3D dénué de texture, une palette de couleurs allant du vert pour les éléments mesurés sur le terrain (LoU bas) au rouge pour les éléments les plus incertains (LoU élevé), comme suggéré par [Dell'Unto et al., 2013] et illustré dans la *figure 12*.

Concernant le Castellum, les données disponibles se limitent à quelques rares plans et croquis réalisés au XIX^e siècle, de rapports de fouilles, d'un travail de restitution en 2016 et des nuages de points issus de l'acquisition de quelques blocs récupérés. La décomposition en niveaux d'incertitude n'a pas pu utiliser les mêmes échelles de connaissances que celles employées pour le Kagenfels. Pour ce dernier, les éléments représentés en 3D ont tous effectivement existé. Le niveau d'incertitude le plus élevé pour le Kagenfels concernait la forme de l'objet, mais en aucun cas son existence (*figure 12a*). Tandis que le niveau d'incertitude le plus élevé du modèle du Castellum concernait l'existence même des éléments, comme les bâtiments du camp militaire (*figure 12b*).

Si la décomposition en niveaux d'incertitude reste dépendante du site, la visualisation de l'incertitude dans un gradient de LoU coloré est une solution efficace que nous retiendrons à l'avenir. Les modèles 3D ainsi colorisés peuvent être considérés comme un outil de synthèse archéologique permettant d'identifier directement la fiabilité des éléments reconstruits. Cette approche peut être appliquée à chaque château ou monument historique à condition que le tableau décrivant le niveau de connaissance ou d'incertitude (LoU) soit clairement explicité. Un travail similaire

traite de la transparence (déclaration des sources d'information) et de la fiabilité (déviations du modèle par rapport à la réalité) de la représentation numérique de modèles tels que construits [Maiezza, 2019].

Conclusion

Le thème de l'évaluation de la qualité des résultats issus de nos algorithmes de segmentation et de modélisation nous a amenés à réaliser un bilan des erreurs liées à l'acquisition, à l'objet numérisé et à la chaîne de traitements. Pour évaluer les résultats issus de nos chaînes de traitements, nous avons proposé des critères de qualité adaptés à notre problématique suivant que nous souhaitions comparer des segments, des surfaces, des volumes ou des points.

Ces critères de qualité s'appuient sur des comparaisons entre une entité détectée et une entité de référence, cette dernière jouant un rôle crucial de "vérité terrain" qu'il n'est pourtant pas intéressant de produire.

Dans le cas de la modélisation de sites archéologiques en partie détériorés ou disparus, cette vérité terrain est dans certains cas perdue à jamais. C'est pourquoi l'idée de quantifier les incertitudes issues d'hypothèses archéologiques au travers de modèles 3D décomposés en niveaux d'incertitude nous semble être une piste intéressante à explorer. ●

Références citées

Benazzi, T. (2018) *Restitution 4D du Château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site*. Projet de fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg

Boulaassal, H. (2010). *Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Chrisman, NR. (1991). *The error component in spatial data*. PA Longley, MF Goodchild, DJ Maguire, DW Rhind, eds., Geographical Information Systems, John Wiley & Sons, New-York, pp. 165-174

Dell'Unto, N., Leander, A. M., Dellepiane, M., Callieri, M., Ferdani, D. and Lindgren, S. (2013). *Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project*, 2013 Digital Heritage International Congress, pp. 621-628, doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804

Fai, S., Rafeiro, J. (2014). *Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information Model (BIM): West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sensing Spat. Inf. Sci. II-5, 123-130. Doi:10.5194/isprsannals-II-5-123-2014

Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., Jamet, O. (1997). *Evaluation of automatic road extraction*. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, pp. 47-56

Landes, T., Grussenmeyer, P. (2011a). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2)*. Revue XYZ de l'Association française de topographie (AFT), n° 128, p. 37-49

Landes, T., Grussenmeyer, P., Boulaassal, H. (2011b). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2)*. Revue XYZ de l'Association française de topographie (AFT), n° 129, p. 25-38

Landes, T., Boulaassal, H., Grussenmeyer, P. (2012a) *Quality assessment of geometric façade models reconstructed from TLS Data*. The Photogrammetric Record, 27(138): 137-154 (June 2012): 10.1111/j.1477-9730.2012.00674.x, 18 pages

Landes, T., Boulaassal, H., Grussenmeyer, P., Mohamed, M. (2012b). *Assessment of three-dimensional models derived from LiDAR and TLS data*. In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B2, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August - 01 September 2012, Melbourne, Australia

Landes, T., Heissler, M., Koehl, M., Benazzi, T., Nivola, T. (2019). *Uncertainty visualization approaches for 3d models of castles restituted from archeological knowledge*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9, 409-416, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-409-2019>, 2019





Landes, T. (2020). *Contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points*. Habilitation à diriger la recherche en Sciences de l'Ingénieur – Spécialité : Topographie, Géomatique. École doctorale n° 269 (Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03210034/document>

Landes, T. (2021). *HDR : contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points*. Revue XYZ de l'Association francophone de topographie (AFT), XYZ n° 167, ISSN 0290-9057, 2^e trimestre 2021, pp. 21-25

Lichti, D. (2017). *Ray-Tracing Method for Deriving Terrestrial Laser Scanner Systematic Errors*. J. Surv. Eng., 2017, 143(2): 06016005

Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017). *From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings*. Applied Sciences 2017, 7(10), 1030; doi:10.3390/app7101030

Macher, H. (2017). *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Macher, H., Chow, L., Fai, S. (2019). *Automating the verification of heritage building information models created from point cloud data*. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W9, 2019 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6-8 February 2019, Bergamo, Italy

Maiezza, P. (2019). *As-built reliability in architectural HBIM Modeling*. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W9, 2019 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6-8 February 2019, Bergamo, Italy, pp. 461-466

Mikhail, E.M., 1982. *Observations And Least Squares*, University Press of America, ISBN 10 0819123978

Mohamed, M., Landes, T., Grussenmeyer, P., Zhang, W. (2013). *Multi-dimensional quality assessment of photogrammetric and LiDAR datasets based on a vector*

approach, In: 8th International Symposium on Spatial Data Quality, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, B. Wu, E. Guilbert, and J. Shi (Eds.), Hong-Kong, China, Vol. XL-2/W1, pp. 93-98
doi:10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-93-2013

Mohamed, M. (2013). *Quality Assessment of 3D building models in airborne digital photogrammetry*. Évaluation de la qualité des modèles 3D de bâtiments en photogrammétrie numérique aérienne. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Nivola, T. (2018). *Modélisation 3D du castellum et du château disparus de Hurbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine*. Projet de fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg

Oude Elberink, S., Vosselman G. (2011). *Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(2): 157-165

Roynard, X., Deschaud, J.-E., Goulette, F. (2018). *Paris-Lille-3D: a large and high-quality ground truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification*. The International Journal of Robotics Research, 37(6):545-557, 2018. <http://nmp3d.fr>

Tarsha-Kurdi, F. (2008). *Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LiDAR aéroportés*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Yang, X. (2018). *3D modeling of built heritage: from geometric models to HBIM*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg.

Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., Landes, T. (2020). *Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information Techniques*. Journal of Cultural Heritage, 11 pages, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008>

YellowScan@2020 : Pourquoi parle-t-on de précision et d'exactitude avec le LiDAR, quelle est la différence. <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/knowledge/wait-accuracy-vs-precision-isnt-rocket-science/>

Zhang, W., Grussenmeyer, P., Yan, G. and Mohamed, M., 2011. *Primitive-based building reconstruction by integration of LiDAR data and optical imagery*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Calgary, Canada. Vol. 38(5/W12), 6 pages

Contact

Tania Landes

tania.landés@insa-strasbourg.fr

INSA Strasbourg – Spécialité Topographie

ABSTRACT

3D modelling responds to both economic and environmental challenges, whether on a building or city scale. Over the last ten years, acquisition techniques have evolved considerably in terms of their speed, the volume of data to be managed, the heterogeneity of information acquired by multi-sensor systems, as well as data processing methods. New processes have emerged such as the "scan-to-BIM" process that characterizes the steps leading from the point cloud to an intelligent digital model. By adopting the digital model, integrated into a collaborative BIM (Building Information Modelling) process, building stakeholders are able to perform simulations and reduce, in addition to costs, the environmental impact of interventions on the building, throughout its life cycle. In practice, to achieve an intelligent digital model of an existing building from a survey, various research works are carried out in the field of 3D data acquisition, registration, modelling until the production of the digital model, as summarized in the issue 167 of XYZ. This paper focuses on the question of the quality of 3D deliverables as detailed in Landes (2020). Assessment results aim to analyse the errors that may affect each step of the processing chain set up in a "scan-to-BIM" process. In addition to qualitative evaluation, i.e. a visual check of the result, quantitative evaluation methods are crucial to develop. This article focuses on the quantitative evaluation methods implemented in the research projects of our lab.

Ajustement en bloc des données de stations totales et de récepteurs GNSS dans les études de déformation

■ Joël VAN CRANENBROECK - Nicolas VAN CRANENBROECK

En 1988, le département de la géodésie de l'Institut géographique national de Belgique décida de contribuer aux relevés topographiques des zones urbaines en proposant deux innovations originales. Les nouvelles bases de données SIG urbaines bénéficiaient à cette époque d'un grand engouement de la part des pouvoirs publics. En général, les méthodes photogrammétriques étaient plébiscitées pour leur efficacité en termes de réalisation, mais au niveau de la qualité de la restitution ainsi que de l'interprétation des objets spatiaux, on était loin des espérances. Il était donc toujours indispensable de recourir à la topographie, non seulement pour améliorer la précision de certaines zones, mais également pour la mise à jour de ces bases de données année après année. La topographie avait vu également son évolution technique s'améliorer avec les nouvelles stations totales et les systèmes de traitement des données sur base de codage des informations attributaires des points, lignes et surfaces.

■ MOTS-CLÉS

Station libre, topométrie, réseau de surveillance, ajustement moindres carrés, GNSS, point de contrôle actif GNSS, réseau de densification.

L'encodage était fait à la station totale et le porte-prisme devait communiquer par radio les informations. Nous avons donc proposé comme première innovation de considérer l'encodage au prisme moyennant un boîtier de saisie synchronisé en temps avec les données saisies à la station totale. Nous fûmes heureusement surpris de recevoir la visite d'un directeur de la société Geotronics de Suède, nous annonçant confidentiellement la production d'une station totale robotisée permettant l'encodage au prisme. Il souhaitait valider l'opportunité de développements technologiques de leur société auprès de nous.

La deuxième innovation que nous avons proposée consistait à modifier la méthode de lever proprement dite et de généraliser l'utilisation de la méthode dite de "station libre". La difficulté étant de pouvoir disposer de multiples points de contrôle. Pour s'affranchir de cette difficulté, nous avons proposé l'ajustement en bloc des stations en nous inspirant des méthodes de la photo-

grammétrie [1] et en s'appuyant sur le concept des points de passage ou de transfert de coordonnées.

En mai 2004, nous avons appliqué cette méthode pour le calcul des coordonnées des stations totales automatiques impliquées dans les projets de mesure de déformation. En effet, pour bénéficier de la haute précision requise pour ces opérations, la portée des distances devait être réduite. En zone urbaine, ces stations devaient être suffisamment nombreuses pour relever tous les prismes dont les coordonnées 3D étaient requises. Le problème était que ces stations totales étaient installées dans des zones de déformation et qu'il fallait donc recalculer les coordonnées à chaque cycle de mesure en s'appuyant en final sur des prismes de contrôle installés sur des zones non soumises à déformation. Mêmes soucis pour les levés de déformation dans les mines à ciel ouvert.

En 2007, pour la construction du Burj Khalifa, nous avons développé le

concept de point de contrôle GPS actif où un prisme à 360° était colloqué par une antenne/récepteur de réception des signaux GPS et donc pouvait délivrer à la demande les coordonnées précises du prisme à 360° et fournir des références mises à jour régulièrement. La station de base GPS était installée dans une zone non soumise à déformation. En combinant la méthode d'ajustement en bloc des stations totales et de ces nouveaux points de contrôle GPS, nous avons la solution technique qui nous permettait de réaliser de multiples projets comme celui des mesures de déformation des bâtiments à Bruxelles lors du creusement d'un tunnel souterrain près du centre Schuman ou bien l'auscultation de quatre stations hydro-électriques en Ukraine en 2011.

Nous proposons dans cet article d'exposer cette méthode d'ajustement en bloc des stations libres avec les points de contrôle actif GNSS qui font partie d'un développement logiciel de la société CGEOS Creative Geosensing SPRL de Belgique.

Cette méthode a été inventée en 2004 par Joël van Cranenbroeck et brevetée au Canada et aux USA par Leica Geosystems AG sous la référence : CA 2482871 et sous le titre : *method and apparatus for ground-based surveying in sites having one or more unstable zone(s)*.

Introduction

Les méthodes de densification de canevas géodésique et topographique reposent notamment sur l'utilisation des stations totales qui ont connu des développements spectaculaires en matière de précision et d'automatisation. Le verrouillage automatique du télescope sur un prisme faisant appel à des

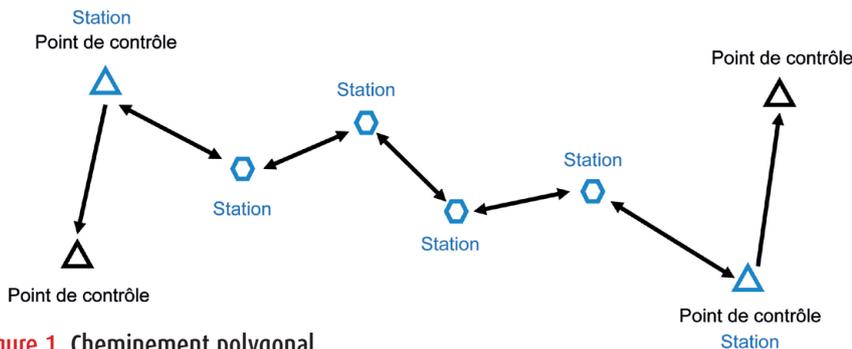


Figure 1. Cheminement polygonal.

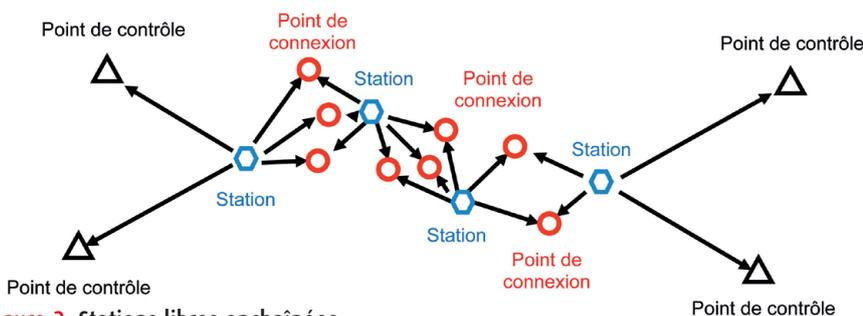


Figure 2. Stations libres enchaînées.



servo-moteurs, imposent la mesure sur prisme ce qui fait qu'aujourd'hui les coordonnées 3D sont aisément accessibles. Les méthodes basées sur les observations de direction (horizontale et zénithale) ont laissé place au cheminement polygonal et à la station libre.

Nous proposons dans cet article, une méthode qui exploite uniquement le modèle de traitement des stations libres en les enchaînant les unes aux autres par le biais de points de passage ou de connexion.

Le principe fut développé en photogrammétrie numérique pour l'ajustement des modèles indépendants.

Nous substituons donc à un cheminement polygonal (figure 1) une série de stations libres (figure 2). Le but d'un cheminement polygonal est de déterminer les coordonnées des points de station de proche en proche pour en final calculer les points de détail par rayonnement.

Ici, nous simplifions la mise en œuvre sur le terrain en nous focalisant sur les levés de points de détail. Il ne faut plus matérialiser les stations, mais il y a un avantage à marquer les points de connexion, du moins pendant les opérations de levé. Il y a donc un gain de productivité significatif.

L'autre avantage de la méthode proposée est qu'elle s'adapte parfaitement à la détermination des coordonnées

et l'orientation des stations totales déployées dans des projets de surveillance numérique (*monitoring*) où il ne faut pas assurer des visées réciproques sur les stations totales au prix de dispositif de montage de prisme dans l'axe principal des stations.

Enfin, nous présentons une méthode qui traite les X et Y séparément des Z. On peut également considérer cette méthode dans l'espace 3D en changeant de modèle mathématique et en adjoignant les rotations 3D.

Nous avons proposé cette méthode pour l'auscultation de quatre centrales hydro-électriques en Ukraine pour un projet financé par la Banque mondiale en 2010. Notre proposition a reçu la meilleure évaluation pour son caractère innovateur et également opérationnel.

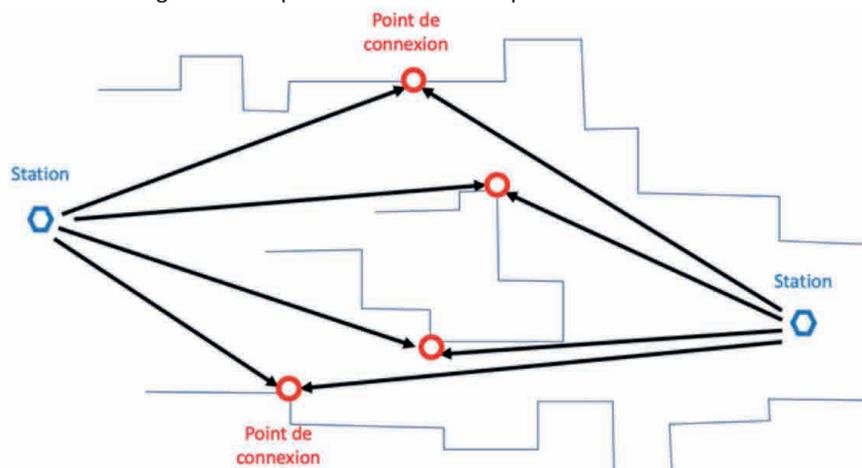


Figure 3. Points de connexion.

Nous y avons adjoint des points de contrôle actif GNSS en mode post-traitement et temps réel.

La société CGEOS Creative Geosensing SPRL a récemment développé les modules logiciels pour automatiser ce type de réseau de surveillance à l'aide de stations totales automatiques TOPCON/SOKKIA MS01AX/NET01AX.

L'un des modules permet de calculer l'ensemble des coordonnées du réseau et peut également être utilisé pour les applications topographiques basées sur cette méthode. CGEOS SPRL propose aussi l'intégration de ces moteurs de calcul à d'autres sociétés qui souhaiteraient en bénéficier.

Méthode des stations libres enchaînées

Sur le terrain, le topographe placera sa station totale de telle manière qu'il puisse relever un maximum de points de détail.

Dans l'application de la méthode des stations libres enchaînées, il lui suffira de marquer certains points de détail qui pourront être relevés d'une autre mise en station. C'est d'ailleurs une bonne pratique que de reprendre certains points pour s'assurer des contrôles en cours de levé. Les points de contrôle ne sont pas stationnés et donc on évite des mises en station qui ne visent qu'à assurer des fermetures polygonales.

Dans le cas d'une station totale robotisée, le topographe se retrouve au prisme et peut donc gérer lui-même les points de connexion (figure 3), ainsi que les marquer éventuellement. Il se retrouve



dans le cas d'une station libre à chaque mise en station, mais avec des points qui ne sont pas nécessairement déterminés ou alors le sont de la station précédente. Sans le calcul de l'ensemble des stations libres enchaînées, la propagation des erreurs altérera progressivement la qualité de son levé.

Le modèle fonctionnel et stochastique

Le modèle fonctionnel ou mathématique décrit les relations entre les paramètres observés et les coordonnées alors que le modèle stochastique décrit les variances et covariances associées aux paramètres.

Nous avons pris le parti de traiter non plus les observations (angles et distances) mais directement les coordonnées issues de celles-ci que l'on nomme pseudo-observations. Depuis longtemps en fait, nous avons opté pour cette approche en édifiant le principe que "tout ce qui se traite par les observations peut se traiter par les coordonnées seules".

L'équivalence est rigoureuse pour autant que le modèle stochastique le soit également. Il s'agit, dans le cadre des coordonnées, de considérer la propagation des variances et covariances dans le modèle fonctionnel qui exprime les coordonnées en fonction des observations.

$$\begin{aligned} x_p &= x_s + d_p \cdot \sin(g_p) \cdot \sin(v_p) \\ y_p &= y_s + d_p \cdot \cos(g_p) \cdot \sin(v_p) \\ z_p &= z_s + d_p \cdot \cos(v_p) \end{aligned}$$

Celles-ci sont caractérisables par leurs variances également. Rappelons que l'écart-standard d'une population est la racine carrée de la variance de cette population. Exprimé sous forme matricielle, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + d \cdot \begin{bmatrix} \sin(g_p) \cdot \cos(v_p) \\ \cos(g_p) \cdot \cos(v_p) \\ \sin(v_p) \end{bmatrix}$$

Que l'on différencie en fonction des observations pour obtenir :

$$A = \begin{bmatrix} d_p \cdot \cos(g_p) \cdot \sin(v_p) & \sin(g_p) \cdot \sin(v_p) & d_p \cdot \sin(g_p) \cdot \cos(v_p) \\ -d_p \cdot \sin(g_p) \cdot \sin(v_p) & \cos(g_p) \cdot \sin(v_p) & -d_p \cdot \cos(g_p) \cdot \cos(v_p) \\ 0 & \cos(v_p) & -d_p \cdot \sin(v_p) \end{bmatrix}$$

Et pour obtenir la matrice de variance covariance des paramètres :

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

$$Q_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_{d_p}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_p}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{g_p}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_p \cdot \cos(g_p) \cdot \sin(v_p) & -d_p \cdot \sin(g_p) \cdot \sin(v_p) & 0 \\ \sin(g_p) \cdot \sin(v_p) & \cos(g_p) \cdot \sin(v_p) & \cos(v_p) \\ d_p \cdot \sin(g_p) \cdot \cos(v_p) & -d_p \cdot \cos(g_p) \cdot \cos(v_p) & -d_p \cdot \sin(v_p) \end{bmatrix}$$

Avec σ_{d_p} l'écart-standard sur la mesure de la distance, σ_{v_p} l'écart-standard sur la mesure de la direction zénithale et σ_{g_p} l'écart-standard sur le gisement qui lui-même doit être estimé en fonction des écarts-standard des coordonnées à partir desquels il est calculé.

On peut, à partir de la matrice des variances-covariances des paramètres, exprimé l'ellipse de dispersion des écarts-standard par le calcul des valeurs propres de cette matrice :

$$a_i^2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_0^2 (Q_{x_i x_i} + Q_{y_i y_i} + \omega_i)$$

$$b_i^2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_0^2 (Q_{x_i x_i} + Q_{y_i y_i} - \omega_i)$$

$$\tan 2\theta_i = \frac{2Q_{x_i y_i}}{Q_{y_i y_i} - Q_{x_i x_i}}$$

$$\omega_i^2 = (Q_{x_i x_i} - Q_{y_i y_i})^2 + 4Q_{x_i y_i}^2$$

Les a_i et b_i sont les demi-grand et petit axes de l'ellipse et θ_i l'orientation du grand axe.

Prenons maintenant le cas d'une transformation de coordonnées par similitude (figure 4).

Nous exprimons le changement de coordonnées par deux translations en X et Y que nous noterons a et b, une rotation α autour des axes X, Y et un facteur d'échelle noté k.

Cette transformation est également connue sous le nom de "transformation de Helmert". Helmert fut un géodésien

allemand qui contribua grandement à l'application de la méthode des moindres carrés en géodésie.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + k \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

En posant $k \cdot \cos \alpha = c$ et $k \cdot \sin \alpha = d$ nous pouvons écrire en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p & y_p \\ 0 & 1 & y_p & -x_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

Si nous disposons des coordonnées de trois points connus P, Q et R dans deux systèmes de coordonnées (x, y) et (X, Y), et si nous désirons établir les quatre paramètres de la transformation d'un système de coordonnées locales en un système de coordonnées générales pour convertir d'autres points non connus dans les deux référentiels, nous allons appliquer cette transformation :

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ X_Q \\ Y_Q \\ X_R \\ Y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p & y_p \\ 0 & 1 & y_p & -x_p \\ 1 & 0 & x_Q & y_Q \\ 0 & 1 & y_Q & -x_Q \\ 1 & 0 & x_R & y_R \\ 0 & 1 & y_R & -x_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (3)$$

En posant :

$$l_{6,1} = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ X_Q \\ Y_Q \\ X_R \\ Y_R \end{bmatrix} A_{6,4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p & y_p \\ 0 & 1 & y_p & -x_p \\ 1 & 0 & x_Q & y_Q \\ 0 & 1 & y_Q & -x_Q \\ 1 & 0 & x_R & y_R \\ 0 & 1 & y_R & -x_R \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{x}_{4,1} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (4)$$

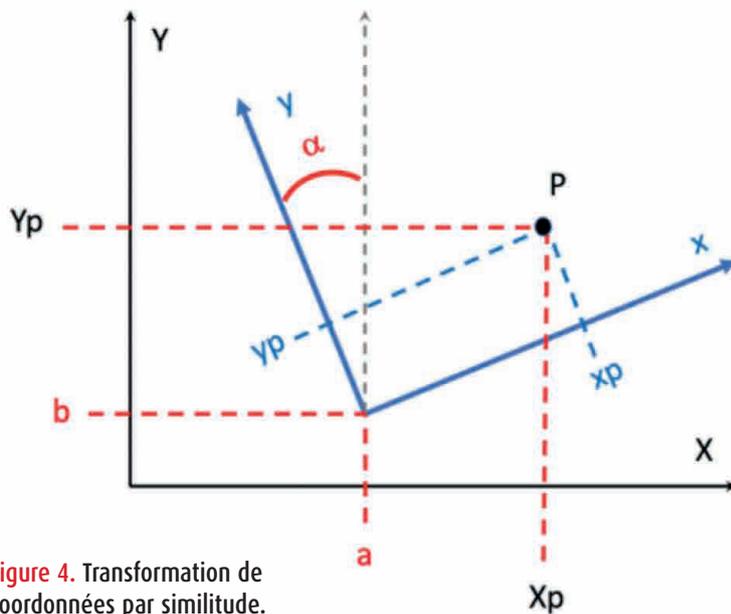


Figure 4. Transformation de coordonnées par similitude.



On a donc un système d'équations linéaire surdimensionné, comportant 12 inconnues et 16 observations avec un degré de liberté de $16 - 12 = 4$

La résolution de ce système se réalise à l'aide de la méthode des moindres carrés.

On constate que l'on a une matrice creuse avec beaucoup d'éléments zéro. En reportant les coordonnées des stations à leur centre de gravité, on trouvera une partition de la matrice des équations d'observation en quatre sous-matrices qui permettent de résoudre de grands systèmes d'équations de façon plus rapide.

Une autre stratégie consiste à effectuer la formation des équations normales $A^T A$ en déterminant les éléments non nuls et en effectuant les opérations sur ces seuls éléments, puis de triangulariser cette matrice des équations normales en utilisant la décomposition de Cholesky ou bien à l'aide des rotations de Givens.

L'autre problème de ce genre de matrice et du modèle fonctionnel que nous avons développé, c'est la grandeur numérique des coefficients qui peuvent exacerber une instabilité numérique de la solution étant donné leur élévation au carré et leurs produits.

Nous avons, pour notre part [9], opté pour l'algorithme d'orthogonalisation généralisée de Gram-Schmidt qui permet de ne pas former les équations normales et de résoudre non seulement ce système d'équations linéaires surdimensionné, mais également de dériver facilement les autres matrices de variance-covariance.

De plus, l'orthogonalisation généralisée est particulièrement insensible à l'instabilité numérique. Avec les ordinateurs actuels, les capacités de mémoire et les processeurs ne posent plus guère de problème dans la vitesse d'exécution et la représentation en mémoire des nombres.

Comme indiqué auparavant, on peut introduire le modèle stochastique des pseudo-observations pour chaque point en considérant la matrice de variance-covariance développée ci-avant.

Si l'on regarde maintenant les conditions de configuration, on voit que l'on pourrait traiter un cheminement polygonal encadré par deux points de contrôle en ayant pour chaque station deux points de connexion en commun. Dans ce cas, on aura autant d'équations que d'inconnues, aucune redondance et le degré de liberté devient zéro.

En pratique, en topographie et en géodésie, on mesure plus d'observations que nécessaire pour s'assurer un contrôle interne et externe. La qualité d'un travail topographique ou géodésique s'exprimant :

Qualité = Précision x Fiabilité

Il est illusoire d'avoir une précision élevée alors que la fiabilité (capacité d'autocontrôler les observations les unes par les autres) est faible.

Inférence statistique et détection des fautes

Après la résolution du système d'équations par la méthode des moindres carrés, il s'agit de valider les résultats en utilisant les paramètres qui se déduisent de la méthode [7].

On peut obtenir un facteur de variance *a priori* en considérant les corrections ou résidus après ajustement des pseudo-observations :

$$\tilde{v} = A\tilde{x} - l \quad (9)$$

Pour l'étude de la précision et de la fiabilité, il nous faut encore les matrices suivantes :

- La matrice des cofacteurs du paramètre \tilde{x} :

$$C_{xx} = (A^T A)^{-1} \quad (10)$$

- La matrice des cofacteurs du vecteur de correction \tilde{v} :

$$C_{vv} = C_{ll} - A(A^T A)^{-1} A^T \quad (11)$$

La démonstration relative à ces deux matrices s'appuie sur la loi de propagation des variances-covariances pour des fonctions linéaires.

Pour obtenir les matrices de variance covariances résultantes, il faut un estimateur du facteur de variance et multiplier les matrices des cofacteurs

avec celui-ci. Il peut être obtenu *a priori* par la détermination de la précision des coordonnées issues du calcul des observations de la station totale comme décrit ci-avant.

On peut également estimer un facteur de variance *a posteriori* en exploitant les corrections obtenues après ajustement :

$$s_0^2 = \frac{v^T v}{n-m} \quad (12)$$

Avec n le nombre d'observations et m le nombre de paramètres à estimer.

Il existe en géodésie et en topographie diverses méthodes de test permettant de décrire la qualité d'un canevas de densification. La méthode que nous utilisons est connue sous le nom de "Méthode B" d'après le nom de son auteur, le Professeur Baarda de TU Delft en Hollande.

Elle consiste à définir une hypothèse nulle H_0 qui peut être comparée par rapport à une ou plusieurs hypothèses alternatives H_a .

L'hypothèse nulle en géodésie et en topographie suppose :

- que le modèle stochastique soit bien formulé, c'est-à-dire que le facteur de variance *a priori* reflète bien le niveau de bruit des observations ;
- que le modèle fonctionnel est bien formulé, c'est-à-dire que les équations reflètent bien la nature des observations ;
- qu'il n'y ait pas d'erreurs grossières dans les observations.

De par l'emploi d'instruments de mesure bien calibrés, il est généralement satisfait aux deux premières hypothèses. La troisième hypothèse n'est pas aussi évidente et c'est la raison pour laquelle on formule une hypothèse alternative qui tient compte de la présence d'erreurs grossières dans les observations.

Notre logiciel intègre cette méthode de détection des erreurs grossières et permet de produire une série de paramètres reprenant les erreurs marginales détectables ainsi que la contribution de chaque observation à la redondance totale du système d'équation. Les paramètres de la méthode B sont calculés et non pas extraits d'une



▶ table de valeur.

Points de contrôle actif GNSS

Souvent les stations totales dans un projet d'étude de déformation sont placées dans la zone de déformation pour conserver des portées relativement courtes et bénéficier de la haute précision dans la mesure des distances et de la localisation automatique des prismes.

Il faut, dès lors, avoir des points de contrôle qui sont réputés stables, ce qui est paradoxal dans ce type de projet. Depuis la construction du Burj Khalifa à Dubaï, nous avons validé notre méthode de combiner station totale et points de contrôle actif GNSS (figure 6). Le principe est tout simplement de visser sur un prisme à 360° une antenne GNSS connectée ou intégrée avec le récepteur.

Nous avons également proposé cette méthode pour le projet de l'UHE en Ukraine (figure 7) où quatre stations hydro-électriques devaient être équipées chacune d'un réseau de déformation microgéodésique.

Pratiquement, les récepteurs GNSS sont configurés en RTK et envoient leurs données en temps réel vers un serveur qui décode les observations et les convertit dans le système de référence des stations totales.

Ces données mettent à jour les coordonnées des points de contrôle en temps réel. Chaque fois que les cycles d'observation des stations totales se concluent, l'ajustement considère les coordonnées mises à jour des points de contrôle actif GNSS.

Un autre bénéfice d'intégrer ces points de contrôle actif GNSS (figure 8) est de permettre un meilleur contrôle de la réfraction atmosphérique sur les observations des stations totales. En effet, le GNSS est insensible (ou dans un degré moindre) aux conditions atmosphériques et donc, les données peuvent contribuer significativement à corriger les observations et, par là-même, les coordonnées des points issus des stations totales.

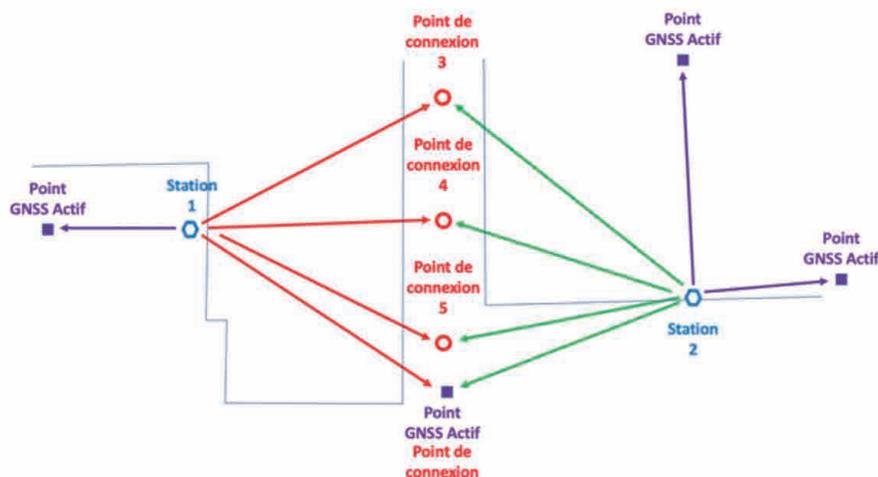


Figure 6. Points de contrôle GNSS actif et points de connexion.

Ajustement des observations

On peut toujours considérer les coordonnées obtenues par cette méthode comme coordonnées approchées pour réaliser un nouvel ajustement des observations.

On aura dans ce cas à traiter les équations linéarisées en direction horizontale et zénithale ainsi que les distances obliques. Il s'agit du traitement classique appliqué aux réseaux géodésiques et topographiques.

Les résultats seront identiques si les modèles stochastiques sont pris en compte, mais l'inférence statistique portera sur les observations propre-

ment dites ainsi que les tests de détection des erreurs grossières.

Ajustement en réseau libre

Si tous les points sont mesurés deux fois au plus par différentes stations (figure 9), on peut procéder à un ajustement libre. Dans ce cas le système d'équation linéaire formé par les équations d'observation présentera un déterminant proche de zéro et l'inversion de la matrice des équations normales devra se réaliser en utilisant une inverse généralisée.

On parle de déficience de rang qui correspond à ce qu'il manque de



Figure 7. Centrale hydro-électrique de Dniestr en Ukraine.



Figure 8. Point de contrôle actif GNSS à Dniestr en Ukraine.

données pour permettre le calcul des coordonnées. Dans notre cas, on postule qu'un seul point de contrôle n'est connu à ce stade et l'inverse généralisée peut être définie comme suit : En triangularisant la matrice des équations normales et en excluant les lignes nulles qui correspondent à la déficience de rang $T = A^T A$ Bjerhammar [5], on montre que son inverse généralisée est $N^+ = T^T (TT^T)^{-1} (TT^T)^{-1} T$, dans ce cas, la solution est donnée par $\tilde{x} = N^+ A^T l$

Cette approche permet de qualifier les observations par la méthode B, puis d'adapter le réseau sur les points connus et de vérifier qu'aucun ne présente d'erreur grossière. La même technique permet également de tester sur les points d'auscultation lesquels se sont déplacés.

On teste généralement l'adaptation sur les points de contrôle (figure 10) en utilisant une transformation par similitude et en vérifiant les corrections après transformation [7].

On ne peut se dispenser de tous les points de contrôle, car dans ce cas, le vecteur des observations sera nul et donc, même avec une inverse généralisée, la solution sera nulle également.

Les logiciels RAPSIS, DUPLO et GNSSip

Il existe sur le marché, des logiciels de surveillance numérique (monitoring)

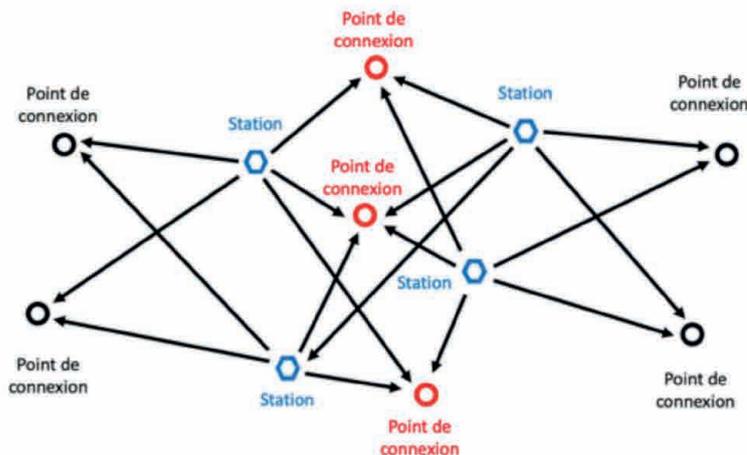


Figure 9. Réseau libre de stations enchaînées.

qui pilotent les stations totales robotisées, calculent les coordonnées et produisent des rapports. Généralement, ce sont les producteurs d'instruments topographiques qui en sont les éditeurs.

Peu de ces logiciels exposent en détail les méthodes de calcul qu'il est pourtant essentiel de connaître pour pouvoir interpréter correctement les résultats.

Les projets d'étude de déformation doivent être configurés de manière à ce qu'ils soient adaptés à ces logiciels et leur logique de calcul.

Nous sommes convaincus qu'une autre approche est possible et même souhaitable ; à savoir porter l'effort d'un logiciel sur des algorithmes détaillés et supporter les interfaces des stations totales que les donneurs d'ordre souhaitent utiliser. L'intégration

des points de contrôle actif GNSS est une des fonctionnalités que nous jugeons importantes.

En développant nos propres logiciels (figure 11), nous souhaitons donc changer les solutions actuelles disponibles sur le marché en proposant une approche innovatrice, ouverte et documentée. Sur des projets d'importance, nous n'hésitons pas par exemple à communiquer les sources de nos logiciels pour garantir aux utilisateurs la pérennité de leurs projets.

Le module RAPSIS (Remote Polar System Integrated Solution) permet le pilotage des stations totales motorisées de TOPCON/SOKKIA, envoie les données à la fin de chaque cycle sur un serveur TCP-IP et copie ces données sur un serveur FTP. À chaque nouveau cycle, une mesure sur les points de contrôle permet de recalculer les

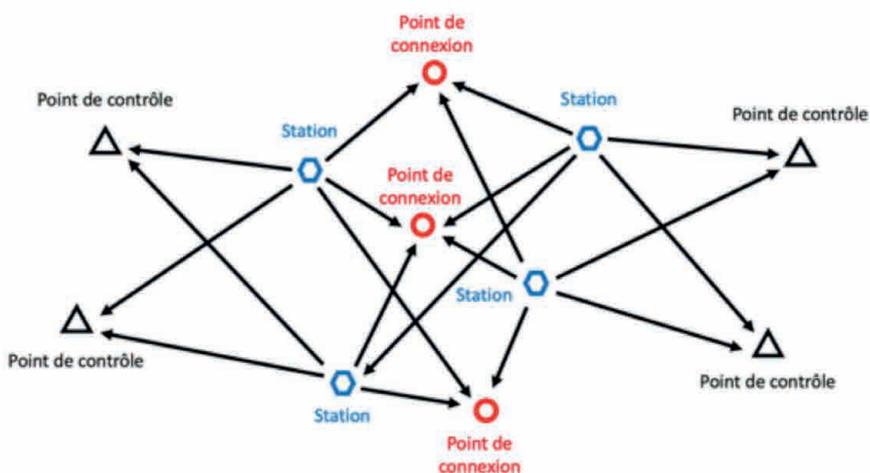


Figure 10. Réseau libre adapté sur les points de contrôle.

► coordonnées et l'orientation de la station totale par une transformation que nous avons exposée ci-avant.

Le module DUPLO reprend les données des stations totales à chaque fin de cycle, intègre les points de contrôle actif GNSS et recalcul le réseau en appliquant la méthode B de test. Les rapports et les points sont envoyés sur un serveur FTP et sauvegardés sous forme de fichiers textes.

Le module GNSSip se connecte par TCP-IP sur les flux des données des récepteurs équipés de prisme à 360°, convertit les données (latitude, longitude et altitude) dans le système de coordonnées des stations totales et renvoie les coordonnées au serveur DUPLO pour mettre à jour les coordonnées des points de contrôle.

Ce logiciel est déjà en place sur plusieurs projets en Belgique et à l'étranger.

Conclusion

La méthode exposée et inspirée du traitement photogrammétrique des modèles indépendants est appliquée à la topographie et aux réseaux de surveillance numérique (*monitoring*). Elle peut s'appliquer à l'ajustement de feuilles cadastrales numérisées également [8].

Les auteurs espèrent que par le biais de cette publication, les topographes pourront élargir leurs méthodes de levé en adoptant la méthode des stations libres enchaînées.

Cette nouvelle méthode de levés topographiques exploite davantage la

souplesse et la flexibilité des stations totales robotisées et se réalise en utilisant le traitement des pseudo-observations en bloc par la méthode des moindres carrés.

Que ce soit pour des levés de détails ou pour des projets de surveillance numérique, nous sommes convaincus que la différence se jouera sur l'ingéniosité des algorithmes qui se plieront aux contraintes des situations en présence et non l'inverse. Imposer une certaine méthodologie parce qu'un logiciel l'impose n'est plus acceptable. ●

Contacts

Prof. Joël van Cranenbroeck,
Managing Director,
creativegeosensing@gmail.com

Nicolas van Cranenbroeck,
Application Engineer
nico93cgeos@gmail.com

Références

- [1] Karl Kraus – *Photogrammetry, Geometry from Images et Laser Scans*, 2nd Edition de Gruyter
- [2] Joël van Cranenbroeck – *Station Libre et Ajustement en Bloc d'un ensemble de Stations Libres* 17 octobre 1988 publication interne de l'Institut géographique national de Belgique
- [3] Brevet CA 2482871 sous le titre : **method and apparatus for ground-based surveying in sites having one or more unstable zone(s)**
- [4] Edward M. Mikhail – *Observations and Least Squares* – University Press of America 1971

[5] Arne Bjerhammar – *Theory of Errors and Generalized Matrix Inverses*, Elsevier Scientific Publishing Company 1973

[6] Charles D. Ghilani – *Adjustment Computations, Spatial Data Analysis* – Wiley 2018 6th edition

[7] W.F. Caspary – *Concept of Network and Deformation Analysis* – Monograph 11 School of Surveying, the University of New South Wales, Kensington, Australia 1988

[8] Michael Klebanov & Yerach Doytsher – *Triangulation: A Block Adjustment Approach for Joining Numerous Cadastral Blocks 2009* in https://www.researchgate.net/publication/242750165_Cadastral_Triangulation_A_Block_Adjustment_Approach_for_Joining_Numerous_Cadastral_Blocks

[9] Joel van cranenbroeck & Sara Salehi *Orthogonal Least Squares Adjustment Processing Algorithm for Data Loggers* November 2011 Conference: Joint International Symposium on Deformation Monitoring (ISDM) https://www.researchgate.net/publication/325038553_Orthogonal_Least_Squares_Adjustment_Processing_Algorithm_for_Data_Loggers

ABSTRACT

In 1988, the Department of Geodesy of the National Geographic Institute of Belgium decided to contribute to topographic surveys of urban areas by proposing original innovations. One innovation that we proposed consisted in modifying the surveying methods itself by generalizing the use of the so-called "free station" method. The difficulty is to be able to sight multiple control points at every station. To overcome this difficulty, we have proposed the block adjustment of the stations inspired by the methods of photogrammetry and based on the concept of pass points or points to transfer or propagate coordinates. In May 2004, we applied this method for calculating the coordinates of automatic total stations involved in deformation measurement projects. By combining the method of block adjustment of total stations and GNSS control points, we had the technical solution which allowed us to carry out multiple projects.

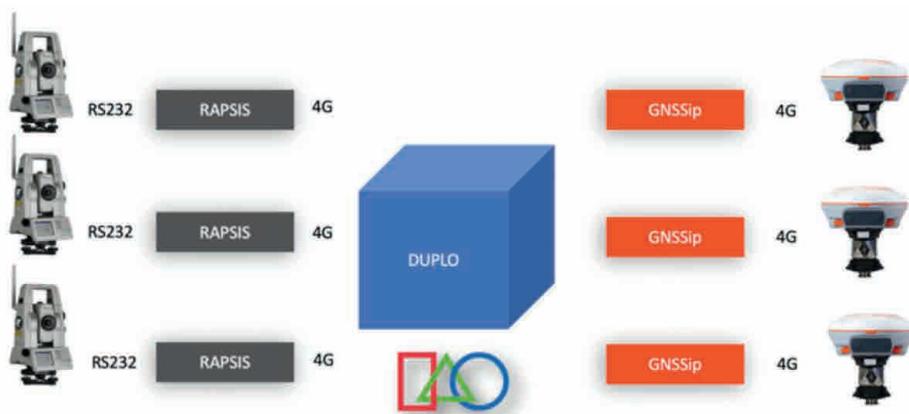


Figure 11. Architecture logicielle CGEOS Creative Geosensing SPRL.

Délimitation du domaine public maritime en province Sud de la Nouvelle-Calédonie

Ludovic RUFFENACH

Le domaine public maritime en Nouvelle-Calédonie est constitué d'une bande terrestre, gérée par la province Sud, de 81,2 m qui débute à partir de la laisse des plus hautes mers. La délimitation de cette zone imprescriptible et inaliénable est éphémère en raison de la fluctuation naturelle de la laisse. Cette délimitation va directement impacter les propriétaires des parcelles contiguës. Il convient donc d'appliquer, parmi les méthodes utilisées en France métropolitaine et dans les Outre-mer, le procédé scientifique le plus adapté pour l'effectuer.

MOTS-CLÉS

Littoral, domaine public maritime, zone de pas géométriques, délimitation.

La Nouvelle-Calédonie est une île, collectivité *sui generis*¹ française située au milieu du Pacifique Sud, à l'Est de l'Australie et au Nord de la Nouvelle-Zélande. Nino Ferrer disait de ce territoire que "c'est un endroit qui ressemble à la Louisiane, à l'Italie [...] On dirait le Sud, le temps dure longtemps [...] plus d'un million d'années, et toujours en été"². Le chanteur y décrit ce territoire de manière paisible.

La Nouvelle-Calédonie est peuplée de Kanaks (premiers occupants), d'Européens, d'Indonésiens, de Tahitiens, de Wallisiens, de Futuniens et d'autres ethnies³. La diversité culturelle de cette population a fait naître des divergences quant à l'avenir du territoire. Une partie de la population souhaitant rester française, et l'autre partie étant favorable à l'indépendance et ainsi à la pleine souveraineté du "Caillou"⁴.

1 "De son propre genre", le statut de la Nouvelle-Calédonie est expliqué sur le site du Conseil constitutionnel : <https://www.conseil-constitutionnel.fr/nouveaux-cahiers-du-conseil-constitutionnel/le-conseil-constitutionnel-face-a-l-autonomie-de-la-nouvelle-caledonie>

2 Ferrer Nino, 1975, "Le Sud", chanson sortie en 45 tours

3 Site de l'Institut de la statistique et des études économiques Nouvelle-Calédonie (consulté le 01/06/2021), <https://www.isee.nc/population/recensement/communautes>

4 Surnom utilisé pour désigner la Nouvelle-Calédonie

Ce désaccord a provoqué plusieurs conflits qui nous ont amenés à nous interroger sur l'avenir institutionnel de la Nouvelle-Calédonie. Le résultat de ces questionnements s'est traduit par deux accords avec et au sein de la République française. Le premier, celui de Matignon Oudinot le 26 juin 1988⁵, a permis une division administrative du territoire en trois collectivités qui vinrent remplacer les régions : la province Sud, la province Nord et la province des îles⁶. Les provinces sont délimitées par un découpage géographique. Les province Sud et Nord sont situées sur l'île principale de la Nouvelle-Calédonie et la province des îles est formée par Lifou, Marée et Ouvéa qui sont trois îles situées à l'Est de la Grande-Terre⁷. L'accord de Nouméa, dix ans plus tard (le 5 mai 1998) va permettre d'introduire la loi organique du 19 mars 1999⁸. Cette loi va notamment permettre le transfert

5 Beneteau Jocelyn, 2020, "FASC 130-70 : Nouvelle-Calédonie", JurisClasseur Propriétés publiques, 50 p.

6 Pitoiset Anne, Maison de la Nouvelle-Calédonie, 2011, "Les 3 Provinces de la Nouvelle-Calédonie", Revue de la Maison de la Nouvelle-Calédonie, 30 p.

7 Nom donné à l'île principale Nouvelle-Calédonie.

8 Loi organique n° 99-209 du 19 mars 1999 relative à la Nouvelle-Calédonie, com. n° 99-409 DC et n° 99-410 DC, les Cahiers du Conseil constitutionnel, Cahier n° 7

de plusieurs compétences de l'État à la Nouvelle-Calédonie et ses collectivités décentralisées⁹. Pour exercer ces compétences, des instances spécifiques ont été créées : le congrès de la Nouvelle-Calédonie qui est une assemblée délibérante, le gouvernement qui a un rôle exécutif, le sénat coutumier qui est l'institution de référence sur l'identité kanak, le conseil économique, social et environnemental et les conseils coutumiers.¹⁰

Aujourd'hui, la Nouvelle-Calédonie compte 271 407 habitants¹¹, pour une superficie de 19 110 km²¹², ce qui représente 14 habitants au km²¹³. C'est une densité de population très faible, mais qui n'est pas représentative de la répartition des habitants. En 2009, près de trois Calédoniens sur quatre vivaient en province Sud (74,5 %)¹⁴. La province Nord et celle des îles comprennent donc des espaces immenses non peuplés.

De surcroît, un deuxième déséquilibre est généré par la chaîne de montagnes qui est située au centre de la Nouvelle-Calédonie tout le long

9 On parle ici de la collectivité de la Nouvelle-Calédonie et des collectivités provinciales

10 Article 2, Loi n° 99-209 organique du 19 mars 1999 relative à la Nouvelle-Calédonie

11 Données provenant du site de l'Institut de la statistique et des études économiques Nouvelle-Calédonie concernant le recensement de 2019

12 Beneteau Jocelyn, 2020, "FASC 130-70 : Nouvelle-Calédonie", JurisClasseur Propriétés publiques, 50 p., spéc.p.2

13 Calcul de densité de population au km² réalisé avec les données 11 et 12

14 Pitoiset Anne, Maison de la Nouvelle-Calédonie, 2011, "Les 3 Provinces de la Nouvelle-Calédonie", Revue de la Maison de la Nouvelle-Calédonie, 30 p., spéc.p.7



de la Grande-Terre. Une grande partie de la population s'est en effet installée en zone littorale ou proche des zones littorales. En 2004, Pascal Dumas, docteur en géographie, aménagement et environnement, écrivait après la réalisation de traitements de science de l'information géographique (SIG) que "Le croisement de ces résultats en relation avec les données démographiques¹⁵ montre que 65 % de la population de la Grande-Terre vit à moins de 1 000 mètres du rivage, 70 % à moins de 2 000 m et 72 % à moins de 3 000 m"¹⁶. Les espaces littoraux et leurs environs touchent donc une partie significative de la population.

La zone de pas géométriques, une bande singulière en constante évolution

■ Évolution d'usage de la domanialité publique en Nouvelle-Calédonie

La gestion et la délimitation du domaine public maritime (DPM) sont des compétences des provinces (figure 1). Il s'agit d'une tâche qui était effectuée par l'État avant la loi organique du 19 mars 1999. Selon son article 45 et sous réserve des droits des tiers, le domaine public maritime des provinces de la Nouvelle-Calédonie est composé de la zone dite des cinquante pas géométriques, des rivages de la mer, des terrains gagnés sur la mer, du sol et du sous-sol des eaux intérieures, dont ceux des rades et lagons, telles que définies par les conventions internationales, ainsi que du sol et du sous-sol des eaux territoriales. Les îles qui ne sont pas comprises dans le territoire d'une province ainsi que le sol et sous-sol du plan d'eau du port autonome de la Nouvelle-Calédonie font partie du domaine public de la Nouvelle-Calédonie¹⁷.

15 Pascal Dumas avait utilisé à l'époque des données démographiques issues du recensement de l'INSEE de 1996

16 Dumas Pascal, 2004, "Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie", thèse soutenue à l'université d'Orléans, 402 p., spéc.p.158

17 Article 45, loi n° 99-209 organique du 19 mars 1999 relative à la Nouvelle-

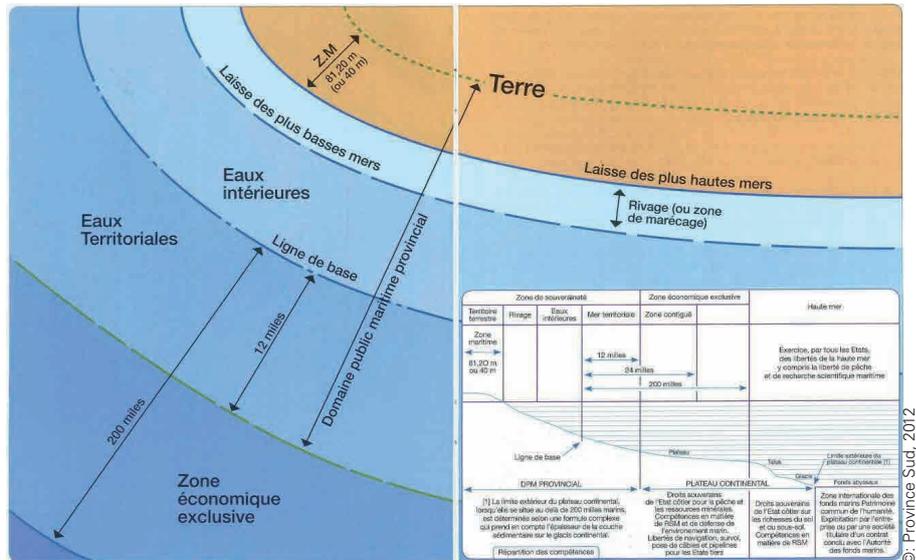


Figure 1. Représentation schématique du DPM en Nouvelle-Calédonie.

La "zone de pas géométriques" (ZPG) est la bande terrestre du DPM qui trouve son origine en Nouvelle-Calédonie en 1855. On l'appelait à l'époque la "réserve littorale" : "Le littoral de chacune des îles comprenant une zone de 40 mètres à partir de la limite de la haute mer des équinoxes, est déclaré à perpétué inaliénable"¹⁸. En 1867, la réserve littorale maritime passe de 40 mètres à 81,2 mètres¹⁹. Cela correspondrait aux 50 pas du Roi que l'on a nommé plus tard zone de pas géométriques²⁰ (ZPG). Cette réserve fait partie du domaine inaliénable de l'État, mais il n'est pas stipulé qu'elle fait partie du DPM. Ce n'est qu'après la création de la loi organique en 1999²¹, qu'elle sera explicitement désignée comme partie du DPM.

Cette zone devait permettre de se défendre contre des attaques d'ennemis arrivant par la mer en y installant des fortifications et des éléments de protection. Elle pouvait aussi "servir

Calédonie. com. n° 99-409 DC et n° 99-410 DC, les Cahiers du Conseil constitutionnel, Cahier n° 7

18 Gouverneur de la Nouvelle-Calédonie, 1855, arrêté n° 48

19 Gouverneur de la Nouvelle-Calédonie, 1867, arrêté n° 122

20 Le pas géométrique correspondrait à 1,624 mètre

21 Article 45, Loi n° 99-209 organique du 19 mars 1999 relative à la Nouvelle-Calédonie. com. n° 99-409 DC et n° 99-410 DC, les Cahiers du Conseil constitutionnel, Cahier n° 7

aux capitaines de navires qui viennent aux îles d'aller couper du bois dans les 50 pas du Roi pour leur nécessité [...]"²² Cette bande permettait enfin le passage libre au long de la mer ainsi que la possibilité pour les artisans (les maçons, les charpentiers, les pêcheurs, etc.) de se loger en y construisant leurs habitations. D'après le rapport de Denis Clement et Georges-André Morin, "cette dernière raison [...] implique la présence d'habitations dans celle-ci : il ne s'agit donc pas d'inconstructibilité, mais de faciliter l'établissement d'activités en liaison avec les activités maritimes."²³ Le but originel de cette zone n'était donc pas l'inaliénabilité et l'inconstructibilité, mais une mise à disposition des populations afin de répondre à un intérêt général. L'État a d'ailleurs quelque peu contourné la règle d'inaliénabilité du DPM en Nouvelle-Calédonie, ayant recours à un certain nombre de déclassements de partie de sa ZPG. Il s'agit de 5 395 ha en province Nord, 734 ha en province Sud et 9 ha aux îles Loyauté²⁴ qui ont été déclassés en application du décret du 27 juillet 1930²⁵.

22 Clement Denis et Morin Georges-André, 2015, "Les 50 pas géométriques naturels des outre-mer, Préservation de la biodiversité et maîtrise foncière", 124 p., spéc.p.12

23 Ibid, spéc.p.13

24 Direction du foncier et de l'aménagement de la province Sud, Analyse foncière, 2013, Statut des terrains situés dans une bande littorale de 81,20 m de large, au vu de la loi organique

25 Décret du 27 juillet 1930 relatif au déclassement des parcelles de la zone des pas géométriques en Nouvelle-Calédonie.

© Province Sud, 2012



De plus, depuis 1890 il n'y a plus de ZPG sur la commune de Nouméa²⁶. Pour rassembler et clarifier l'ensemble de ces successions d'arrêtés et décrets, une loi de pays concernant notamment le DPM a été créée en 2002²⁷. On y retrouve l'actuelle définition de la ZPG : "La zone dite des pas géométriques est constituée par une bande de terrain d'une largeur de 81,20 m comptée à partir de la limite supérieure du rivage de la mer (soit cinquante pas géométriques). Elle est de 40 m lorsque les propriétaires de parcelles riveraines justifient d'un droit fondé en titre. Les droits des tiers résultant de titres valides consentis :

- avant l'instauration de la zone inaliénable de 40 m par la décision du gouverneur portant règlement sur les concessions de terres en Nouvelle-Calédonie du 10 avril 1855,
- ou après déclassement de la zone des pas géométriques en vertu des dispositions du décret du 18 juin 1890 portant abandon au profit du domaine communal des terrains compris sur les pas géométriques dans le périmètre de la ville de Nouméa ou en application du décret du 27 juillet 1930 relatif au déclassement des parcelles de la zone des pas géométriques en Nouvelle-Calédonie, sont expressément réservés."²⁸

■ Une évolution physique du rivage en raison d'éléments naturels

La délimitation de la ZPG s'effectue donc à partir de la limite supérieure du rivage de la mer, appelée aussi "laisse des plus hautes mers" (figure 2). Cette "laisse" peut-être soumise à différents phénomènes qui vont l'affecter.

Un des éléments naturels qui impacte cette laisse est l'érosion côtière. On peut la définir comme "une perte graduelle de matériaux vers la mer touchant tous les types de littoraux, qu'ils soient sableux, vaseux ou rocheux. Il résulte

26 Décret du 18 juin 1890 relatif à l'abandon au profit du domaine communal des terrains compris sur les pas géométriques dans le périmètre de la ville de Nouméa.

27 Loi de Pays n° 2001-017 du 11 janvier 2002 sur le domaine public maritime de la Nouvelle-Calédonie et des provinces

28 Article 4 de la loi de Pays n° 2001-017 du 11 janvier 2002

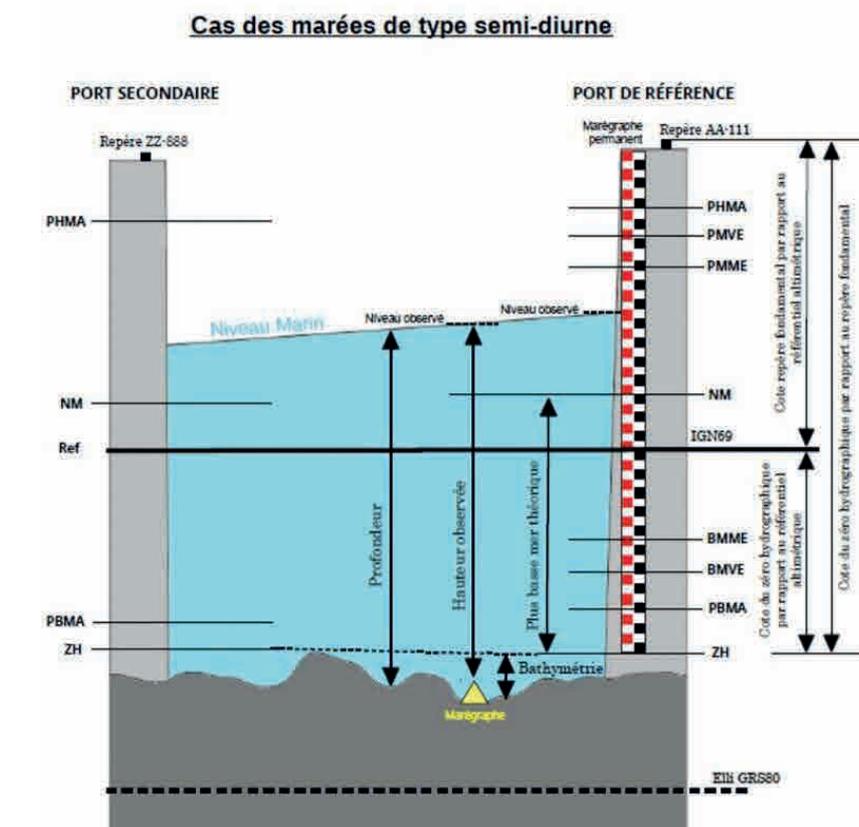


Figure 2. Schéma récapitulatif des niveaux de marée (cas des marées semi-diurnes) et les acronymes associés.

Acronyme français	Description
PHMA	niveau des plus hautes mers astronomiques
PM sup	niveau de la moyenne des plus hautes pleines mers journalières
PMVE	niveau des pleines mers de vives-eaux
PMME	niveau des pleines mers de mortes-eaux
NM	niveau moyen
BMME	niveau des basses mers de mortes-eaux
BMVE	niveau des basses mers de vives-eaux
BM inf	niveau de la moyenne des plus basses mers journalières
PBMA	niveau des plus basses mers astronomiques
ZH	zéro hydrographique

des effets combinés de la marée, de la houle et des courants induits des vents et des processus continentaux (par exemple pluie, ruissellement, etc), ainsi que du déficit des sédiments côtiers²⁹. L'érosion côtière va engendrer "une perte de terrain au profit de la mer. Les plages s'amincissent, les dunes et les falaises reculent"³⁰. Cette avancée de la mer va entraîner un recul du littoral et une avancée de la laisse des plus hautes mers. Le changement climatique est un

29 Chloé Sourisseau, 2019, spéc.p.30, l'auteur cite la définition de l'observatoire de la côte aquitaine de 2016, (consulté le 24/06/2021) disponible à l'adresse suivante : <http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/Les-risques-cotiers-53>

30 De Le Torre Ywenn, Palvadeau Eric, 2017, "Érosion du littoral", Édition Encyclopaedia Universalis, 20 p., spéc.p.9

élément qui aggrave le phénomène, car lié à l'élévation du niveau de la mer³¹. La Nouvelle-Calédonie n'est d'ailleurs pas épargnée par ce phénomène. En effet, les épisodes cycloniques³² ont tendance à accentuer considérablement l'avancée de la mer sur le territoire. Le cyclone Lucas qui a touché la Grande-Terre en février 2021 a notamment fait de gros dégâts au niveau de la plage de l'Anse

31 Ibid, spéc.p.9

32 Pour rappel, un cyclone se compose d'un noyau (œil du cyclone) dans lequel la pression est très basse et d'une zone tout autour dans laquelle la pression est très élevée (dépression). Le cyclone se caractérise notamment par des vents violents, des pluies et une très forte houle

© SHOM, 2020. "Références Altimétriques Maritimes, Ports de France Métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographiques et niveaux caractéristiques de la marée 2020".



Vata³³ (Nouméa). On peut donc avoir une modification au cours du temps de cette laisse des plus hautes mers. Cette avancée va entraîner une translation de la ZPG qui avancera dans les terres. Les provinces de la Nouvelle-Calédonie possèdent donc une bande terrestre du domaine public maritime qui évolue et fluctue avec le temps. Le fait que cette bande ne soit pas fixe provoque une inquiétude chez les propriétaires privés qui se situent au bord de la mer. La partie supérieure de la ZPG fait office de limite entre leurs parcelles et le DPM. Par conséquent, une évolution de cette limite pourrait amputer ces propriétaires d'une partie, voire parfois de l'intégralité de leurs parcelles. La délimitation de la ZPG engendre des conséquences directes sur le droit de propriété des administrés. Il est donc crucial que cette délimitation soit rigoureusement et consciemment effectuée.

Une délimitation du domaine public maritime grâce aux données marégraphiques

■ L'utilisation de données marégraphiques ponctuelles des ports

Le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM)³⁴ met gratuitement à disposition, via sa diffusion de données³⁵, un document qui se nomme le référentiel altimétrique maritime (RAM). Il regroupe des données altimétriques maritimes de plusieurs ports de France métropolitaine et d'Outre-mer. Chaque année, un nouveau RAM est publié avec des données actualisées sur certains ports. Dans ce document, on retrouve un certain nombre de données hydrographiques dont les plus hautes marées astronomiques (PHMA) qui sont définies de la manière suivante par le SHOM.

33 Article du site "demain en Nouvelle-Calédonie" disponible en ligne : <https://www.dnc.nc/lucas-en-trombe/>

34 Décret n° 2007-800 du 11 mai 2007 portant sur la création, organisation et fonctionnement de l'établissement public administratif, Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM)

35 Tanguy Yves-Marie, Responsable du Service hydrographique et océanographique de la marine en Nouvelle-Calédonie, entretien réalisé le 18 mai 2021

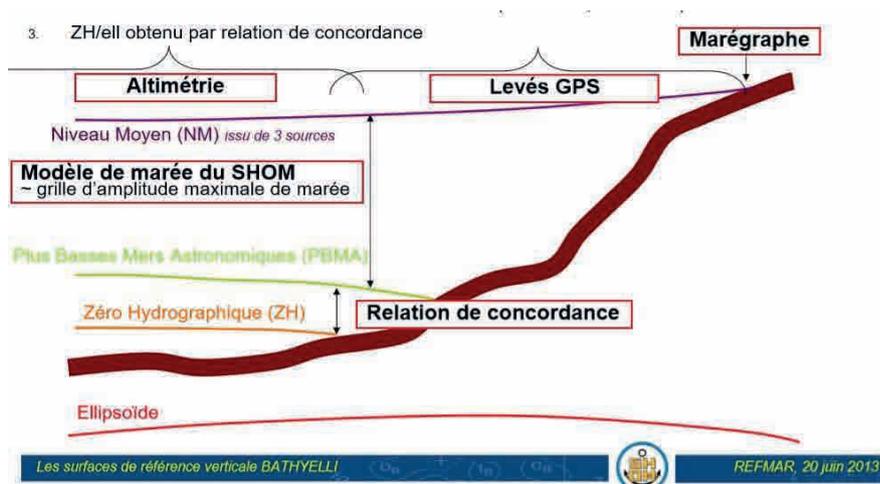


Figure 3. Méthodologie de la création de surfaces.

Le RAM indique une altimétrie des plus hautes marées astronomiques par rapport au zéro hydrographique. Le SHOM définit le zéro hydrographique (ZH) comme étant "le niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires de marée, à partir duquel sont comptées [...] les hauteurs d'eau résultant des calculs de marée. Il permet aux marins de connaître la profondeur d'eau quelle que soit l'amplitude de la marée. C'est l'équivalent en mer, des références d'altitudes pour la terre, portées sur les cartes IGN".³⁶ Sur certains ports de Nouvelle-Calédonie, le RAM indique un rapport entre le NGNC et le zéro hydrographique (ZH). Le NGNC est le nom du référentiel altimétrique en Nouvelle-Calédonie (nivellement général de Nouvelle-Calédonie). Si l'on a en notre possession la cote des PHMA par rapport au ZH et le rattachement du ZH par rapport au NGNC, on peut obtenir la cote altimétrique de la laisse des plus hautes mers en altimétrie locale dans le port concerné. Il est ensuite possible d'acquérir un modèle numérique de terrain³⁷ (MNT) grâce à des acquisitions sur site afin de modéliser le littoral. En croisant ce MNT avec la valeur de la cote altimétrique des PHMA en question, on peut connaître la position dans l'espace de la laisse des plus hautes mers qui sera le point de départ du décompte des 81,2 mètres de la ZPG.

36 Définition disponible au lien suivant : http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/references-de-hauteurs-zero-hydrographique

37 Il s'agit d'une modélisation numérique représentant l'aspect et le relief de la zone

■ Expansion et développement des données marégraphiques grâce à un modèle de marée

Le SHOM produit en France un projet qui s'appelle BathyElli. Ce projet est la modélisation du niveau marin des mers avec un rattachement des marées à l'ellipsoïde. Les niveaux caractéristiques de la mer sont générés par ce type de produit. On retrouve notamment les PHMA et le zéro hydrographique. La modélisation nous permet de passer de données ponctuelles des PHMA à une surface continue (figure 3).

Création d'un modèle de marée globale

La modélisation est possible grâce à trois types de données :

- des données altimétriques en pleines eaux. Il s'agit de données acquises par satellites ;
- des données GPS au large des côtes ;
- des données marégraphiques obtenues dans les ports³⁸.

Grâce à l'ensemble de ces données, le SHOM peut représenter une modélisation du niveau moyen des mers (NM) et des valeurs des plus hautes marées astronomiques. Le niveau moyen des mers suit un géoïde³⁹ marin. Ces données sont rattachées à l'ellipsoïde GRS80 qui est associé aux réalisations de l'ITRS⁴⁰. Plus il y aura de données

38 Pastol Yves, Jan Gwénaële, Tanguy Yves-Marie, 2014, "Les références verticales maritimes en France : Méthodologie de création des surfaces BathyElli", Revue XYZ n° 140, 6 p., spéc.p.2

39 Un géoïde est une représentation des surfaces équipotentielles de référence du champ de pesanteur terrestre

40 ITRS est un système de référence spatial mondial

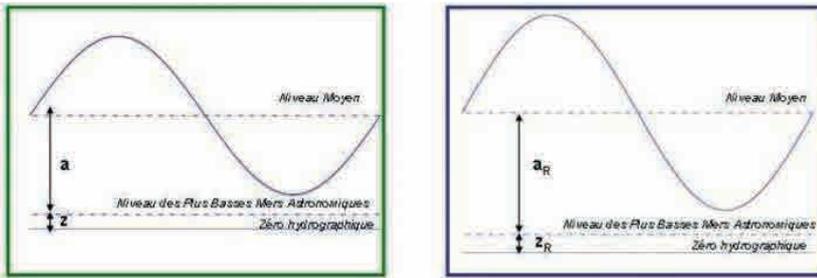


Figure 4. Relation de concordance permettant la détermination du zéro hydrographique.

acquises, plus le modèle sera précis. Les espaces de raccords entre les différents types de données sont estimés par interpolation⁴¹. Un manque d'acquisition d'une des trois sources de données peut amener des trous dans la surface de modélisation par manque d'informations. En effet, un modèle ne peut étendre spatialement de l'information qu'avec une certaine limite sur un rayon de covariance donné. D'après le SHOM, la précision concernant la surface hydrographique référencée à l'ellipsoïde GRS80 est obtenue avec une incertitude théorique de 10 cm. Dans une note synthétique de présentation datant de 2013, Yves-Marie Tanguy, chef de projet BathyElli durant cette période, précisait que les attendus en termes de précision d'une telle modélisation seraient de 15 à 20 cm.⁴²

Les plus hautes et plus basses marées astronomiques ainsi que le niveau moyen des mers sont des données qui sont mesurées. Le zéro hydrographique (ZH) est connu au port grâce aux marégraphes, et sera utilisé dans l'intégralité de la zone de marée. Dans cette zone de marée, on va retrouver une relation de concordance entre les PBMA et le ZH et c'est cette relation qui va permettre de créer la surface ZH par rapport à l'ellipsoïde⁴³ (figure 4).

$$Z = Z_r \frac{a}{a_r}$$

41 Pastol Yves, Jan Gwénaële, Tanguy Yves-Marie, "Les références verticales maritimes en France : Méthodologie de création des surfaces BathyElli", Revue XYZ n° 140, 6 p., spéc.p.3

42 Tanguy Yves-Marie, SHOM, 2013, "Projet BathyElli, Détermination du zéro hydrographique dans l'ITRS", 1.p

43 Tanguy Yves-Marie, SHOM, 2013, Les surfaces de référence verticale BathyElli "Bathymétrie rapportée à l'ellipsoïde",

Un modèle de marée appliqué à l'usage foncier en Nouvelle-Calédonie :

La variation bathymétrique en Nouvelle-Calédonie est faible, cependant les effets lagunaires du territoire peuvent provoquer des effets de marées surprenants "Pour exemple, la Calédonie étant entourée d'une barrière de corail, le vidage de son lagon est comparable à un mécanisme de baignoire qui se viderait tout doucement par les passes, ce qui peut donner lieu à un effet de "tenue de plein" (où la marée haute "dure plus longtemps" que la marée basse).⁴⁴" La surface de modélisation du niveau moyen des mers est corrigée de la marée et de la météo. La dépression (basse pression) et à l'inverse l'anticyclone (haute pression) ont un effet sur le niveau moyen des mers et les plus hautes marées astronomiques. D'après Météo France, une pression moyenne est de 1013 hPa⁴⁵. Pour chaque hecto Pascal supplémentaire à cette pression moyenne, la marée va être environ 1 cm plus basse que celle qui était prévue par le marégraphe⁴⁶. C'est ce que l'on appelle un effet de décote qui est provoqué par la pression sur le niveau de la mer. L'inverse est aussi possible lorsque la pression atmosphérique est plus

20 p., spéc.p.5

44 Tanguy Yves-Marie, Responsable du Service hydrographique et océanographique de la marine en Nouvelle-Calédonie, entretien réalisé le 18 mai 2021

45 D'après Météo France au niveau de la mer, la pression atmosphérique moyenne est de 1013,25 hPa : <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/parametres-observees/pression>

46 Ibid : <http://www.meteofrance.fr/actualites/23212243-grandes-marees-quelle-est-l-influence-des-conditions-meteorologiques>

basse que la moyenne ou qu'il y a de la houle⁴⁷. On sera dans ce cas-là dans une situation de surcote, c'est-à-dire que la marée sera plus haute que ce qu'elle devait être (niveau supposé). Ce niveau supposé est prédit par le marégraphe grâce notamment à une analyse harmonique de la marée et une décomposition fréquentielle. Les effets de surcote et de décote engendrés par les éléments météorologiques ne sont pas pris en compte dans le modèle du SHOM. "Les valeurs PHMA et PBMA sont aussi corrigées de tous éléments météorologiques qui seraient susceptibles d'avoir un effet de surcote ou de décote"⁴⁸.

Cela apporte un nouveau questionnement. La loi stipule qu'un propriétaire peut demander la délimitation du DPM au droit de sa propriété dans le cas où "depuis une délimitation antérieure, des phénomènes naturels non liés à des perturbations météorologiques exceptionnelles ont eu pour effet de modifier le niveau des plus hautes eaux"⁴⁹. La loi ne prend pas en compte les éléments météorologiques exceptionnels, mais les éléments de surcote et de décote sont des éléments naturels. Par conséquent, ils devraient être, au regard de la loi, pris en compte. Lors d'un arrêt du Conseil d'État du 30 juin 1982, la cour précise que les parties du rivage qui ont été couvertes par les flots après une tempête violente, mais non exceptionnelle constituent une dépendance du DPM⁵⁰.

Dans le cadre du modèle de marée et du produit RAM, les éléments météorologiques ne sont pas pris en compte. Il s'agit ici d'une nouvelle piste de réflexion, car ces phénomènes variables peuvent facilement modifier l'altimétrie du niveau des mers de plusieurs centimètres (pouvant aller jusqu'à 10, voire 15 cm).

47 La houle est un phénomène d'ondulation de la surface de la mer (vague) causé par le vent

48 Tanguy Yves-Marie, responsable du Service hydrographique et océanographique de la marine en Nouvelle-Calédonie, entretien réalisé le 18 mai 2021

49 Article 13, Loi de Pays n° 2001-017 du 11 janvier 2001

50 CE, 30 juin 1982, n° 16177



Conclusion

L'objectif de ces travaux était de constater l'adaptation de procédés de délimitation à l'usage foncier de la province. Dans la continuité des améliorations techniques, l'utilisation d'une cote altimétrique de la laisse des plus hautes mers, fournie de manière ponctuelle par le RAM, semble appropriée pour la délimitation. Cependant, la mise en place de la modélisation des niveaux moyens des mers type BathyElli serait une perspective d'avenir encore plus adaptée aux besoins de la collectivité de la province Sud, surtout dans des zones dépourvues de marégraphes.

Ces travaux permettent de mettre en lumière que la délimitation du domaine public maritime en Nouvelle-Calédonie s'effectue avec une constante recherche d'amélioration de la modélisation des éléments naturels. La fluctuation et l'évolution des espaces côtiers sont des enjeux d'actualité avec la thématique du réchauffement climatique et de montées des eaux. Il convient aux collectivités compétentes de tout mettre en œuvre pour visualiser cette évolution afin de prendre conscience des enjeux écologiques qui nous attendent. ●

Contact

Ludovic RUFFENACH
ludovicruffenach@hotmail.fr

Références

Manuels : DE LA TORRE Ywenn, PALVADEAU Eric, 2017, "Érosion du littoral", édition Encyclopaedia Universalis, 20 p.

Thèses : DUMAS Pascal, 2004, "Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie", thèse soutenue à l'université d'Orléans, 402 p.

Revue scientifique :

- BENETEAU Jocelyn, 2020, "FASC 130-70 : Nouvelle-Calédonie", JurisClasseur Propriétés publiques, 50 p.
- PASTOL Yves, JAN Gwénaële, TANGUY Yves-Marie, 2014, "Les références

verticales maritimes en France : Méthodologie de création des surfaces BATHYELLI", Revue XYZ n° 140, 6 p.

- PITOISSET Anne, 2011, "Les 3 Provinces de la Nouvelle-Calédonie", Revue maison de la Nouvelle-Calédonie, 30 p.

Mémoires :

- SOURISSEAU Chloé, 2019, "L'érosion côtière : élément de persuasion des communes vers un chemin plus durable", Institut d'urbanisme et d'aménagement régional d'Aix-en-Provence (IUAR), Aix Marseille Université, 184 p.

Publications institutionnelles :

- Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie, ministère de l'Agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt, CLEMENT Denis et MORIN Georges-André, 2015, "Les 50 pas géométriques naturels des outre-mer. Préservation de la biodiversité et maîtrise foncière", 124 p.

Documents Techniques

- Service hydrographique et océanographique de la marine, 2020, "Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, Cotes du zéro hydrographiques et niveaux caractéristiques de la marée 2020", 120 p.
- TANGUY Yves-Marie, SHOM, 2013, "Les surfaces de référence verticale BathyElli "Bathymétrie rapportée à l'ellipsoïde"", 20 p.
- TANGUY Yves-Marie, SHOM, 2013, "Projet BathyElli, détermination du zéro hydrographique dans l'ITRS", 1 p.

Textes législatifs et réglementaires :

- Lois :**
- Loi n° 99-209 organique du 19 mars 1999 relative à la Nouvelle-Calédonie.
 - Loi de Pays n° 2001-017 du 11 janvier 2002 sur le domaine public maritime de la Nouvelle-Calédonie et des Provinces.
- Décrets :**
- Décret du 18 juin 1890 relatif à l'abandon au profit du domaine communal des terrains compris sur les pas géométriques dans le périmètre de la ville de Nouméa.
 - Décret du 27 juillet 1930 relatif au déclassement des parcelles de la zone des pas géométriques en Nouvelle-Calédonie.

- Décret n°2007-800 du 11 mai 2007 portant sur la création, organisation et fonctionnement de l'établissement public administratif Servicehydrographique et océanographique de la marine (SHOM).

Arrêtés :

- Gouverneur de la Nouvelle-Calédonie, 1855, arrêté n° 48
- Gouverneur de la Nouvelle-Calédonie, 1867, arrêté n° 122

Circulaires :

- Direction du foncier et de l'aménagement de la province Sud, Analyse foncière, 2013, "Statut des terrains situés dans une bande littorale de 81,20 m de large, au vu de la loi organique".

Jurisprudence : CE, 30 juin 1982, n° 16177.

Entretiens : Tanguy Yves-Marie, Responsable du Service hydrographique et océanographique de la marine en Nouvelle-Calédonie, entretien réalisé le 18 mai 2021.

ABSTRACT

Keywords: Coastline, public maritime domain, geometric step zone, delimitation.

The public maritime domain in New Calédonia consists of a terrestrial strip, managed by the southern province, of 266.4 ft which starts from the highest sea mark. The delimitation of this imprescriptible and inalienable zone is ephemeral because of the natural fluctuation of the sea mark. This delimitation will directly impact the owners of the contiguous plots. It is therefore appropriate to apply, among the methods used in metropolitan France and in the french overseas territories, the most appropriate scientific method for carrying out this task.

Estimation *a priori* de l'incertitude altimétrique des positionnements GNSS en RTK ou en statique post-traité : existe-t-il un modèle ?

■ Thomas TOUZÉ

Avec un pareil titre, est-il nécessaire d'écrire un court article ? Peut-être est-il utile, malgré tout, que je précise un peu plus nos besoins à DTG sur ce point. En effet, je soupçonne que nous ne soyons pas les seuls à en souffrir.

Au sein du service de topographie de DTG (Division technique générale) à EDF, nous sommes principalement amenés à employer ces deux modes de positionnement GNSS dans les contextes suivants :

- statique post-traité sur des sessions de 12 h (en général) pour la détermination de nouveaux points de référence sur nos ouvrages ;
- RTK local ou avec un service national de N-RTK pour les levés topographiques ou bathymétriques.

Les barrages ayant fortement tendance à se trouver en moyenne ou haute montagne, la densité de stations permanentes se réduit, ce qui augmente les longueurs et dénivelées des lignes de base, tant pour le statique que pour le N-RTK. Comme la grande majorité des topographes, nous savons que l'incertitude altimétrique que nous pouvons espérer est centimétrique, qu'elle se dégrade avec la longueur et la dénivelée, que la configuration géométrique influe, ainsi que les conditions de la troposphère.

Mais selon les valeurs de ces différents paramètres, quelle incertitude pouvons-nous espérer obtenir ? 2 cm, 5 cm ou 10 cm (selon un intervalle de confiance à 95 %, soit à 2 sigmas) ? L'ordre de grandeur reste à peu de chose près le même, mais d'un point de vue opérationnel, cela change complètement les analyses possibles avec les données acquises. Certes, nous n'avons pas toujours besoin d'atteindre la meilleure incertitude, en revanche nous avons toujours besoin de connaître celle que nous obtenons afin de donner leur juste poids aux données que nous traitons.

Les instruments, lors des levés RTK, ou les logiciels, lors des post-traitements, fournissent des indicateurs de précision qui quantifient la dispersion des points au cours de la session d'enregistrement, mais ceux-ci ne nous informent pas ou peu du biais de la mesure, de sa justesse (au sens du BIPM). Pour illustrer ce biais de mesure, voici deux exemples.

1. Nous avons testé en temps réel pendant plusieurs heures l'écart de positionnement RTK d'un bateau par rapport à une station locale à moins de 5 km et par rapport à un service national de N-RTK dont la station la plus proche était à 20 km

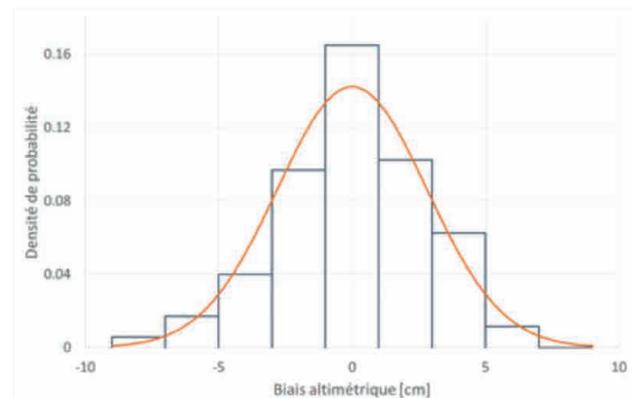


Figure 1. Histogramme des biais de positionnement altimétrique déduit de l'analyse des zones stables de 88 bathymétries.

(et 1 000 m de dénivelée). Le premier jour, nous avons 1 cm d'écart moyen, le lendemain, dans des conditions météorologiques similaires, 10 cm.

2. Sur une centrale nucléaire contrôlée mensuellement depuis 2014, l'analyse des zones stables déduites statistiquement de 88 bathymétries (avec un positionnement N-RTK dont la station la plus proche est à 22 km et 10 m de dénivelée), nous calculons un biais de positionnement altimétrique GNSS centré en 0 et d'écart-type 2.8 cm.

Nous aimerions ainsi disposer d'un abaque ou d'une formule permettant de déduire, selon les caractéristiques principales de nos lignes de base (longueur, dénivelée, durée, DOP), les intervalles de confiance dans lesquels leurs incertitudes (justesses et fidélités combinées) devraient se trouver.

J'ai sans doute insuffisamment parcouru la bibliographie, je ne suis donc pas parvenu à trouver réponse à cette question. Et ma maîtrise limitée du positionnement GNSS m'empêche de dire si ce sujet serait dimensionné pour une thèse de master ou une thèse de doctorat. Ce dont je suis certain, c'est de l'intérêt concret du résultat pour tous les professionnels.

Peut-être, chère communauté, connaissez-vous l'ouvrage qui répondrait à cette attente ? Chères écoles d'ingénieur, est-ce que cela vous semble un travail digne d'intérêt ? Je suis à votre disposition pour en parler. ●

Contact

Thomas Touzé, EDF Hydro / DTG
thomas.touze@edf.fr

Les hauteurs d'eau mesurées au marégraphe de Marseille

Alain COULOMB

Le marégraphe de Marseille n'est pas seulement un monument historique aux qualités patrimoniales reconnues. C'est aussi, et peut-être surtout, un observatoire scientifique moderne, intégré aux programmes nationaux et internationaux de surveillance du niveau des mers. Les données qu'il produit participent à la compréhension et au suivi de l'un des nombreux effets des changements climatiques : la hausse très rapide du niveau moyen des mers.

MOTS-CLÉS
Observatoire, mesure, niveau de la mer, changements climatiques

Le marégraphe de Marseille est implanté à moins de 3 kilomètres du Vieux-Port et de son célèbre bar de la Marine. Par bonheur, ses gestionnaires n'ont jamais été sensibles aux recommandations de César et de Fanny qui, dans la trilogie de Marcel Pagnol, écrivaient à Marius, embarqué sur La Malaisie : *"laisse un peu mesurer les autres"*.

Le marégraphe de Marseille appartient à l'État qui, par convention et pour des raisons historiques (parce qu'il a été construit pour fixer l'origine des altitudes françaises continentales, l'altitude zéro), en confie la gestion à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

Le marégraphe de Marseille est unique pour de multiples raisons, détaillées

sur le site internet de l'association "Les amis du marégraphe de Marseille"¹. Il est à la fois un monument historique et un observatoire moderne, intégré aux programmes nationaux et internationaux de surveillance du niveau des mers. Les données qu'il produit participent à la compréhension et au suivi de l'un des nombreux effets des changements climatiques : la hausse très rapide du niveau moyen des mers (figure 1).

Les données de hauteur d'eau produites par les marégraphe sont complémentaires de celles produites par l'altimétrie satellitaire, technique aujourd'hui au centre de l'activité océanographique.

¹ <https://amis-maregraphe-marseille.fr/>. L'AFT est membre de cette association et figure dans son conseil d'administration

Pour mémoire, cette technique est fondée sur la mesure de la hauteur instantanée de la mer à l'aide d'un radar embarqué sur un satellite artificiel².

La longueur et la qualité de la série de Marseille

La série de hauteurs d'eau fournie par le marégraphe de Marseille est très longue (137 ans d'observations, pratiquement sans interruption³). Cette série est également l'une des plus cohérentes (très peu de changements d'appareils, pratiquement pas de changements dans l'environnement des mesures, etc.). Pour ces raisons, le marégraphe de Marseille est intégré au réseau GLOSS (*Global sea level observing system*)⁴, réseau mondial de marégraphe destiné à étudier le niveau des mers.

Le site internet du *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL), témoigne de la qualité de la série de hauteurs d'eau produite à Marseille en affichant : *"Completeness = 97%"*⁵. Ce critère indique que depuis 1885, le marégraphe de Marseille a fonctionné correctement pendant 97 % du temps, ce qui est tout à fait exceptionnel et remarquable.

La longueur et la qualité des séries produites à Marseille (le seul marégraphe géré par l'IGN) et à Brest

² Pour en savoir plus, se reporter par exemple au site internet du CNES : <https://cnes.fr/un-peu-de-vulgarisation-lalimétrie>

³ Avec seulement trois périodes de pannes ou de mauvais fonctionnements durables, en 1951-52, en 1997-98 et en 2010. En 1951, par exemple, l'installation du flotteur métallique d'un marégraphe de type Brillié à côté du flotteur en cuivre du marégraphe totalisateur, a créé un courant galvanique qui a faussé les résultats des mesures jusqu'à ce que les deux flotteurs soient recouverts de matière plastique en 1952

⁴ <https://gloss-sealevel.org/>

⁵ <https://psmsl.org/data/obtaining/stations/61.php>

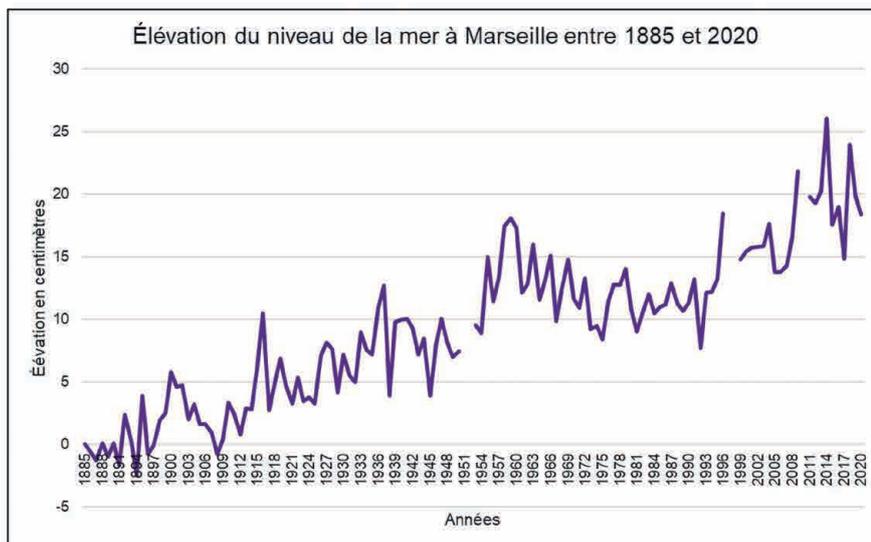


Figure 1. Courbe de l'élévation du niveau moyen de la mer à Marseille entre 1885 et 2020.

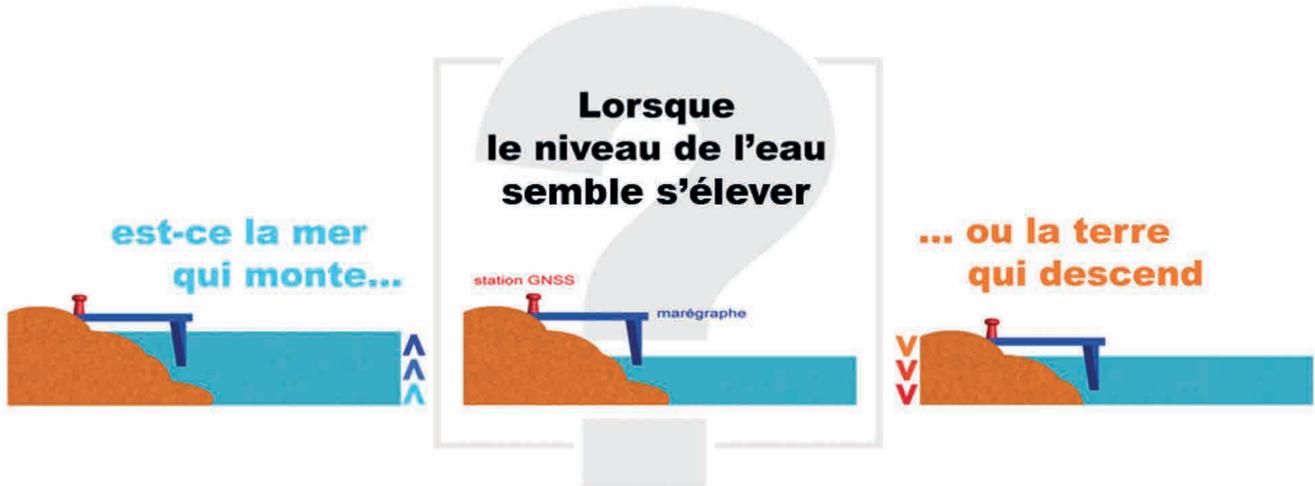


Figure 2. Image publiée sur le compte Instagram de l'association "Les amis du marégraphe de Marseille" le 13 février 2022.

(marégraphe géré par le Service hydrographique et océanographique de la marine [SHOM] seront des éléments d'appréciation très importants des candidatures récentes de ces deux observatoires à une reconnaissance officielle par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) comme "stations terrestres d'observation maritime centenaires".

Les données produites au marégraphe de Marseille

Les données de hauteur d'eau produites à Marseille sont librement accessibles à tous. Elles sont diffusées sur les sites internet de plusieurs organismes.

Les niveaux moyens mensuels et annuels, de 1885 à nos jours, peuvent être téléchargés à partir du site internet du PSMSL⁶. Ces niveaux proviennent de plusieurs sources (totalisateur du marégraphe mécanique, marégrammes⁷, marégraphes numériques⁸). Les hauteurs du niveau de la mer disponibles sur le site internet de SONEL (Système d'observation des variations du niveau de la mer à long terme, anciennement Système d'obser-

vation du niveau des eaux littorales⁹), coordonné depuis l'université de La Rochelle, sont : des niveaux moyens journaliers de la mer obtenus à partir de la numérisation des marégrammes ; et des niveaux moyens de la mer (mensuels et annuels), qui contribuent à la banque de données mondiale du PSMSL.

Les données produites par les marégraphes numériques de Marseille peuvent être téléchargées à partir du portail data.shom.fr¹⁰ qui permet plus généralement l'accès à toute l'information géographique, maritime et littorale de référence, et qui contribue lui-aussi à alimenter la banque de données du PSMSL.

L'IGN diffuse également des données produites à l'observatoire de Marseille : celles fournies par la station GNSS permanente implantée au marégraphe, qui peuvent être téléchargées à partir du site internet du RGP¹¹.

Les marégraphes de Marseille (mécanique et numérique) mesurent le niveau de la mer par rapport à des repères matériels implantés à l'intérieur des bâtiments. Quand le résultat de ces mesures donne une valeur qui diminue avec le temps, la question qu'il convient de se poser est : que mesure-t-on, une hausse du niveau de la mer, un tassement du point de référence, ou une combinaison de ces deux

phénomènes ? Les informations transmises par les satellites GNSS peuvent répondre à ces questions.

Les séries longues d'observations GNSS, établies au moyen de stations permanentes associées avec les marégraphes, donnent une information sur le mouvement absolu du sol, les marégraphes sur les mouvements de la mer relatifs au sol, la combinaison des deux permettant de comprendre le comportement réel du niveau de la mer à l'endroit considéré¹².

L'élévation du niveau moyen de la mer à Marseille

La courbe établie à partir des moyennes mensuelles diffusées par le PSMSL entre février 1885 et décembre 2020 (figure 1) montre les trois périodes de mauvais fonctionnement évoquées plus haut. Elle montre également une élévation du niveau moyen de la mer à Marseille d'environ 18 centimètres¹³ (figure 3).

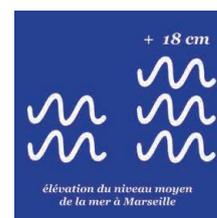


Figure 3. Image publiée sur le compte Instagram de l'association "Les amis du marégraphe de Marseille" le 19 mars 2022.

6 <https://psmsl.org/data/obtaining/rlr.monthly.data/61.rlrdata>

7 On appelle "marégramme" les rouleaux d'enregistrement graphique de la courbe de hauteurs d'eau en fonction du temps.

8 Un premier marégraphe numérique fonctionnant grâce à des ondes acoustiques avait été installé en 1998 ; depuis 2009, il est remplacé par un autre appareil faisant appel à des ondes radar.

9 <https://www.sonel.org/>

10 <https://data.shom.fr/>

11 <http://rgp.ign.fr/>

12 Voir la publication du 13 février 2022 sur <https://www.instagram.com/amis.maregraphe/?hl=fr>

13 Voir la publication du 19 mars 2022 sur <https://www.instagram.com/amis.maregraphe/?hl=fr>

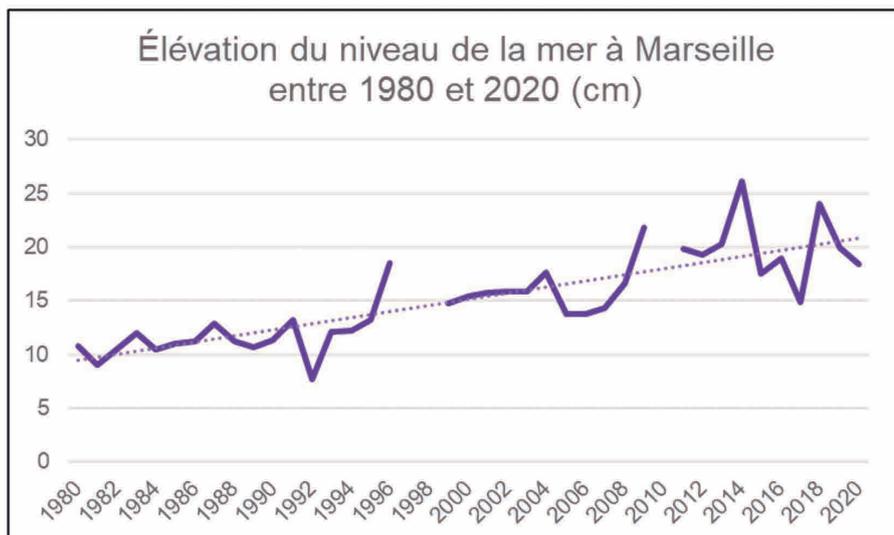


Figure 4. Courbe de l'élévation du niveau moyen de la mer à Marseille entre 1980 et 2020.

Si l'on répartissait ces 18 centimètres sur l'ensemble de la période de mesure, cela correspondrait à une vitesse moyenne d'élévation légèrement supérieure à 1,2 mm/an. Mais cette valeur n'aurait qu'un intérêt comparatif, car l'élévation du niveau de la mer n'est pas régulière.

Cette élévation est de plus en plus rapide. Ceci est montré, par exemple, par une publication de Guy Wöppelmann citée en bibliographie. Cette accélération est également montrée en considérant les mêmes moyennes mensuelles diffusées par le PSMSL uniquement sur les 40 dernières années¹⁴ (figure 4). La courbe passe d'une hauteur d'eau d'environ 9 centimètres à une hauteur d'environ 21 cm. La différence (12 cm), divisée par 40, donne une élévation de 3 mm/an, qui est plus de deux fois supérieure au 1,2 mm/an évoqué plus haut. Cette tendance est cohérente avec l'élévation donnée au niveau mondial par l'altimétrie satellitaire qui indique qu'entre 1993 et 2012, le niveau moyen global de la mer s'est élevé d'environ 3,2 mm/an¹⁵. Parfois, des visiteurs du marégraphe de Marseille émettent l'idée que : "quelques millimètres par an, ce n'est pas grand-chose". Qu'ils se détrompent, d'après le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernement-

14 Cette durée de 40 ans est celle qui est la plus communément admise par les scientifiques pour obtenir une tendance robuste et fiable

15 http://www.legos.obs-mip.fr/zmi/TEST/equipes/echos/themes-de-recherche/copy_of_niveau_mer



Figure 5. Image publiée sur le compte Instagram de l'association "Les amis du marégraphe de Marseille" le 13 avril 2022. Jean Jouzel est membre d'honneur de cette association.

tal sur l'évolution du climat), l'élévation du niveau de la mer pourrait directement menacer plus d'un milliard de personnes d'ici 2050.

Il y a urgence à agir et à s'adapter. C'est notamment ce qu'essayent d'expliquer, avec leurs modestes moyens et avec beaucoup d'autres intervenants, les amis du marégraphe de Marseille¹⁶ (figure 5). ●

Le marégraphe sera ouvert pour les Journées du Patrimoine les 17 et 18 septembre 2022.

Contact

Alain COULOMB - président de l'association
Les amis du marégraphe de Marseille
amis.maregraphe@gmail.com

16 Voir la publication du 13 avril 2022 sur <https://www.instagram.com/amis.maregraphe/?hl=fr>

Bibliographie

VINCENT Robert - *Il y a 100 ans, le marégraphe de Marseille* - XYZ n° 73, décembre 1997.

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille : patrimoine et modernité* - XYZ n° 118, mars 2009

WOPPELMANN Guy, MARCOS Marta, COULOMB Alain, MARTIN-MIGUEZ Belen, BONNETAIN Paul, BOUCHER Claude, GRAVELLE Médéric, SIMON Bernard et TIPHANEAU Pascal - *Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849-1851* - Journal of geodesy - September 2014

COULOMB Alain - *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* - livre de 640 pages publié en 2014 aux Presses des Ponts (l'AFT est coéditeur¹⁷). XYZ n° 141, décembre 2014 : annonce relative à la parution du livre ci-dessus

COULOMB Alain : *Le marégraphe de Marseille* - article mis en ligne le 11 janvier 2021 sur le site internet du Bureau des longitudes : <http://bdl.ahp-numerique.fr/focus-instruments-ac-maregraphe-marseille>

COULOMB Alain - *Les amis du marégraphe de Marseille* - XYZ n° 166, mars 2021

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille : mesure, patrimoine, climat* - revue numérique e-Phaïstos mise en ligne le 27 avril 2021

COULOMB Alain - *Le marégraphe de Marseille et son patrimoine culturel* - revue numérique La Gazette, organe du projet "Patrimoine maritime en Méditerranée". Pour lire cet article, voir la réalisation du 20 janvier 2022 sur la page https://amis-maregraphe-marseille.fr/?page_id=213

17 <https://www.aftopo.org/boutique/>

ABSTRACT

The Marseilles tide gauge is not only a historic monument with recognized heritage qualities. It is also, and perhaps most importantly, a modern scientific observatory, integrated with national and international sea level monitoring programmes. The data it produces contribute to the understanding and monitoring of one of the many effects of climate change: the very rapid mean sea level rise.

Prototypage, analyse et qualification d'une solution de photogrammétrie mobile

■ Guillaume NIEDERBERGER

La photogrammétrie terrestre et statique permet d'effectuer des relevés topographiques de manière rapide et relativement précise. Si l'on ajoute à cela des capteurs tels qu'un GNSS et une centrale inertielle permettant le géoréférencement direct des images, alors on obtient un système de photogrammétrie qui peut s'affranchir de points d'appui. L'avantage d'un tel système est principalement le gain de temps. Ce projet de développement consiste à utiliser une caméra omnidirectionnelle, un GNSS temps réel, une centrale inertielle et un ordinateur de bord. Ce dernier permet de synchroniser les données de navigation et ainsi de garantir une précision des nuages de points de 10 cm en 3D. Le support sur lequel sont fixés tous ces éléments permet une interopérabilité d'utilisations. Il va principalement servir de "backpack", notamment pour effectuer des récolements de réseaux en fouille ouverte en garantissant de la classe A, ou des relevés de corps de rue entrant dans le programme PCRS de l'IGN. Il est aussi possible de réaliser des relevés de cubatures ou d'effectuer des compléments de photogrammétrie aérienne dont il manquerait des données.

■ MOTS-CLÉS

Photogrammétrie mobile, cartographie mobile, positionnement mobile, positionnement 3D, prototypage, programmation.

pour cartographier les forêts brésiliennes. Les résultats prometteurs de ce travail permettent de comprendre quels sont les enjeux à relever pour obtenir des précisions suffisantes pour la topographie. En effet, on s'aperçoit à travers ces résultats que l'utilisation d'une antenne GNSS coûtant moins de 100 € ne permet pas d'obtenir une telle exactitude dans le géoréférencement. La notion de bas coût est subjective, car dans le cas de ce projet, l'antenne GNSS utilisée coûte 1 800 €, ce qui est bien plus élevé qu'une antenne Ublox NEO6M, mais bien inférieur à une antenne Leica ou Trimble de 20 000 €.

L'objectif de ce travail est finalement de réussir à créer un système mobile capable de réaliser de la photogrammétrie automatiquement géoréférencée. Cela signifie de s'affranchir, autant que possible, des points d'appui généralement utilisés pour le géoréférencement. Nous verrons donc dans une première partie la réalisation du prototype, puis dans une deuxième, l'analyse des résultats obtenus avec celui-ci.

Création du système de photogrammétrie mobile

■ Matériel utilisé

Caméra Ricoh Theta Z1

La caméra omnidirectionnelle utilisée pour ce projet est une caméra de la marque Ricoh. Utiliser une telle caméra présente un avantage par rapport à une caméra classique : l'angle de champ est bien supérieur, ce qui permet de photographier intégralement la scène. Cela permet d'acquérir plus de données et d'éviter les oublis sur le terrain.

Le modèle Theta Z1 est le meilleur de la gamme Theta. Son prix est de 1 000 €, elle dispose d'un capteur

Introduction

La photogrammétrie terrestre permet d'effectuer des relevés topographiques de manière rapide et relativement précise. Si l'on ajoute à cela des capteurs permettant le géoréférencement direct des images alors on obtient un système de photogrammétrie qui peut s'affranchir de points d'appui. L'avantage d'un tel système est principalement le gain de temps. Celui-ci n'est cependant pas simple à obtenir, car de nombreux paramètres sont à prendre en considération lors de l'élaboration du prototype.

Les systèmes mobiles et terrestres de cartographie présentent l'avantage de réaliser des relevés précis en un temps restreint. Ils sont généralement utilisés en complément des systèmes aéroportés puisqu'ils permettent de cartographier ce que ces derniers ne peuvent pas voir (les façades par exemple). Les grandes marques de matériel topographique ont vite

compris qu'il s'agissait d'un nouveau marché. Ainsi, plusieurs systèmes sont apparus très rapidement. Parmi eux, on peut citer le *backpack Pegasus* de Leica, la gamme ZEB de Geoslam, la gamme *Heron Lite* de Gexcel ou encore le *backpack Trekker* de Google. Sur chacun de ces appareils sont embarqués une multitude de capteurs tels que : un GNSS, un laser scanner, des appareils photographiques, une centrale inertielle et un ordinateur de bord. L'avantage d'avoir autant d'instruments regroupés en un seul système est que la précision finale sera centimétrique. Néanmoins, ces appareils sont très onéreux, ce qui rend le produit final très peu accessible aux entreprises de géomètres topographes. Quelques récents projets de recherche ont mis en avant l'utilisation de matériel à prix raisonnable (< 5 000 €). On peut citer le travail de [Campos et al., 2018] sur la réalisation d'un backpack utilisant une caméra omnidirectionnelle, un GNSS et une centrale inertielle à bas coûts



CMOS de 1 pouce et de 20Mp ce qui lui permet d'acquérir des images 4K de 3840 x 1920 pixels. La fréquence d'acquisition en mode vidéo est de 30 images par seconde. Le fonctionnement d'une telle caméra se base sur la jonction de deux clichés issus de lentilles *fisheyes* adossées l'une à l'autre. Chacune d'elles forme une image hémisphérique. Ainsi, après fusion des deux images, une image à 360° est obtenue.

L'objectif étant de faire de la photogrammétrie avec la caméra, les images sphériques ne sont pas idéales, car cela ajoute de nombreuses inconnues sur le modèle de projection optique. Or, en photogrammétrie, il est important de connaître le maximum d'informations sur la géométrie des images. La fusion des deux images opère directement après la prise de vue (format .RAW en sortie), il n'est donc pas possible d'obtenir un fichier .jpeg contenant les images brutes (c'est-à-dire deux images *fisheyes*). Cette problématique a contraint l'utilisation de la caméra en mode vidéo. En effet, contrairement aux images, les vidéos ne sont pas automatiquement *stitchées*, ce qui permet de récupérer les images *fisheyes* et non les images sphériques (*figure 1*). De plus, le traitement des images (qui s'effectue via un micro-logiciel interne à la caméra) dure environ 4 secondes. Cela fixe un laps de temps entre chaque image bien trop important pour une utilisation en mode mobile. La vidéo permet ainsi de pallier ces deux problématiques.

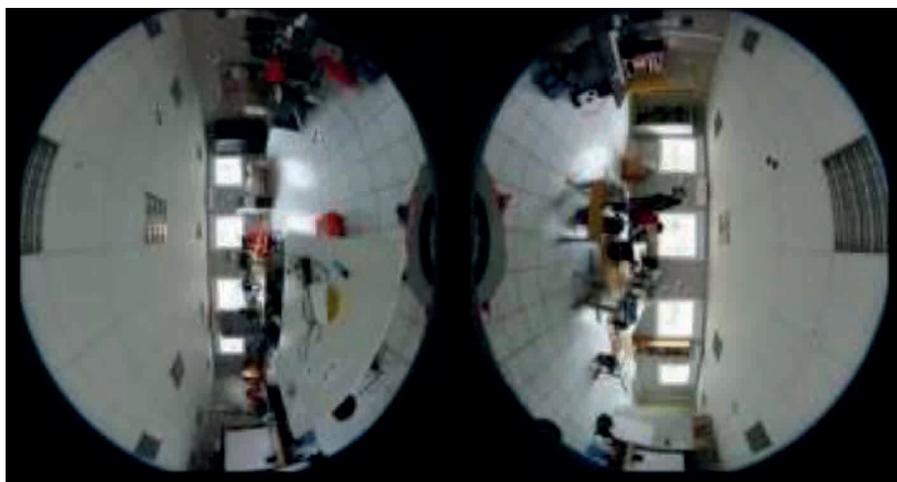


Figure 1. Fichier obtenu en mode vidéo.

Emlid Reach RS2 et Centrale Inertielle Phidget 1044

Pour géoréférencer les images prises par la caméra Ricoh Theta Z1, il est nécessaire d'intégrer une antenne GNSS ainsi qu'une station inertielle. Le choix des instruments a été fait suivant plusieurs critères : la précision, l'encombrement et le prix. Pour le GNSS, c'est l'antenne Emlid Reach RS2 qui a répondu à toutes ces exigences. Elle permet d'effectuer des relevés en NRTK ou RTK ce qui est un élément important pour le projet, car cela évite tout post-traitement des données. La précision fournie par le constructeur est :

RTK	
Horizontal	Vertical
7 mm + 1 ppm	14 mm + 1 ppm

Table 1. Précisions de l'Emlid Reach RS2.
source : www.emlid.com

$\Delta E(m)$	$\Delta N(m)$	$\Delta H(m)$
0.0028	-0.0106	0.0032

Table 2. Résultats de la comparaison Emlid/Leica.

L'antenne GNSS a été testée en comparant les coordonnées obtenues en NRTK moyenné sur trois points avec celles obtenues par une antenne Leica GS18, dont la précision est deux fois meilleure. Les résultats obtenus prouvent que cette antenne est suffisamment fiable pour être utilisée en NRTK. La centrale inertielle est un élément indispensable pour le bon fonctionnement du système. En effet, elle permet d'apporter des données nécessaires au positionnement des caméras dans

l'espace. En ce sens, elle fait partie, avec le GNSS, du système de navigation du produit. Elle a quant à elle été étalonnée via le logiciel du constructeur avant son utilisation. Son prix est de 100 €.

Raspberry Pi 4

Le système doit nécessairement avoir un ordinateur de bord pour pouvoir collecter et fusionner les données des différents appareils présentés précédemment. L'utilisation d'un nano-ordinateur s'est alors imposée. Dans le but de répondre au critère de coût du développement, le Raspberry Pi 4 a été choisi pour cette fonction. En plus d'être peu onéreux, il est très performant (8Go de RAM) et rassemble une large communauté d'utilisateurs.

Ce nano-ordinateur fonctionne grâce à une batterie externe, il consomme très peu d'énergie (5V, 3A), ce qui donne une grande autonomie au système.

■ Étalonnages et programmes d'acquisition et de post-traitement

Programme d'acquisition des données et détermination des constantes

Un aspect très important du projet est l'acquisition des données du GNSS et de l'IMU. Le premier permet d'obtenir une position géographique précise au centimètre avec une fréquence de 1Hz (sous forme de trame NMEA), tandis que l'IMU peut calculer une orientation (lacet, tangage, roulis) avec une fréquence variant de 1Hz à 250Hz. Un programme Python permet de faire le lien entre le GNSS et l'IMU via une connexion Bluetooth pour le GNSS et USB pour la centrale inertielle pour synchroniser les données. Ce dernier point est très important, car plus la synchronisation est précise, plus le résultat final (le géoréférencement du nuage de points) le sera. Le schéma suivant montre les images géoréférencées (rouges) toutes les secondes.

Le choix des méthodes de transmission des données à l'ordinateur de bord a été une problématique importante du projet. Par exemple, le GNSS Emlid Reach RS2 dispose de quatre protocoles de transfert de données (USB-C, Radio, RS-232 et Bluetooth) or, ils ne sont pas tous aussi faciles à intégrer



au Raspberry Pi. Le port USB-C par exemple semblait être le moyen le plus efficace de prime abord, seulement il s'est avéré que la transmission des données fonctionnait, mais que l'antenne activait automatiquement la charge de sa batterie, ce qui causait un dysfonctionnement du Raspberry Pi qui, rappelons-le, est alimenté uniquement par du 5V et 3A.

Celui-ci a été paramétré pour lancer le programme d'acquisition dès son démarrage. Ainsi, les mesures de navigation sont enregistrées en permanence à partir de la mise sous tension de l'ordinateur. La lecture des trames NMEA se fait ensuite automatiquement lors de leur réception, de même pour les données IMU. Elles sont enregistrées directement sur une clé USB branchée à celui-ci. À la fin du levé, deux fichiers sont créés, l'un contient les angles d'orientation et l'autre les coordonnées géographiques de l'antenne.

Ces dernières sont évidemment corrigées d'un bras de levier. En effet, les coordonnées sont calculées par rapport au centre de phase de l'antenne GNSS et non pas au sommet de prise de vue des images (ce qui est souhaité).

Pour cela, il est nécessaire de calculer le vecteur qui sépare le centre de phase de la caméra. Plusieurs techniques sont possibles pour réaliser cela, notamment directe ou indirecte. La mesure directe consiste à mesurer physiquement la différence alors que l'indirecte consiste à l'estimer suivant différentes méthodes. Comme il est difficile de calculer directe-

ment le vecteur (nécessité d'avoir un pied à coulisse très précis), le choix a été fait d'utiliser la méthode indirecte par cibles. Cela nécessite un mur d'éta-lonnage constitué d'une quinzaine de points géoréférencés. Des mesures photogrammétriques et des mesures GNSS sont réalisées en parallèle. Après avoir ajusté les caméras en pointant chaque cible manuellement sur un logiciel de photogrammétrie, on obtient les coordonnées des sommets de prise de vue. Par la même occasion, des mesures sont effectuées avec la centrale inertielle ce qui permet de déterminer la rotation entre les systèmes propres à la caméra et à la centrale inertielle. Comme pour le GNSS, il est nécessaire de connaître la rotation entre ces deux systèmes pour pouvoir l'appliquer aux données de l'IMU et ainsi obtenir des images orientées et géoréférencées.

Une fois déterminées avec précision, ces valeurs vont être intégrées automatiquement lors du traitement sur le logiciel de photogrammétrie Metashape.

Logiciel de post-traitement

La phase terrain terminée, le traitement de la vidéo s'effectue via le logiciel sur lequel un programme Python a été implémenté. Le traitement s'effectue selon l'ordre suivant :

Comme nous avons pu le voir, la synchronisation temporelle entre les différents instruments est nécessaire pour obtenir une précision suffisante pour la topographie.

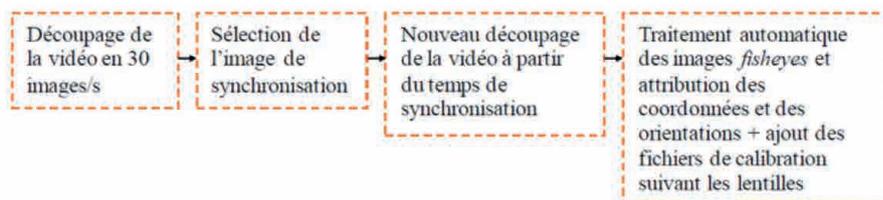
Prenons par exemple un décalage de temps de 0,5 seconde. Si on considère une vitesse de marche de 1,4 m/s, alors l'erreur produite par ce décalage

temporel sera de 0,7 m. Cette erreur n'est certainement pas acceptable pour un usage professionnel du prototype. La problématique a fait l'objet de nombreuses recherches et d'essais, notamment pour réussir à connecter directement la caméra Ricoh Theta au Raspberry Pi. Malheureusement, cela n'a pas pu être effectué faute de temps. Des développements sont en cours pour cette partie.

Il a fallu néanmoins trouver une solution temporaire permettant de synchroniser les images aux données de navigation. Pour effectuer cela, une idée a été de filmer une horloge synchronisée avec le temps de ces données. La trame NMEA fournit le temps GPS à chaque réception, donc il suffisait de filmer une horloge GPS pour ainsi caler les images aux coordonnées et angles. Une montre connectée aux satellites du système GPS a été utilisée pour ceci.

Analyse du prototype

Une des attentes les plus importantes du projet était la précision qu'il est possible d'obtenir avec le système de photogrammétrie. En effet, obtenir des données quant à la précision du système constitue l'ultime objectif du développement. Pour cela, une scène identique à un chantier classique de plan de corps de rue a été utilisée. Une quinzaine de points de contrôle ont été calculés par tachéométrie dans le but de contrôler la qualité du géoréférencement du nuage de points. La zone à lever mesure environ 80 m, les points sont répartis de manière homogène tout le long du parcours effectué. Ainsi, grâce aux 14 points de contrôle répartis sur l'ensemble de la zone, on peut facilement déterminer la précision du géoréférencement. Sans utiliser aucun point d'appui, on obtient un écart moyen quadratique de 0,104 m en trois dimensions, ce qui est assez satisfaisant pour un premier prototype. En effet, cela permet d'effectuer un relevé en





classe A (suivant la réforme DT-DICT). Il faut toutefois rester vigilant car il s'agit d'un cas idéal où la couverture GNSS est bonne tout le long du trajet. Il faut donc par précaution utiliser quelques points d'appui pour assurer un relevé suffisamment précis.

La qualité des nuages de points est quant à elle variable suivant l'exposition de la scène. En effet, un environnement trop sombre engendre souvent une mauvaise reconstruction 3D tout comme une surexposition. Un défaut des lentilles *fisheyes* est qu'elles sont souvent gênées par la présence du soleil (effet de contre-jour marqué) ce qui rend parfois la reconstruction délicate. Néanmoins, les tests réalisés sur des luminaires publics montrent qu'il est possible de les cartographier, car on distingue suffisamment les éléments importants (pied, sommet, câble).

Une étude sur les ressources matérielles et humaines mises en œuvre avec ce prototype a été faite. En comparaison avec une mission topographique "classique", on retrouve des ressources matérielles similaires ; les besoins humains sont quant à eux limités à une seule personne puisqu'une intervention ne nécessite pas d'opérateur ou technicien supplémentaire si ce n'est que l'intervenant. La vitesse de levé est très rapide avec le prototype, car elle est comparable à une vitesse de marche classique. On peut donc imaginer pouvoir effectuer des relevés de grande ampleur en un court laps de temps.

Conclusion

Ce mémoire porte sur la réalisation d'un prototype de photogrammétrie mobile composé d'une caméra 360. Des expérimentations ont été effectuées sur le système dans le but de qualifier la pertinence de son utilisation pour des travaux tels que le récolement réseaux, la détection de lignes aériennes ou le calcul de cubatures. La première étape de l'étude consistait à étudier indépendamment chaque instrument de mesure : la caméra 360, le GNSS NRTK et la centrale inertielle. Ce travail a notamment permis de qualifier la qualité des mesures de navigation (GNSS et IMU) et de calibrer la caméra 360.

Suite à cela, une phase de développement du support a été mise en place dans le but de respecter des critères de légèreté, de maniabilité et de solidité. Le résultat obtenu est plutôt satisfaisant pour l'usage actuel du prototype. Il fera bien évidemment l'objet de développements futurs, notamment pour accroître son interopérabilité.

L'intégration des données a constitué une tâche relativement longue dans le projet, car il s'agissait de créer un algorithme permettant de fusionner deux types de données : des données de navigation (GNSS et IMU) et de cartographie (vidéos 360). Le travail a été axé principalement sur l'intégration des données de navigation tandis que les vidéos fournies par la caméra ont été traitées de manière séparée. Cela est dû à un manque de temps pour finaliser un algorithme aussi complet. Néanmoins, le système fonctionne avec cette méthode. Des améliorations seront apportées au programme d'acquisition de données dans les mois prochains, notamment pour accroître le nombre de données issues de la centrale inertielle, d'améliorer la précision de la synchronisation entre les données GNSS et IMU ou encore d'apporter une précision supplémentaire au temps UTC (milliseconde).

Un des avantages du système est qu'il est entièrement mobile. Cela est possible grâce à l'ajout d'un Raspberry Pi 4 faisant office d'ordinateur de bord. Une partie du travail a consisté à paramétrer cet ordinateur de bord pour qu'il puisse fonctionner en autonomie ; c'est-à-dire en alimentation et en fonctionnement. Cet ordinateur puissant et peu onéreux a été la pierre angulaire du projet. Enfin, une étude qualitative du système a été effectuée ce qui a permis de définir la précision sur les nuages de points de quelques centimètres. Cela est encourageant, notamment du fait que les précisions sont assez proches de celles obtenues par les systèmes vendus dans le commerce et dont les prix sont vingt à trente fois plus élevés. Finalement, ce travail de développement aura permis de créer un prototype utilisable avec très peu de points d'appui ce qui réduit le temps passé sur le terrain. Les évolutions technologiques

futures permettront certainement de pallier le problème de latence entre les images sphériques (4 à 8 s) ce qui évitera par la suite, d'utiliser la vidéo et donc de perdre en qualité d'image. Si les photos peuvent être prises avec un intervalle de temps inférieur à une seconde alors la photogrammétrie sera grandement améliorée, ce qui impactera directement la précision relative des nuages de points. Le prototype de photogrammétrie mobile représente donc une solution intéressante pour l'entreprise GeoProcess et pourra être utilisée en complément des autres instruments de mesure. Il permet d'acquérir de nombreuses données géoréférencées, et ce en un temps restreint. Un des objectifs serait de pouvoir utiliser ce système dans différentes configurations et différents transports : pédestre, mobilité douce (vélo ou trottinette) et voiture. ●

Contact

Guillaume Niederberger

guillaume-niederberger@outlook.fr

ABSTRACT

The terrestrial and static photogrammetry allows to carry out topographic surveys in a fast and relatively precise way. If we add to this GNSS and inertial sensors allowing direct georeferencing of the images, we obtain a photogrammetry system that can do without support points. The advantage of such a system is mainly the time saving. This development project consists in using an omnidirectional camera, a real time GNSS, an inertial unit and an onboard computer. The latter allows to synchronize the navigation data and thus to guarantee a precision of the point clouds of 10cm in 3D. The support on which all these elements are fixed allows an interoperability of uses. It will mainly be used as a "backpack", in particular to carry out surveys of networks in open excavation guaranteeing class A, or surveys of street bodies entering the PCRS program of the IGN. It is also possible to carry out surveys of cubatures or to carry out complements of aerial photogrammetry of which it would miss data.

La déviation de la verticale, mal-aimée de la géodésie

■ Thomas TOUZÉ

L'instrumentation traditionnelle du topographe est liée au champ de pesanteur terrestre. En effet, lorsque nous verticalisons une canne ou une mire, ou lorsque nous mettons en station un tachéomètre ou un niveau, de fait, nous nous appuyons sur la direction de la verticale locale pour orienter nos instruments ou nos réflecteurs, c'est-à-dire sur la direction de la pesanteur. De la même façon, mais de manière plus discrète car bien enfouie dans les équations et les logiciels, les systèmes de mesures cinématiques requérant des gyroscopes ou, plus généralement, des centrales inertielles ou d'attitude utilisent le champ de pesanteur pour leurs orientations. La difficulté réside dans le fait qu'en dehors de l'altitude, les autres coordonnées globales que nous manipulons généralement sont indépendantes du champ de pesanteur : coordonnées Est et Nord projetées, longitude, latitude, hauteur ellipsoïdale ou encore coordonnées cartésiennes géocentriques sont toutes indépendantes de la pesanteur¹. C'est une autre affaire pour les systèmes locaux de coordonnées dont nous ne parlerons pas aujourd'hui.

MOTS-CLÉS

Déviation de la verticale, techniques terrestres de la géodésie

verrons notamment que même dans une basique réduction des distances à l'ellipsoïde, elle peut être significative. Enfin, nous parlerons des différentes façons de la déterminer.

De quoi s'agit-il ?

Tout part de la pesanteur locale : prenez un fil à plomb ou faites tomber un objet, la direction matérialisée par le premier ou suivie par le second est celle de la pesanteur. Si vous définissez le vecteur unitaire directeur de cet axe pointant vers le zénith, vous obtenez la verticale locale. Cette direction est orthonormale au plan horizontal local. Soit dit en passant, ce plan est la tangente à la surface équipotentielle de pesanteur.

Alors, lorsque nous calons la nivelle torique en mettant en station un tachéomètre ou un niveau, nous matérialisons ce plan horizontal. Ainsi, une fois mis en

Le topographe a donc besoin d'outils pour traiter ses mesures liées à la pesanteur afin d'obtenir des coordonnées exactes liées à l'ellipsoïde. Parmi ces outils, le plus connu est la cote du géoïde, fournie sous la forme d'une grille de conversion altimétrique et qui permet, avec succès et la plupart du temps avec une incertitude centimétrique, de passer des hauteurs ellipsoïdales aux altitudes et vice-versa. Il en existe d'autres qui sont nécessaires dans certains contextes afin d'éviter de petits biais évitables. Nous parlerons ainsi des longitudes et latitudes astronomiques desquelles découle notre mal-aimée, la déviation de la verticale.

L'objectif de cet article est de contribuer à réhabiliter ce paramètre géodésique. En effet, la déviation de la verticale est mal-connue, peu employée. Certes, comme nous le verrons, son application engendre rarement des améliorations plus grandes que quelques centimètres, mais ces cas peuvent survenir. Pour les détecter, il est nécessaire de connaître et comprendre un minimum ce paramètre.

¹ Il existe tout de même un lien au sens où l'ellipsoïde doit correspondre à une régression régionale ou globale du géoïde

Dans cet article, nous allons brièvement définir la déviation de la verticale, donner quelques exemples où elle devrait être prise en compte, avec les ordres de grandeur associés. Nous

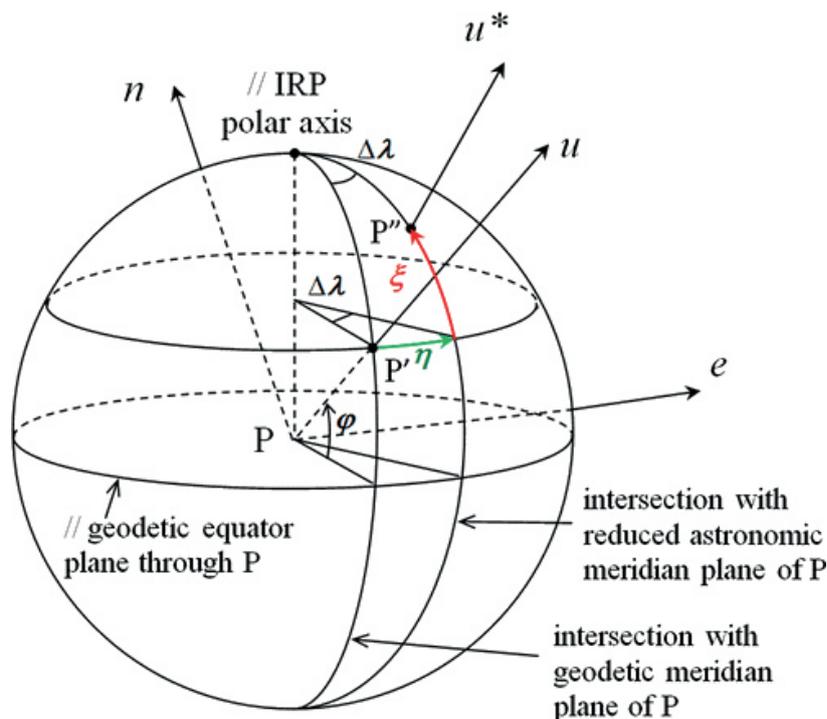


Figure 1. Schéma de la déviation de la verticale comme étant l'écart angulaire entre la normale à l'ellipsoïde u et la verticale locale u^* [1].



station, si l'appareil est bien réglé, son axe principal coïncide avec la verticale locale.

Ces faits peuvent paraître évidents, néanmoins il nous a paru important de les rappeler, car l'objet de cet article se ramène à la connaissance de la verticale locale dans les différents systèmes de coordonnées sur lesquels nous nous appuyons dans notre travail. Par ces exemples, nous espérons convaincre que la verticale est une chose concrète. Prenons la *figure 1*, issue de [1], ainsi qu'un point P défini sur l'ellipsoïde par ses coordonnées géographiques (longitude λ , latitude ϕ et hauteur ellipsoïdale h). Le vecteur directeur u de la normale à l'ellipsoïde en ce point peut s'exprimer dans le repère cartésien géocentrique par la formule suivante [2], dans laquelle TRF désigne le repère cartésien géocentrique.

$$\vec{u}|_{TRF} = \begin{bmatrix} \cos \lambda \cos \varphi \\ \sin \lambda \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Sur la *figure 1*, l'observateur verra la direction de la normale à l'ellipsoïde intersecter une sphère unitaire centrée sur lui au point P'. Du fait des ondulations du champ de pesanteur, la normale à ce champ en P, c'est-à-dire la verticale locale, n'est pas égale à la normale à l'ellipsoïde. Le vecteur de la verticale locale, u^* en *figure 1*, intersecte la sphère unitaire au point P''. Ce vecteur peut s'exprimer dans le repère cartésien géocentrique en imaginant qu'il existe une longitude Λ et une latitude Φ telles que :

$$\vec{u}^*|_{TRF} = \begin{bmatrix} \cos \Lambda \cos \Phi \\ \sin \Lambda \cos \Phi \\ \sin \Phi \end{bmatrix}$$

Λ et Φ sont appelées respectivement, longitude et latitude astronomique. Le qualificatif d'astronomique, contre-intuitif désormais, s'explique par des raisons historiques. En effet, si vous déduisez votre longitude et votre latitude par des mesures angulaires astrogéodésiques, du fait que votre instrument soit connecté à la pesanteur par la mise en station, ce sont ces valeurs-là que vous obtiendrez.

À ce stade nous recommandons fortement aux lectrices et lecteurs de cet article de se plonger ou replonger dans l'exceptionnel chapitre 5 du cours de géodésie de Françoise &

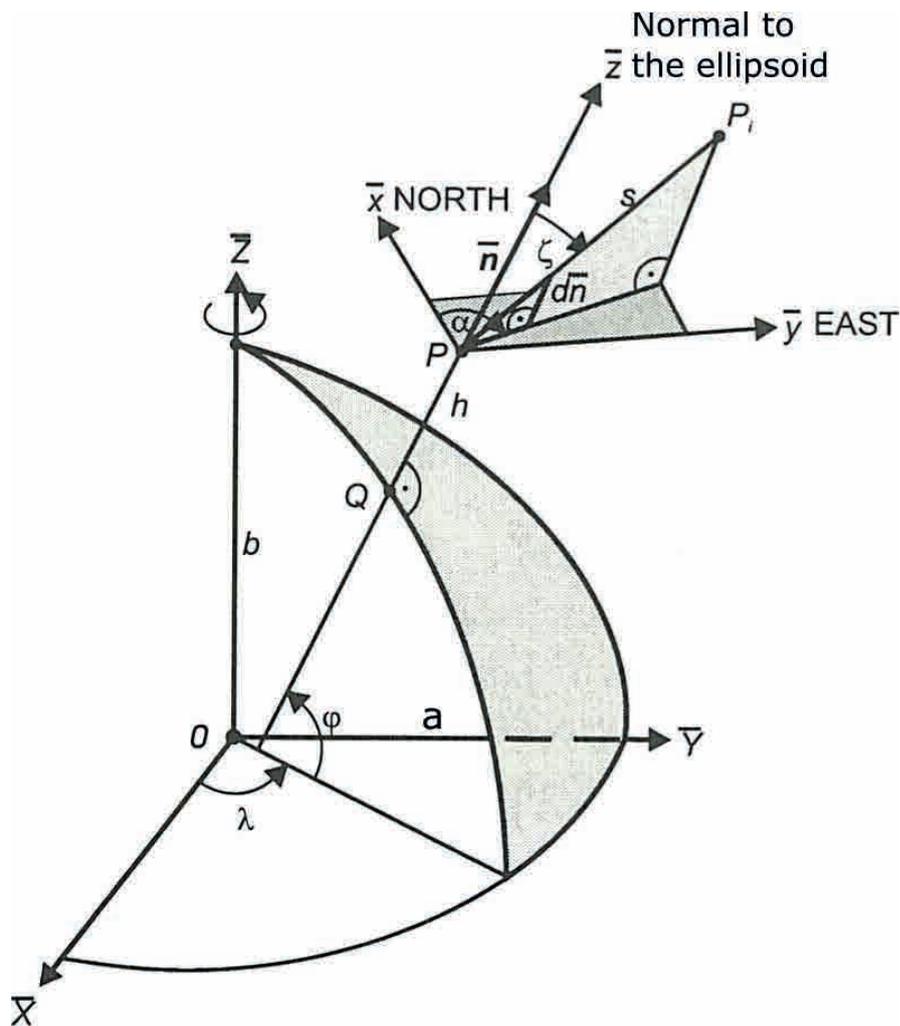


Figure 2. Le repère local géodésique au point P.

Henri Duquenne [2] intitulé "Techniques terrestres de la géodésie". Ce chapitre contient les définitions et les démonstrations des affirmations qui vont suivre dans cette section.

Tout d'abord, nous avons besoin d'introduire les repères locaux géodésiques et astronomiques :

- le repère local géodésique (RLG) en P (voir *figure 2*) est composé des trois vecteurs formant une base orthonormée directe : l'Est géodésique, tangent au parallèle en P, le Nord géodésique, tangent au méridien en P et la normale u à l'ellipsoïde. Il existe une matrice de changement de repère C_{LGF}^{TRF} permettant de transformer un vecteur exprimé dans le RLG pour le définir dans le TRF. Cette matrice est une matrice de rotation qui s'exprime en fonction de la longitude λ et de la latitude ϕ (voir la transposée de cette matrice dans [2] Chap. 5 formule 7) ;

- de la même manière, le repère local astronomique (RLA) en P est composé de trois vecteurs tangents ou normaux à l'équipotentielle de pesanteur en P pointant vers l'Est astronomique, le Nord astronomique et la verticale locale. La transformation du RLA vers le TRF peut donc elle aussi s'exprimer en fonction des longitudes et latitudes astronomiques Λ et Φ ([2] Chap. 5 formule 16). Un tachéomètre mis en station, à son orientation près, mesure dans le RLA.

$$C_{RLG}^{TRF} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & -\cos \lambda \sin \varphi & \cos \lambda \cos \varphi \\ \cos \lambda & -\sin \lambda \sin \varphi & \sin \lambda \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix}$$

$$C_{RLA}^{TRF} = \begin{bmatrix} -\sin \Lambda & -\cos \Lambda \sin \Phi & \cos \Lambda \cos \Phi \\ \cos \Lambda & -\sin \Lambda \sin \Phi & \sin \Lambda \cos \Phi \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \end{bmatrix}$$

Il est donc possible d'obtenir la matrice de changement de repère pour passer du RLA au RLG :

$$C_{RLA}^{RLG} = C_{TRF}^{RLG} C_{RLA}^{TRF} = (C_{RLG}^{TRF})^{-1} C_{RLA}^{TRF}$$

source image : Torge, Geodesy 3rd edition



Cette matrice s'exprime en fonction de λ , ϕ , Λ et Φ . Son expression, un peu effrayante il faut bien l'admettre, se trouve dans ([2] Chap. 5 formule 19). Par définition des repères locaux géodésiques et astronomiques, nous pouvons écrire :

$$\vec{u}|_{RLG} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{u}^*|_{RLA} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

La verticale locale u^* peut donc être exprimée dans le repère local géodésique, lié à l'ellipsoïde, de la manière suivante :

$$\vec{u}^*|_{RLG} = C_{RLA}^{RLG} \vec{u}^*|_{RLA}$$

Ce qui donne [2] :

$$\vec{u}^*|_{RLG} = \begin{bmatrix} \eta \\ \xi \\ \zeta \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \eta \approx (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \\ \xi \approx \Phi - \varphi \\ \zeta \approx 1 \end{cases}$$

Les paramètres η (êta) et ξ (xi) sont les composantes Est et Nord de la déviation de la verticale. Ce sont des termes proches de zéro qui caractérisent les écarts vers l'Est et le Nord géographiques de la verticale locale par rapport à la normale à l'ellipsoïde. Telle que définie précédemment, la déviation de la verticale s'exprime comme un vecteur unitaire dont η et ξ sont deux des trois composantes.

Souvent ces deux paramètres sont exprimés sous la forme d'angles (tels qu'en figure 1) en microradians ou en secondes d'arc. L'ordre de grandeur, en France métropolitaine, de ces composantes est la dizaine de secondes d'arc soit environ 50 μrad .

La matrice de changement de repère du RLA au RLG peut également s'exprimer en fonction de ces composantes ainsi que de la latitude. L'expression linéarisée de cette matrice est :

$$C_{RLA}^{RLG} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\eta \tan \varphi & \eta \\ \eta \tan \varphi & 1 & \xi \\ -\eta & -\xi & 1 \end{bmatrix}$$

Il est possible, naturellement, d'exprimer de manière rigoureuse cette matrice afin, notamment, de conserver son orthogonalité.

Enfin, si nous imaginons une visée dans un plan vertical d'azimut α , en figure 3, il est possible de calculer l'expression θ de la déviation de la verticale selon l'azimut α . Cela correspond à la différence entre l'angle zénithal ζ^* mesuré avec un tachéomètre, par rapport à la verticale, et l'angle zénithal géodésique

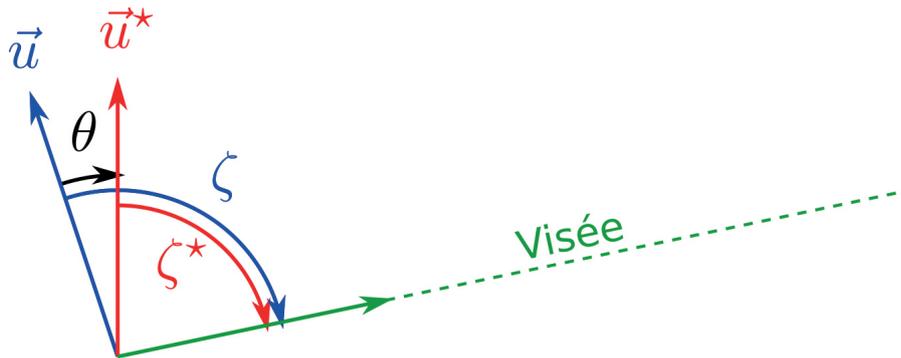


Figure 3. Déviation de la verticale dans le plan vertical d'une visée. ζ^* est ici l'angle zénithal mesuré (sans réfraction).

ζ , par rapport à la normale à l'ellipsoïde.

On a ([2] chap. 5 formule 34) :

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

Exemple d'un levé LiDAR

Prenons un premier exemple d'un levé LiDAR aéroporté mesurant un point P à la surface de la Terre. Soit C, le centre de la Terre, G le centre de phase du GNSS et L le centre optique du LiDAR, nous pouvons écrire la relation de Chasles reliant ces différents points :

$$\vec{CP} = \vec{CG} + \vec{GL} + \vec{LP}$$

En introduisant nos repères connus TRF, RLG, RLA, mais également le repère I de la centrale d'attitude et L du LiDAR, obtenons l'équation de géolocalisation du point P :

$$P|_{TRF} = G|_{TRF} + C_{RLG}^{TRF} C_{RLA}^{RLG} C_I^{RLA} (\vec{GL}|_I + C_L^I \vec{LP}|_L)$$

Dans cette formule, nous avons les mesures :

- les coordonnées de G correspondant aux mesures GNSS, desquelles découle C_{RLG}^{TRF} ;
- le vecteur $LP|_L$ correspondant aux mesures LiDAR dans leur repère propre L ;
- la matrice de changement de repère C_I^{RLA} pour la rotation selon les trois angles mesurés par la centrale d'attitude.

Pour les paramètres de calibration, nous avons :

- le vecteur $GL|_I$ correspondant au bras de levier du LiDAR ;
- la matrice d'alignement (boresight) du LiDAR C_L^I .

Par la physique, les angles fournis par la centrale d'attitude nous amènent dans le repère local astronomique. Or, à notre connaissance, la rotation du RLA au repère local géodésique est toujours négligée et remplacée par la matrice identité. Regardons les conséquences que cette simplification engendre pour un levé aéroporté à la hauteur H au-dessus du sol et de largeur de fauchée F.

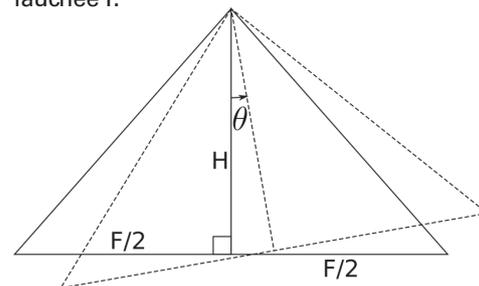


Figure 4. Schéma de l'effet de la non-prise en compte de la déviation de la verticale sur un levé LiDAR aéroporté.

Cette situation est illustrée en figure 4 où les pointillés indiquent le levé non corrigé de la déviation de la verticale dans le plan de la mesure. On peut y distinguer l'erreur altimétrique au nadir ϵ_n et celle en bout de fauchée ϵ_f . Par la trigonométrie sur cette figure, nous pouvons déduire que :

$$\epsilon_n = \frac{H \theta^2}{2} \quad \text{et} \quad \epsilon_f = \frac{H \theta^2}{2} + \frac{F \theta}{2}$$

Si nous imaginons un vol fait à H = 500 m et une ouverture à 45°, c'est-à-dire F = 1 km, alors, pour une déviation de la verticale de 10", soit 50 μrad , l'erreur altimétrique au nadir est négligeable, inférieure à 1 μm , tandis qu'en bout de fauchée, elle atteint 2.5 cm.



► C'est un biais indépendant du sens du vol. Ainsi, si on imagine deux fauchées parallèles sans recouvrement, nous constaterons une marche de 5 cm entre les deux nuages de points associés.

Nous lisons parfois en LiDAR des articles rédigés par des entreprises rigoureuses et compétentes, maîtrisant parfaitement les problématiques de calibration, dans lesquels elles ont toujours besoin de faire du *strip adjustment* afin que les fauchées se recouvrent effectivement. Si les questions inertielles, de positionnement et de calibration sont maîtrisées, qu'est-ce qui peut expliquer ces problèmes de recouvrement ? Les seules explications que nous supposons sont la réfraction et la déviation de la verticale.

Exemple de la réduction des distances à l'ellipsoïde

Prenons maintenant un cas de figure qui est très connu, et bien que contenant quelques pièges, comme nous allons le montrer, nous mènera également à une nouvelle façon de mesurer la déviation de la verticale : la réduction des distances à l'ellipsoïde.

Si on mesure la distance D entre les points A et B , de hauteurs ellipsoïdales respectives h_A et h_B , et que le rayon de courbure de l'ellipsoïde selon l'azimut de la mesure est noté R , nous pouvons déduire de la loi des cosinus dans les triangles ACB et $A'CB'$ l'expression de la corde d'ellipsoïde c :

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

Dans laquelle Δh est la différence de hauteur ellipsoïdale de A à B . L'étude du triangle $A'CB'$ nous permet alors d'exprimer la longueur de l'arc d'ellipsoïde l en fonction de la corde c :

$$l = 2R \operatorname{asin} \frac{c}{2R}$$

Il n'y a pas grand-chose à dire sur cette méthode de réduction qui est précise et rigoureuse, tant qu'il s'agit bien des hauteurs ellipsoïdales et non des altitudes.

Une autre méthode existe. Soit β l'angle au centre de courbure de l'ellipsoïde C . Nous pouvons remarquer, d'une part que : $l = R\beta$

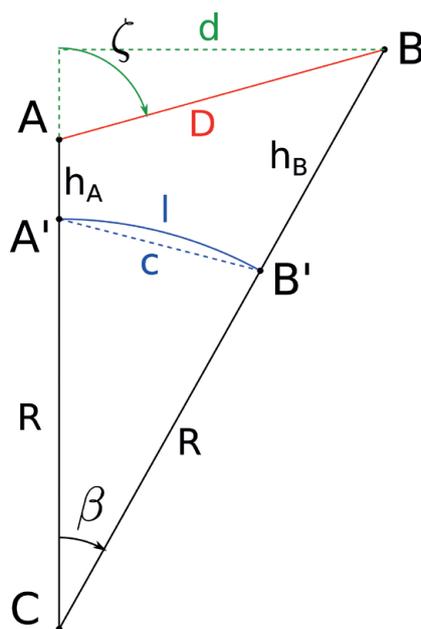


Figure 5. Schéma général de la réduction des distances à l'ellipsoïde.

Et d'autre part que :

$$\sin \beta = \frac{d}{R + h_B} \approx \beta$$

avec $d = D \sin \zeta$ la distance horizontale.

D'où la formule de réduction suivante :

$$l = \frac{d}{1 + \frac{h_B}{R}}$$

Nous lisons sur cette formule beaucoup de bêtises avant tout du fait d'une confusion sur le terme h_B .

Il s'agit obligatoirement de la hauteur ellipsoïdale au point visé. Pour s'en convaincre, il suffit d'étudier le sinus de l'angle β en figure 5. Or, nous lisons souvent qu'il faut utiliser l'altitude de la station ou l'altitude moyenne des deux points.

Nous ne jetons pas la pierre, puisque nous n'avons cessé de commettre cette erreur que depuis quelques années. Par paresse, nous n'avons jamais jugé bon de revoir les fondements de cette méthode de réduction des distances, présente dans de nombreux cours de topométrie de manière imprécise.

La deuxième erreur est plus subtile. Quelle est la distance d appliquée dans cette formule ? Sur la figure 5, c'est l'ellipsoïde qui est schématisé. Ainsi, l'axe CA correspond à la direction normale à l'ellipsoïde. L'angle ζ est donc ici l'angle zénithal géodésique et la distance d est la distance horizontale géodésique.

Si nous reprenons nos notations en figure 3, l'angle zénithal ζ^* que nous mesurons au tachéomètre diffère de ζ de la composante θ de la déviation de la verticale dans le plan vertical de la visée. Soit $d^* = D \sin \zeta^*$, la vraie distance horizontale et θ la déviation de la verticale dans le plan de la visée de A à B , nous pouvons démontrer que :

$$l = \frac{d^* (1 + \theta \cot \zeta^*)}{1 + \frac{h_B}{R}}$$

Ainsi, la réduction des distances horizontales mesurées sur le terrain à l'ellipsoïde fait intervenir la déviation de la verticale. Le résultat est aussi exact et précis qu'avec la méthode basée sur uniquement les hauteurs ellipsoïdales.

De cette formule, nous constatons, du fait de la cotangente, que l'effet de la déviation de la verticale est nulle pour des visées proches de l'horizontale. Le calcul est par contre singulier pour des visées proches de la verticale. Mais dans ce contexte, la distance horizontale perd sa pertinence.

Le tableau suivant nous donne la valeur de ce terme correctif pour une distance horizontale d^* de 100 m et une déviation de la verticale de $10''$. Nous voyons que les effets ne sont significatifs que pour les visées très inclinées.

ζ^* [deg]	$d^* \theta \cot \zeta^*$ [mm]
15	18.0
30	8.4
45	4.8
60	2.8
75	1.3
90	0.0

Une conséquence inattendue

Désormais, nous disposons de deux manières d'exprimer la longueur de l'arc d'ellipsoïde en faisant intervenir h_A , h_B et D , d'une part, ou h_B , D (ou d^*) et ζ^* . En exploitant l'égalité entre ces deux modèles, quelques lignes de calcul permettent d'obtenir la formule suivante :

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

Ainsi, en combinant les techniques terrestres de la géodésie, par la mesure de ζ^* , et spatiales, par les différences



de hauteurs ellipsoïdales Δh au GNSS, il est possible de déduire la déviation de la verticale selon le plan vertical de la visée. La distance D peut être déterminée selon les deux techniques. En faisant cette opération selon plusieurs plans de visées, d'azimuts différents, il serait alors possible d'en déduire η et ξ , les composantes Est et Nord de la déviation de la verticale.

Nous n'avons pas encore eu le temps d'analyser les dérivées partielles de cette formule pour savoir dans quelles conditions une précision de 1" pouvait être atteinte, ni de l'éprouver sur le terrain. Il est clair, cependant, que les angles zénithaux devront être corrigés de la réfraction, ce qui implique l'emploi de visées réciproques simultanées.

Détermination de la déviation de la verticale

Nous connaissons deux méthodes permettant d'obtenir la déviation de la verticale.

La première consiste simplement à déterminer la pente du géoïde. C'est un calcul très simple qui permet de déduire la déviation de la verticale au niveau du géoïde, ce qui est mieux que rien. Cependant, il ne faut pas oublier le non-parallélisme des surfaces équipotentielles de pesanteur. La conséquence de cela est que la déviation de la verticale n'est pas constante avec l'altitude, autrement dit, un fil à plomb ne forme pas exactement une droite euclidienne. La manière la plus rigoureuse consiste à appliquer les méthodes astrogéodésiques. En effet, par des observations angulaires datées soigneusement (voir [2] chap. 2), il est possible de déduire les longitudes et latitudes astronomiques. Connaissant, par GNSS, les longitudes et latitudes géodésiques, nous pouvons déduire, à l'aide des formules fournies précédemment, les composantes Est et Nord de la déviation de la verticale. Sur cette méthode, l'école polytechnique fédérale de Zürich (ETHZ) a développé il y a quelques années le système QDaedalus adaptable à des tachéomètres robotisés (en démontant le réticule) et connecté à un ordinateur. Ce système (hardware et software) dont le coût est de l'ordre de 10 k€, permet

de convertir l'instrument en photothéodolite avec datation GNSS. Son logiciel est équipé d'un module très efficace de détermination de la déviation de la verticale permettant d'obtenir des incertitudes de 0.5 à 1".

Conclusion

L'avènement des techniques spatiales de la géodésie, notamment le GNSS, a rendu l'ellipsoïde mesurable avec une grande précision. Mais les techniques terrestres, connectées à la pesanteur, n'ont pas pour autant disparu. Cette coexistence actuelle rend d'autant plus nécessaire la maîtrise des liens profonds entre l'ellipsoïde et les surfaces équipotentielles de pesanteur. Si les topographes d'aujourd'hui sont au point sur le premier de ces liens qu'est la cote du géoïde, il reste du travail pour qu'ils s'emparent du second qu'est la déviation de la verticale.

Le fait, en France, d'employer un ellipsoïde global plutôt qu'un ellipsoïde local moyennant sur le territoire national le géoïde, augmente les valeurs quantitatives de ces liens.

Après avoir défini cette déviation, nous avons pu montrer que sa non-prise en compte dans un levé LiDAR aéroporté pouvait engendrer des incohérences centimétriques dans les zones de recouvrement des fauchées. Nous avons pu également montrer dans quelle mesure ce paramètre intervenait dans la réduction des distances à l'ellipsoïde. Pour le premier exemple du LiDAR, nous considérons, vu les incertitudes centimétriques obtenues aujourd'hui, qu'il est indispensable d'en tenir compte. Pour la réduction des distances, la prise en compte de la déviation de la verticale n'a d'intérêt que pour les visées très inclinées.

De ce dernier exemple, nous avons déduit une nouvelle manière de déterminer la déviation de la verticale à partir de mesures tachéométriques et GNSS. Cela n'a aucunement vocation à remplacer la manière la plus précise et élégante qui soit pour mesurer la déviation de la verticale, en l'occurrence l'astrogéodésie. Cette nouvelle manière a le mérite de pouvoir être déterminée sans aucune instrumentation spéciale.

Enfin, nous espérons que cet article contribuera à faire prendre conscience que la déviation de la verticale n'est pas un paramètre abstrait qui n'intéresse que les spécialistes, engendrant des corrections négligeables. Elle peut être significative et sa maîtrise contribue à comprendre les liens profonds entre les techniques terrestres et spatiales de la géodésie. En effet, la cote du géoïde ne suffit pas à tout expliquer.

Bibliographie

- [1] On deflection of the vertical components and their transformations, Tomás Soler, Jen-Yu Han et Neil D. Weston, Journal of surveying engineering, volume 140 issue 2, mai 2014
[2] Cours de géodésie, Françoise Duquenne et Henri Duquenne, ESGT, 2003

Contact

Thomas TOUZÉ
thomas.touze@edf.fr

ABSTRACT

Nowadays, the land surveyors are using both spatial and terrestrial techniques of geodesy with, on the one hand GNSS and, on the other hand levelling systems and total stations. One can see the difference between those techniques as being gravity dependent or not. Similarly, we are using coordinates that also are gravity dependent or not, such as the projected easting and northing (independent) or altitude (strongly dependent). There are two bonds between all this: the geoid height above the ellipsoid, that is well known and used, and the vertical deflection, that is most of the time neglected and misunderstood. In this article we intend to describe the vertical deflection and the importance of its understanding. We also present two examples in which its taking into account might improve the accuracy: an airborne LiDAR survey and total station distances reduction to the ellipsoid. From the very last example, we propose a new method to determine the vertical deflection.

PRIX DE L'AFT 2022

pour les jeunes ingénieur(e)s diplômé(e)s en topographie

Les étudiant(e)s des écoles d'ingénieurs sont invité(e)s à soumettre au comité de rédaction de la revue XYZ un article portant sur leur travail de fin d'études d'ingénieur(e) géomètre-topographe.

Les meilleurs articles seront récompensés et publiés dans la revue XYZ.

Un montant global de 2 000 euros est prévu en 2022, pour attribution en 2023.

Ce prix est attribué grâce à notre partenaire historique Leica Geosystems.

Conditions de participation :

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

- la date limite pour la proposition des articles est le 31 octobre 2022 (pour les projets présentés dans les écoles cette année et les précédentes).

L'adhésion à l'AFT, dont l'abonnement à la revue XYZ, pour l'année 2023 sera offerte aux participant(e)s.

Comité d'attribution :

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

Publication des résultats :

- les candidat(e)s seront informé(e)s individuellement des résultats au plus tard le 31 décembre 2022 ;
- les résultats du concours seront publiés dans la revue XYZ dans l'année suivant la publication des résultats ;
- le (la) président(e) du jury du prix et/ou le (la) président(e) de l'AFT remettront le ou les prix à l'occasion d'une manifestation organisée par l'AFT.

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



Le cheminement du douzième parallèle (première partie)

■ Jean-Claude LEBLANC

Article tiré de *Jalon*, bulletin de l'association des personnels retraités de l'IGN, n° 146-bis de mai 2022.

Cette appellation désigne une épopée géodésique un peu oubliée 55 ans après. Je la classe parmi les grandes opérations confiées à l'Institut géographique national (IGN) et en particulier aux "Travaux spéciaux" de la 2^e direction (géodésie et nivellement) de l'IGN. Elle vient après "l'axe 3000" (établissement d'une chaîne géodésique au Sahara), puis "le rattachement des Açores" à l'Europe et à l'Afrique par le système des chambres balistiques en 1965. Pour résumer la genèse du "12^e parallèle", je reprends quelques lignes écrites dans "La boîte de Pandore", le deuxième recueil de souvenirs des agents de l'IGN réunis à l'occasion du cinquantenaire de l'IGN.

"L'idée a germé à Bukavu, au Zaïre d'aujourd'hui, en 1953. Elle a mûri à Helsinki en 1960, au congrès de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) dont M. Laclavère était le secrétaire général, et s'est concrétisée à Nairobi en 1963. Le but de l'opération était de mesurer par cheminement un arc de parallèle qui traverse toute l'Afrique". L'US Army Map Service (USAMS) est responsable du programme. Elle contrôle les opérations en Éthiopie, au Soudan, au Nigéria et a confié à l'IGN les travaux dans les pays francophones. L'US Army Map Service est devenue peu après "US Army Topographic Command" désignée ensuite par "TC". Au Nigéria, le Federal Survey Department (FSD) participait aux opérations avec le TC. Pourquoi cette mesure ? Pour obtenir une nouvelle définition des dimensions de la Terre et, à terme, d'unifier les systèmes géodésiques des pays traversés, et plus tard de servir de base d'étalonnage des satellites ; le premier, Spounik-1, fut lancé le 4 octobre 1957.

La participation de l'IGN

La finalité du "12^e parallèle" était de mesurer, avec la plus grande précision permise par les techniques de l'époque, la distance entre la frontière Soudan-Tchad à l'est et l'océan Atlantique (Dakar). Comment ? Par un cheminement géodésique. À la fin des années 1960, les appareils de mesure des distances sont suffisamment précis : le cheminement succède à la triangulation.

Pour l'IGN, les opérations se sont déroulées sur quatre années : 1966-1970. Et pour diminuer la durée, deux missions furent montées les deux dernières années. En voici un résumé :

MOTS-CLÉS

Cheminement douzième parallèle, IGN, Institut géographique national, astronomie de position, Wild T4, telluromètre MRA 1, géodimètre AGA 4D

- **décembre 1966 - mai 1967** : départ à la frontière Soudan-Tchad (à l'est de Abéché, vers Adré, c'est le point n° 1), jusqu'à 200 km de Fort Lamy (N'Djamena actuellement), cette mission est décrite dans cet article, tandis que celles de 1968 à 1970 seront publiées dans le prochain numéro ;
- **janvier à début mai 1968** : depuis le dernier point précédent jusqu'à la frontière Cameroun-Nigéria pour assurer les observations de la jonction avec le FSD du Nigéria ; puis traversée du Nigéria pour rejoindre le Niger (vers Dosso) ; puis assurer la jonction Nigéria-Niger avec toujours le FSD ;

- **octobre 1968 - avril 1969** : mission est : Dosso-Ouagadougou ; mission ouest : Dakar-Kayes ;

- **novembre 1969 - avril 1970** : mission est : Ouagadougou-Bamako ; mission ouest : Kayes-Bamako.

Toutes les missions se sont déroulées pendant la saison sèche en Afrique sahélienne. Les premières pluies apparaissent généralement en avril : les nuages rendent incertaines les observations des étoiles et les pistes en latérite deviennent des marécages, même pour les véhicules 4x4. Je détaillerai ensuite les missions auxquelles j'ai participé et résumerai les deux autres.

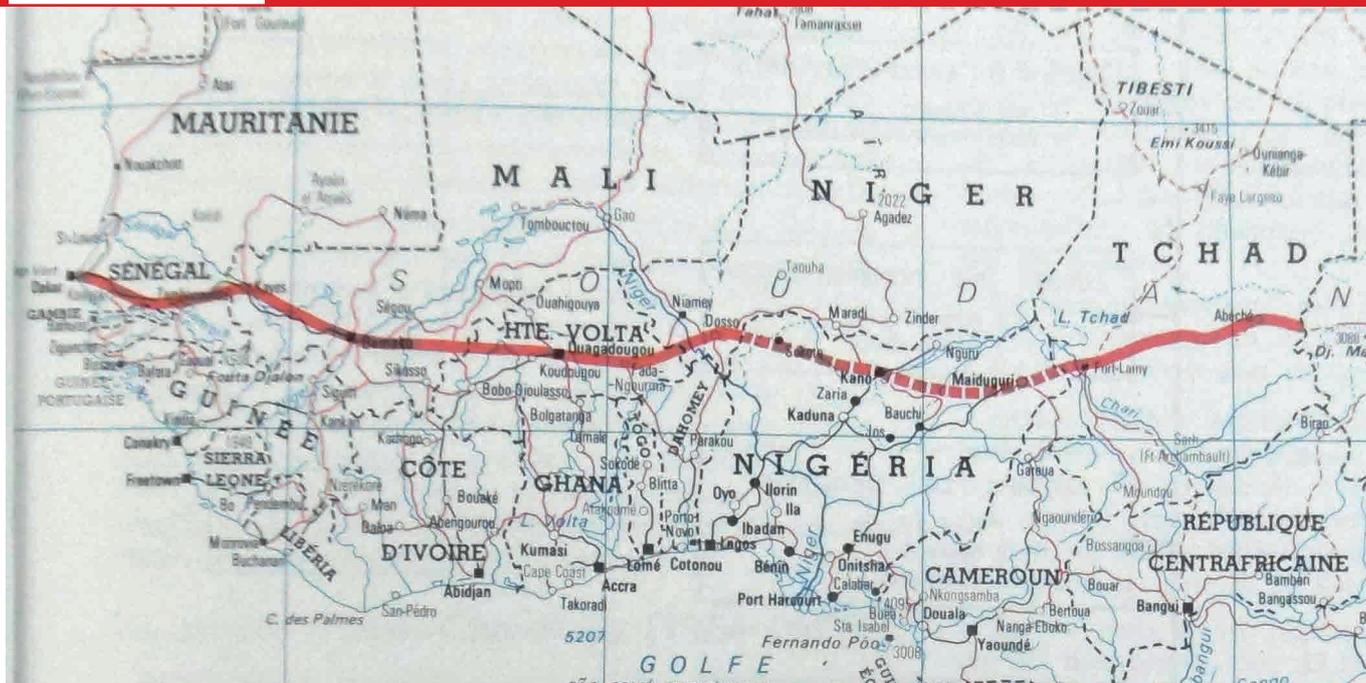
Le résultat

Je donne le résultat global maintenant. La distance du point 1 (Adré, Tchad) au point le plus à l'ouest (à Dakar) représente environ 4 300 km. Cette distance fut mesurée au millièmième, soit à ± 4 mètres. Cela peut paraître beaucoup. Alors je prends une distance plus "humaine". Paris mesure environ 9 km nord-sud et 11 km est-ouest. Imaginez qu'il faille mesurer ces dimensions à ± 1 cm, avec le matériel de l'époque, sans les appareils mono ou bifréquences !

Pour la participation de l'IGN, je reprends un passage écrit dans le livre précité : "Des résultats ? 240 sommets dont 117 points de Laplace pour 3 452 km de cheminement et 1 300 km de nivellement de précision, 160 signaux de hauteur moyenne de 15 mètres".

Quelques spécifications techniques

Il fallait obtenir la meilleure précision possible, d'où des prescriptions techniques rigoureuses imposées par le Topographic Command (TC), elles



Le trajet : cette carte est extraite du Bulletin d'information de l'IGN n° 25 de mars 1974. Elle montre l'ensemble du trajet entre l'est du Tchad et Dakar.



sont identiques à une vaste opération géodésique observée par les USA "la transcontinental traverse qui s'étend sur 5 000 km entre Beltsville (Maryland) sur la côte est des États-Unis et Noses Lake (État de Washington) sur la côte ouest" [extrait du Bulletin d'information de l'IGN, BI n° 25]. Les principales spécifications sont les suivantes. Un point sur deux en détermination astronomique (dit "point de Laplace") ; mesure des distances au cm, côtés compris entre 5 et 40 km ; rattachement au nivellement de précision tous les 75 km environ ; observations angulaires toujours centrées sur le repère principal, même si les observations sont faites sur un signal ; cheminement rectiligne à $\pm 20^\circ$ avec la moyenne des angles inférieure à 10° . Tout cela sera ensuite détaillé.

Mon début de carrière à l'IGN

J'ai intégré l'École nationale des sciences géographiques (ENSG) en novembre 1960 et j'ai suivi les deux ans du cycle des Ingénieurs des travaux géographiques de l'État (ITGE). Mon seul camarade de promotion, Roger, m'a servi de guide, lui qui connaissait déjà l'École. De novembre à avril, les cours étaient à Saint-Mandé et de mai à septembre, les stages pratiques se déroulaient en Provence.

De novembre 1962 à mars 1964 : Service national à Thionville (quatre mois et hiver très rigoureux), puis Châlons-sur-Marne (redevenu "en Champagne" en novembre 1995, six mois) puis Fontenay-le-Comte (sept mois).

En avril 1964 : retour à l'IGN. À cette époque, au retour du Service, les ingénieurs et géomètres étaient affectés un an à la 3^e direction (topographie, photogrammétrie), puis un an à la 2^e direction (géodésie, nivellement), puis au bout des deux ans à l'une de ces directions. Pendant mon stage à la 3^e direction, j'ai passé deux mois de stéréopréparation à Montech (Lot-et-Garonne), puis quatre mois de complètement d'esquisse planimétrique vers Graulhet (Tarn), puis deux

mois de complètement à Éauze (Gers). Au début de l'hiver, Roger me propose de me porter candidat à un lever dans la région de Marmande. Le chef de la 3^e direction, notre vénéré Raymond D'Hollander, accepte et je suis désigné pour effectuer le lever direct au 1:2000 (ou 1:2500) dans la forêt du Mas d'Ageçais (Lot), en vue du tracé définitif de la future autoroute Bordeaux-Toulouse, la photogrammétrie ne convenant pas en zone boisée (mi-janvier à mi-avril 1965).

En avril 1965 : nous sommes affectés à la 2^e direction. Avec mon camarade Gérard, nous participons, pendant cinq mois, à une mission d'astronomie de position : mesurer les coordonnées astronomiques de points connus en coordonnées géographiques à raison d'un point tous les 60 km environ, dans un grand triangle compris entre Bordeaux, le sommet de La Rhune (Pays Basque) et Carcassonne, soit une vingtaine de points. Comme souvenir exceptionnel, je retiens les trois jours et trois nuits passés au Pic du Midi (2 875 mètres moins les 15 mètres pour



Sur l'axe de la future autoroute Bordeaux-Toulouse février 65

En février 1965...



... et le 14 août 2014.



Superbagnières (vers 2 000 m).



Le Pic du Midi (photo de 1968) et la maquette du Pic par les Ateliers du Slog et Basic Théâtral de Lyon (vers 1990).

construire l'observatoire ; l'air était si pur que nous pouvions voir la côte atlantique et la côte méditerranéenne et en prime, deux soirs, le fugitif et évanescent rayon vert.

L'hiver 1965-1966 s'est passé en calculs de géodésie. Quel plaisir de "descendre un tableau de Doolittle" (compensation par moindres carrés), avec la table de valeurs naturelles à 8 décimales et la calculatrice électrique Friden à 16 décimales !

Puis arrive fin avril 1966. Je devais être affecté à la 2^e direction, MAIS je suis "kidnappé, détourné" par le chef de la 5^e direction (matériels, à l'époque). En 1966, René Joly, l'un des membres du cabinet de Georges Laclavère (directeur général), assure l'intérim du chef de la 5^e direction. *[Quand il m'a reçu, il m'a dit qu'il connaissait bien JJ. Levallouis (le chef de la 2^e direction) : ils jouaient au football ensemble, l'un était arrière gauche et l'autre ailier droit. Il m'a fait aussi une confiance : c'est le poste le plus intéressant qu'il a occupé, après Dalat bien sûr (ville du Service géographique d'Indochine !) ; j'ai vérifié ce point de vue 15 ans plus tard...]* En avril 1966, il m'a surtout expliqué qu'il fallait un opérateur qui connaisse bien le matériel qui allait être utilisé dans les travaux des futures missions dites "du 12^e parallèle". Je ne l'ai pas encore regretté ! C'est ainsi que je suis affecté à la "Division d'électronique, de chimie et de géophysique". Je suis accueilli par Pierre Didey et Michel Deck, qui sont devenus des amis, ainsi que par toute l'équipe, que je retrouverai en partie 15 ans après (bis).

D'avril à décembre 1966. Je passe l'été et l'automne à Saint-Mandé. Je me familiarise avec tous les matériels élec-

troniques de terrain, en particulier avec le matériel de chronométrie utilisé en astronomie (aspects mécanique et électronique) et les instruments de mesure des longueurs : telluromètre et géodimètre.

Les telluromètres MRA1 sont arrivés à l'IGN au début des années 1960. En 1966, ils servaient encore dans les brigades de géodésie. Je me suis principalement formé sur les MRA2 des "Expéditions polaires françaises" (EPF) qui étaient entretenus par l'IGN. (Le MRA2 est de même technologie que le MRA1, mais il a un gros intérêt pour les travaux des EPF : l'antenne peut être déportée de quelques mètres, donc hors des véhicules Weezel).

En 1966, la division avait un géodimètre AGA4 équipé d'une lampe tungstène pouvant porter jusqu'à 6 km, voire 8 km au maximum. Nous avons fait beaucoup d'essais sur la base géodésique de Châlons-sur-Marne : c'était mon apprentissage, ma formation très bien encadrée.

Organisation générale d'une mission (sauf la 2^e)

Personnel

La mission type comprenait vingt à vingt-deux personnes IGN, réparties en cinq équipes : le commandement, la reconnaissance et la construction, deux équipes d'astronomie, une équipe de géodésie. Ensuite deux (ou trois Américains) du TC étaient présents pendant toutes les missions : le (ou les) *contractor officer* et le contrôleur des fréquences.

J'ajoute aussi le personnel local, environ vingt Africains permanents : chauffeurs, aides-mécaniciens, aides-échauffeurs, cuisiniers et aussi les manœuvres embauchés selon les besoins ponctuels comme pour l'équipe de construction ou les porteurs. Sans eux, les missions n'auraient pas pu se dérouler ainsi.

Véhicules

Six Land Rover type 109 ; huit poids lourds légers ; huit poids lourds type Citroën T 46 et T 55.

Matériel technique (pas en détail)

- IGN : deux Wild T4, cinq Wild T3, quatre Wild T2 ; cinq telluromètres MRA1

(deux maîtres et trois répondants) ; deux niveaux IGN50 ; trois chronomètres à quartz ; deux chronographes imprimants ;
- américain : deux AGA 4D ; deux jeux de vingt-sept prismes.

Matériel de signalisation et de construction

Deux échelles Deloos ; cinq ou six signaux Bilby (fournis par le TC) ; deux signaux "Entrepose" doubles (pour signaux inférieurs à 10 m).

Moyens de communication

Un BLU (bande latérale unique) ; six émetteurs récepteurs ANGRC9 ; deux récepteurs ANGRC9 ; six Apolox 10.

Le commandement

Le commandement comprend le chef de mission, un ou deux secrétaires et le mécanicien.

Le rôle du chef est d'assurer la gestion globale de la mission, les liaisons par radio par BLU avec le centre IGN de Brazzaville (souvent avec le relais de Bangui les deux premières années), puis du centre de Dakar, des relations avec les autorités locales (les douanes en particulier) et françaises comme pour le ravitaillement en carburant.

L'un des secrétaires prend en charge la partie administrative et comptable, le second, polyvalent, pouvant remplacer le secrétaire d'une autre équipe et aussi ravitailler parfois en vivres (exemple des fruits et légumes) les autres équipes, car il n'y a pas de supérette tous les 30 km...

Le mécanicien possède dans son camion un poste à souder, des pièces de rechange de première nécessité comme les lames de suspension pour Land Rover et Power Wagon, quelques pneumatiques. Les plus grosses pièces sont commandées au centre puis envoyées (exemple des barres de direction et des trompettes – essieu avant – des Land Rover). Le mécanicien ne manquera pas de travail ! Le commandement héberge le superviseur américain qui reste présent pendant toute la mission. Le chef des travaux spéciaux (TS) de la géodésie, Michel Louis, dont le nom sera cité plusieurs fois, est venu deux ou trois semaines pour lancer la première mission au Tchad.



Les équipes de terrain

Les équipes de terrain sont au nombre de quatre :

- l'équipe de reconnaissance et de construction qui comprend six personnes réparties en deux ou trois pour la reconnaissance et quatre ou trois pour monter les signaux ;
- les deux équipes d'astronomie qui se composent chacune de deux opérateurs et d'un secrétaire. Un point sur deux est un point "astro", donc chaque équipe stationne un point sur quatre pour observer un "point de Laplace" ;
- l'équipe de géodésie qui comprend trois opérateurs et deux ou trois secrétaires stationne les points intermédiaires, donc un sur deux et parfois, rarement, deux points géodésiques se suivent.

Ces trois équipes sont "indépendantes dans l'interdépendance" comme l'explique la suite.

L'équipe de reconnaissance et de construction

Cette équipe comprend six personnes. L'équipe de reconnaissance doit trouver les points qui seront stationnés par les trois équipes d'observation. Les distances entre deux points sont comprises entre 5 et 40 km (chiffres précisés plus tard) et les côtés doivent être alignés à ± 20 degrés, la moyenne des angles du cheminement doit être inférieure à 10 degrés.

L'équipe doit aussi reconnaître l'emplacement des repères de nivellement.

Cette équipe a donc "plusieurs coups" d'avance, parfois 100 km, sur les équipes d'observation.

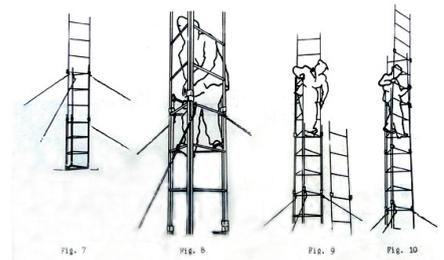
Pour s'assurer que la visée passe entre les points successifs, l'équipe dispose de deux "échelles Delooz" pouvant monter jusqu'à 24 mètres. Ensuite, il faut éventuellement assembler les signaux "Bilby" pouvant atteindre 24 m (en France jusqu'à 48 m). Il faut matérialiser le point par un bloc de béton assez solide qui retient le repère principal et qui recouvre un repère souterrain (à 1,2 m de profondeur selon les clauses techniques) ou graver un bloc rocheux. Si le point principal est au sol, mais ne voit pas l'un des points avant ou arrière, la reconnaissance doit prévoir un repère

d'azimut à plus de 800 m. Autre obligation pas toujours facile, il faut piquer, sur les photos au 1:50 000 anciennes de 15 ans, un point identifiable, souvent un arbre. L'équipe des constructeurs est aussi tributaire des observations : elle ne peut démonter le dernier signal que lorsque les calculs, effectués par la dernière équipe d'astronomie, sont dans les tolérances.

■ Pourquoi monter des signaux ?

Voyons le cas de la distance moyenne de 15 km entre deux stations du cheminement. Vous savez que la Terre est ronde. À la reconnaissance, c'est la formule approximative simple qui s'applique : $D_n = D^2/15$ (D_n , la dénivelée en mètres, D en km).

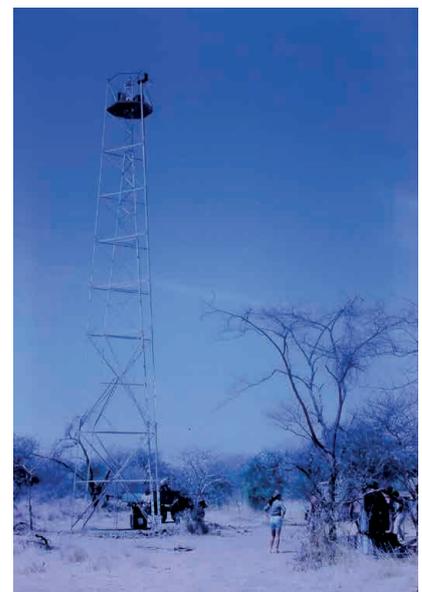
Elle tient compte du niveau apparent et de la réfraction du rayon lumineux.



Donc, dans le cas de $D = 15$ km, $D_n = 15$ m. En sol plat, il faudrait élever chaque point de 7,5 m. Mais il faut tenir compte des conditions locales : relief, végétation (les arbres) et prendre une sécurité de quelques mètres.

Extrait de la notice de montage de l'échelle Delooz (vers 1950) :

L'échelle s'appuie au sol sur une embase triangulaire de 50 cm. Le 1^{er} élément d'un mètre est posé, puis le 2^e de 2 m, puis les 3^e de 3 m ; ce qui maintient



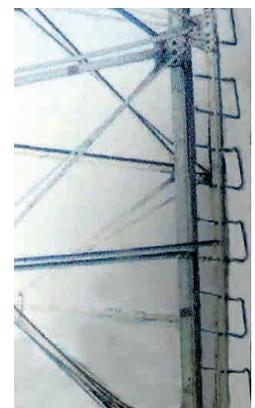
Signal Bilby (créé par Jasper S. Bilby en 1926)

À gauche : début de la construction du signal qui est double. Les éléments intérieurs portent les appareils d'observation, les éléments extérieurs portent les opérateurs et le matériel annexe.

Au centre : exemple de signal Bilby, d'environ 18 m. Les signaux pouvaient monter jusqu'à 24 m : imaginez-vous grimper le long de la façade d'un immeuble de huit étages, avec parfois le théodolite T3 de 18 kg dans le dos ! Les premières fois, on serre bien fort les échelons, surtout à la descente. Le matériel était monté avec une corde, une poulie et... deux bras.

À droite, détail des échelons qui mesurent 41,6 cm (vérifié sur un plan).

En France, les Bilby montaient jusqu'à 48 m ; les cerceaux de sécurité furent rendus obligatoires plus tard.





le décalage d'un mètre ; ensuite tous les éléments mesurent 3 m jusqu'au sommet et en fin, à 24 m, sont placés les derniers éléments de 2 et 1 m.

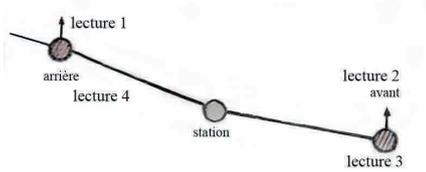
L'échelle de reconnaissance Delooz ; les câbles de maintien sont esquissés (voir ci-contre).

Signal Entrepose

Le signal est constitué par des tubes "Entrepose" de 1,80 m pour l'intérieur et 2 m (environ) pour l'extérieur. Au douzième parallèle, ces signaux n'étaient pas montés à plus de 10 m de haut.

Mesure des angles du cheminement

■ Qu'est-ce qu'un couple ?



Le théodolite est en place au point de station. L'appareil possède deux limbes gradués : le cercle horizontal et le cercle vertical (inutilisé ici). À la première mesure, on vise le point arrière, on tourne le cercle horizontal pour lire "zéro" sur l'index de lecture ; le cercle vertical est à gauche de la lunette (CG). On vise le point avant, en tournant l'appareil dans le sens horaire et on fait la lecture sur le cercle horizontal, ce qui donne une première valeur de l'angle. Ensuite, on fait un double retournement : la lunette fait un demi-tour sur elle-même (elle vise alors vers l'arrière) donc, il faut ramener la lunette et son support (l'alidade) vers le point avant, le cercle vertical est alors à droite de la lunette (CD). On fait la lecture sur le point avant, on tourne la lunette et l'alidade vers le point arrière dans le sens antihoraire, on fait la lecture voisine de zéro. C'est l'ensemble de ces deux mesures (CG + CD) qui s'appelle "un couple".

Pour le 2^e couple, on fait les mêmes opérations en tournant le cercle horizontal pour afficher 100 grades ; pour le 3^e, on affiche 50 grades, pour les suivants 150, 25, 125, 75, 175.

Cette méthodologie permet d'éliminer trois principales erreurs instrumentales (non-verticalité de l'axe principal, touril-

lonnement, défauts des graduations du limbe).

Les spécifications techniques sont bien précisées :

- une soirée = deux groupes de huit couples ; tout pointé à plus de 3" de la moyenne doit être refait ;
- l'erreur probable entre deux groupes de 8 couples est 1,5" (symbole expliqué plus loin).

Une détermination comprend deux soirées observées soit sur deux nuits soit la même nuit à condition de respecter un délai de deux heures entre la fin de la première détermination et le début de la deuxième.

L'erreur probable entre les deux soirées est $\pm 0,3''$; si ce dernier critère n'est pas respecté, il faut observer une 3^e soirée, ce qui sera parfois le cas.

L'erreur probable est celle qui a une chance sur deux de ne pas être dépassée.

Un repère d'azimut, aux points d'astronomie, doit être matérialisé au sol lorsque le sommet est observé depuis un signal ou lorsque, du sol, le point stationné ne voit pas l'un des deux autres points du cheminement. Le repère doit être à plus de 800 m et mesuré avec quatre couples.

Les observations angulaires se pratiquaient en fin de journée ou de nuit, toujours sur projecteur. Le T3 devait être centré, ce qui était facile pour les points au sol. Dans le cas d'un signal, il fallait "relever" le repère principal. Pour cela, deux théodolites (T3 ou T2) étaient placés à angle droit, à environ 20 m du signal. Il fallait donc être à deux et si possible à trois personnes : une à chaque théodolite et une au sommet du signal pour déplacer et centrer le support du matériel d'observation.

Sur un signal, les projecteurs étaient fixés sur la rambarde et alignés au mm avec le T3 centré.

Le nivellement

Tous les points d'astronomie doivent être rattachés au nivellement de précision ; dans la pratique ce sont tous les points du cheminement. Les itinéraires entre Adré et la jonction Cameroun-Nigéria, d'une part et entre Dakar et

Bamako, d'autre part furent nivelés dans les années 1950-1960. Des grandes boucles de nivellement de précision, de l'ordre de 1 000 km, avaient été observées en suivant les grands axes, les principales pistes. Par contre, les missions entre Dosso et Bamako ont dû niveler une bonne partie du cheminement, ce qui sera évoqué dans le résumé de chaque mission.

La précision demandée est de $\pm 0,30 \text{ m} \sqrt{D}$ en km, soit environ 1 m pour 10 km. Ce chiffre peut paraître large ; les altitudes servant à réduire sur l'ellipsoïde les distances observées sur le terrain.

Le cheminement planimétrique était aussi un cheminement altimétrique.

Un point sur quatre ou cinq était rattaché au nivellement de précision, soit directement soit en combinant nivellement direct et nivellement trigonométrique (mesures des distances au telluromètre et des angles au T3). Ensuite, tous les sommets du cheminement étaient rattachés par nivellement trigonométrique (ou indirect). Les observations sont réciproques et vraiment simultanées car "au top" transmis par la radio du telluromètre. Elles étaient faites généralement en début de soirée ; c'est une mauvaise heure, car la réfraction varie rapidement d'où les observations "au top". La meilleure période et la plus pratique était entre 10 h et midi.

Il fallait bien sûr prendre les cotes des projecteurs et des T3 depuis le repère au sol. Dans le cas d'un signal, sa hauteur était mesurée au centimètre à l'aide d'une chaîne de 20 m ou de 50 m.

Les équipes d'astronomie

La mission se compose de deux équipes d'astronomie et chaque équipe de deux observateurs et d'un secrétaire. Un point sur deux est un "point de Laplace" : point où sont recherchées les coordonnées latitude et longitude astronomiques à partir des étoiles et en plus l'orientation des côtés par rapport à l'étoile Polaire. Chaque équipe dispose d'un appareil dit "impersonnel" Wild T4 pour les observations sur les étoiles et d'un Wild T3 pour les observations angulaires. (Des explications suivent ce paragraphe). Chaque soirée d'observation astronomique, chaque graphique,



▶ doit comprendre 12 à 16 étoiles, elle dure entre 1 h 15 min et 1 h 30 min. Une nuit, chaque opérateur observe une soirée, puis recommence une autre nuit. Donc, chaque point est déterminé quatre fois, à condition que les critères de précision soient respectés, sinon, il faut recommencer deux autres soirées. De ces observations sont calculées les coordonnées géographiques de la station. Le T4 est toujours au sol, mais à moins de 100 m du repère principal. Chaque équipe doit orienter les côtés du cheminement par rapport à la polaire. Les opérateurs doivent observer une série de seize couples un soir et une autre série de seize couples un autre soir, soit deux déterminations par point ; mais si les deux séries diffèrent de 1", une autre série, un autre soir, est nécessaire. Chaque équipe doit aussi mesurer l'angle du cheminement, seize couples un soir, puis seize couples un autre soir (ou bien deux fois seize couples la même nuit à condition de respecter deux heures entre la fin de la première série et le début de la deuxième). Et s'il existe, il faut aussi mesurer l'angle du repère d'azimut. Les observations sur la polaire et les mesures de l'angle sont faites depuis le sommet du signal s'il est construit.

Les observations des étoiles

Les observations pendant les missions du 12^e parallèle sont faites au T4. (Les appareils de terrain employés sont les plus précis de l'époque : soit le Kern



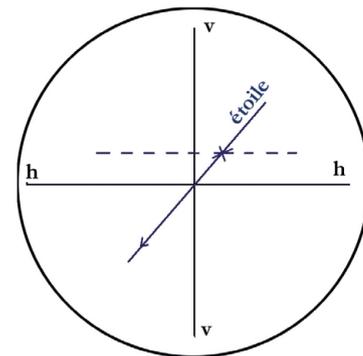
T4 de l'ancienne galerie IGN Doc. IGN : T4 sur son trépied lesté et gros plan sur la nivelle.

DKM 3A soit le Wild T4. L'IGN en possédait respectivement 4 et 3). (En fin de travaux, le trépied du T4 est démonté ; la partie métallique retourne en France et la partie en bois est brûlée sur place pour éviter d'importer des parasites).

L'observation se fait par l'oculaire qui est en bout de l'axe des tourillons et la lecture du limbe par la petite lunette au-dessous (à droite sur l'image ci-contre) : quelles facilités pour l'opérateur !

Le T4 est ainsi un télescope de terrain de 60 kg environ. Le grossissement de l'optique est de 65 X et la focale de 550 mm. Une fois l'appareil en place, il faut attendre la nuit et au minimum encore une heure pour que tout l'instrument soit stabilisé. La précision des mesures est liée à la stabilité et à la précision de la nivelle (cliché de droite) qui permet de maintenir la lunette à la distance zénithale constante. Voici une petite explication sur la précision de cette nivelle. Le verre est gradué et l'intervalle entre deux traits correspond à un écart angulaire de 2" (2 secondes sexagésimales) : c'est l'angle sous lequel on verrait un objet de 2 mm à la distance de 210 m). La fiole, le liquide avec la bulle, est illuminée par des sources autoluminescentes qui permettent de lire les extrémités de la bulle sans autre éclairage, bien commode la nuit.

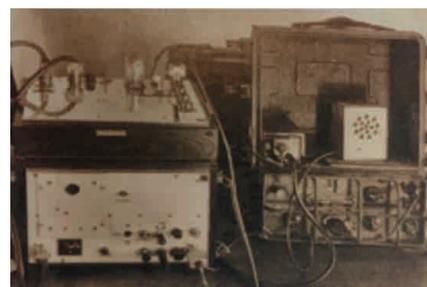
Les boutons moletés de fin mouvement permettent de suivre le déplacement de l'étoile ; ils entraînent un système qui déclenche des impulsions électriques qui commandent l'imprimante, ce qui



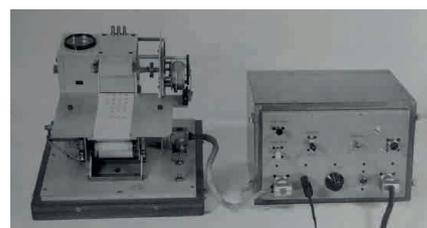
Le réticule (simplifié) comporte deux traits fixes : un vertical et un horizontal. Un trait horizontal mobile (en pointillés bleus) permet de suivre l'image de l'étoile qui se déplace.



Agrandissement du côté oculaire avec nivelle et l'un des deux boutons moletés (rond brillant, tirets blancs) ; le second est sur le même axe, caché ici ; le micromètre est ainsi tourné avec les deux mains.



Chronomètre à quartz mis à l'heure avec le récepteur de signaux ANGRC9.



Chronographe imprimant avec son amplificateur mis à l'heure par le chronomètre à quartz.



Les équipes d'astronomie de la 3^e mission ouest.

Une petite Vaucanson.

permet de connaître l'heure de passage. L'opérateur ne fait pas les lectures, voilà pourquoi le T4 est appelé "impersonnel". Le T4 est mis en station à la distance zénithale 30° pour avoir une distance observée de 30°00'30" qui tient compte d'une valeur approchée de la réfraction (déviation du rayon lumineux dans l'atmosphère). Les étoiles sont choisies dans les catalogues calculés à l'IGN pour des latitudes de 5' en 5' (minutes sexagésimales). L'heure sidérale de chaque étoile est connue, mais cette étoile "avance" chaque soir de 3 min 56 s par rapport à l'heure civile. Il faut deux chronomètres : l'un en temps sidéral (qui lui indique l'heure approchée du passage de l'étoile) et l'autre en temps moyen (comme une montre).

Les catalogues fournissent toutes les références pour observer l'étoile : les coordonnées astronomiques (ascension droite et déclinaison), l'heure de passage, l'azimut, l'angle à l'astre, etc., de 600 (?) étoiles jusqu'à la magnitude, la grandeur 6 (la polaire est de grandeur 2). Ces coordonnées sont issues du FK3, "Fundamental Katalog n°3" qui contient 1 535 étoiles jusqu'à la magnitude 7,5.

■ Tâches à chaque sommet d'astronomie et précisions requises

- déterminer les coordonnées géographiques, latitude et longitude, à ± 0,3" (0,3 seconde sexagésimale) ;
- mesurer l'angle de la station, depuis le repère principal au sol ou depuis le point centré sur le signal en observant deux séries de seize couples, écart



- probable inférieur à ± 0,30" ;
- mesurer l'azimut des deux côtés du cheminement par rapport à la polaire, également à deux séries de seize couples (à trois directions : avant, arrière et polaire) toujours à ± 0,30" ; comme il sera expliqué plus loin : 0,3" = 1 dmgr (décimilligrade) ; pour obtenir ces précisions, les tolérances intermédiaires sont très strictes ; il faut parfois, voire souvent, observer une troisième nuit, pour parvenir à des coordonnées géographiques satisfaisantes ;
- mesurer l'azimut du repère terrestre s'il existe ;
- mesurer les distances zénithales avec l'équipe de géodésie ;
- rattacher les points auxiliaires au point principal (la station d'astronomie, au sol, doit être à moins de 100 m du repère principal) ;
- effectuer tous les calculs avec la table de valeurs naturelles à 8 décimales et la calculatrice Vaucanson à 16 décimales.

■ Principe de la construction d'un graphique

La méthode s'appelle "hauteurs égales" ; dans la pratique les observations se font à la distance zénithale z, valeur complémentaire de la hauteur (angle au-dessus de l'horizon). D'une part, les observations sont faites avec le

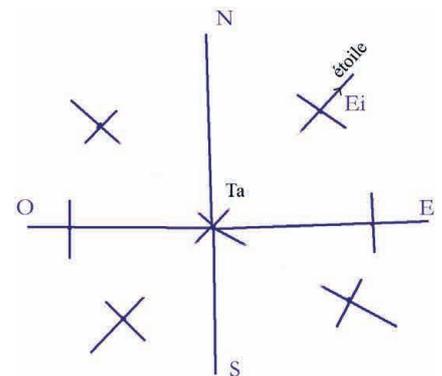
théodolite T4, à la distance zénithale affichée z = 30° et d'autre part, l'opérateur dispose de catalogues calculés pour la distance zénithale de 30°00'30".

La formule fondamentale de trigonométrie sphérique est la suivante :

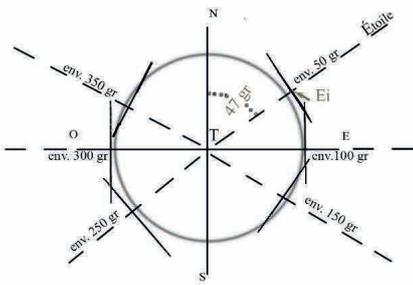
$\cos z = \sin \delta \sin \varphi_0 + \cos \delta \cos \varphi_0 \cos AH_0$
avec z = distance zénithale calculée à partir des éléments connus qui sont :

- AH_0 , l'angle horaire de l'étoile = $H_G + \Delta\lambda_0 - \alpha$;
- H_G = l'heure de Greenwich en TU à l'instant de l'observation ;
- α et δ : les coordonnées de l'étoile, fournies par le catalogue ;
- φ_0 et $\Delta\lambda_0$ les coordonnées approchées de la station.

Tous ces éléments, connus ou estimés, permettent de calculer la distance zénithale z et de la comparer à la distance zénithale observée ; soit "dz" cette différence. Comme exemple, sur le schéma ci-contre, seules six étoiles sont représentées. Sur la direction azimutale de chaque étoile, il faut reporter "dz" = TaEi (i = de 1 à 6). Si tout était parfait, ces six points Ei seraient sur le même cercle (toutes les "dz" seraient égales). L'opérateur dispose d'un calque transparent sur lequel sont dessinés des cercles concentriques ; pour l'aider à choisir le cercle qui répartit au mieux les petits écarts, la perpendiculaire est tracée en chaque point Ei (schéma page suivante). Sans évoquer d'autres raisons théoriques, cette perpendiculaire est appelée "droite de hauteur" d'où le nom de "hauteurs égales" donné à cette méthode d'observation. Ci-après, voici un exemple complet de graphique. Ce ne sont pas des observations du 12^e parallèle (les originaux



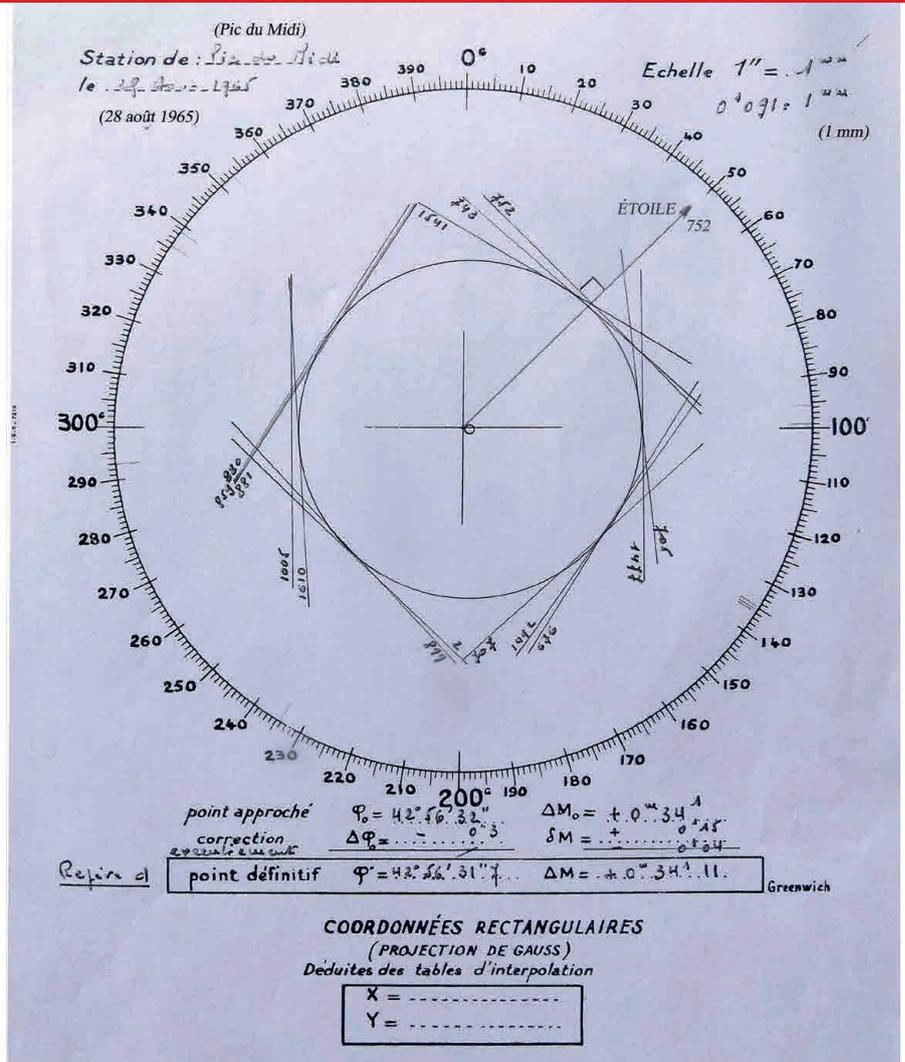
Le centre du cercle permet de définir le point "T" qui donne la position recherchée.



ont dû être remis à l'USTC). C'est un exemple personnel, oh combien symbolique, remis par Denys, alors responsable des archives techniques du SGN, le jour de mon départ à la retraite : une copie de mes observations au Pic du Midi, le 28 août 1965 !

Sur le graphique, seule figure la direction (l'azimut) de l'étoile "752" (le grand cercle gradué est déjà sur l'imprimé donc pas besoin de dessiner les directions). Avec le décimètre placé au centre du graphique et dirigé selon l'azimut, la différence "dz" est reportée, puis la perpendiculaire est tracée. Il reste à choisir le bon cercle dont le centre donne la position. Si le graphique ne convient pas, il faut soit changer l'échelle du graphique soit refaire les calculs à partir des coordonnées qui viennent d'être calculées.

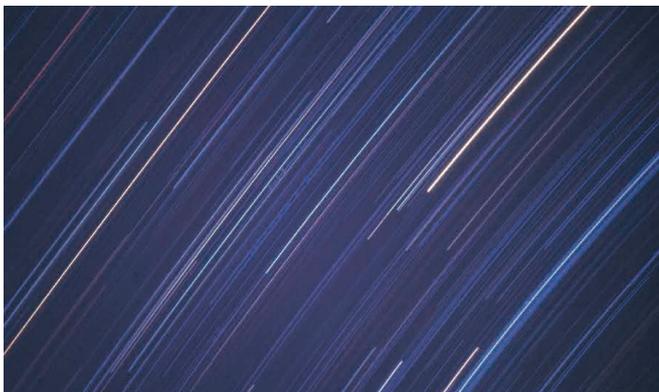
"dz" est un écart angulaire, pas une distance (le soleil "est" à 8 min ; l'étoile la plus proche, Sirius, à près de 9 années-lumière, Arcturus et la Polaire à environ 40 et 400 années-lumière). La soirée idéale comprend seize étoiles : trois dans les azimuts voisins de 50, 150, 250 et 350 grades, puis deux étoiles dites "horaires" à 100 et 300 grades, qui définissent le mieux la longitude. Toutes les directions "virtuelles" passent par le point qui correspond aux coordonnées approchées φ_0 et $\Delta\lambda_0$. La dernière opération graphique consiste à choisir le cercle qui tangente le mieux les



16 tracés ; son centre donne les coordonnées provisoires de la station. En effet, les coordonnées définitives sont recalculées plus tard en tenant compte de beaucoup de petites corrections (une dizaine) que je n'évoque pas : c'est ici que commence le domaine des calculateurs, puis des scientifiques !

Le graphique présenté n'est pas le graphique original : celui-ci est le résultat définitif du calcul ultérieur par ordinateur (dont compensation par moindres carrés), ce qui explique

que le point définitif est très proche du point approché. C'est un graphique remarquable parce que fait après avoir apporté toutes les corrections et qui s'explique aussi par les conditions d'observations exceptionnelles (et peut-être par la concentration de l'opérateur ?). J'ai choisi ces deux photos ; le ciel était presque aussi pur que dans le Sahara (que j'ai un peu connu). Je penche pour l'un des Echo, car Pageos avait une orbite presque polaire (et probablement la trace d'une comète).



Ciel étoilé, exposition de plusieurs heures, en "pause T", à Abéché, janvier 1967.



Ciel avec passage d'un satellite soit Echo 1 ou Echo 2 soit Pageos, à Ati, avril 1967.



Points de Laplace et polaire

Nous savons que la Terre est ronde, ce qui permet d'utiliser les formules de trigonométrie sphérique comme en astronomie de position. Mais la Terre n'est effectivement pas ronde ; la surface réelle de la Terre n'est pas connue, on la désigne sous le nom de "géoïde". Et pour effectuer les calculs, elle est assimilée à un ellipsoïde de révolution. Conséquence : les observations, sur le terrain, sont effectuées sur le géoïde et les calculs sur l'ellipsoïde. Au point de station, la direction de référence est la verticale, complément de l'horizontale indiquée par la nivelle de l'instrument. Et les calculs sont sur l'ellipsoïde avec comme référence la normale. (*L'écart est dû à l'angle entre la verticale au point d'observation et la normale à l'ellipsoïde au point homologue. Cet angle s'appelle "la déviation de la verticale" et nécessiterait bien d'autres explications.*)

Pour le 12^e parallèle, les calculs sont effectués sur "l'ellipsoïde de Clarke 1880" version RGS (*Royal Geographical Society*) comme décidé à la convention de Bukavu, dont voici deux paramètres : $\frac{1}{2}$ grand axe "a" = 6 378 249,145 mètres et l'aplatissement "f" défini par $1/f = (a - b)/a = 293,465$; (b = $\frac{1}{2}$ petit axe) ; ce qui permet de calculer la différence a - b = $a/293,465 = 21\,734,3$ m. Retenons l'ordre de grandeur de 22 km.

Géoïde et ellipsoïde ne sont confondus qu'au point fondamental ; pour le 12^e parallèle le point fondamental est le point n° 1, le premier point astronomique à Adré, frontière Tchad-Soudan.

En résumé, les observations, sur le géoïde, permettent d'obtenir les coordonnées astronomiques latitude et

longitude ; les calculs, sur l'ellipsoïde, fournissent les coordonnées rectangulaires X et Y. Autre conséquence : l'azimut d'une direction n'a pas la même valeur sur le géoïde et sur l'ellipsoïde. Soit Aa l'azimut astronomique et Ag l'azimut géodésique, la différence entre les deux azimuts est donnée par la relation : $Aa - Ag = (\lambda_a - \lambda_g) \cdot \sin \phi$; λ_a désigne la longitude astronomique, λ_g la longitude géodésique et ϕ la latitude du lieu. Elle permet de passer de l'azimut observé à l'azimut calculé et donc, d'orienter successivement chaque côté. Cette formule est appelée "équation de Laplace" d'où le nom donné aux points astronomiques.

■ Pourquoi viser l'étoile Polaire ?

L'étoile Polaire décrit un cercle de moins de 1° autour du pôle nord ; elle le parcourt en 23 h 56 min, donc très lentement, d'où la précision du pointé à la seconde (de temps). La relation simple en astronomie de campagne : "la latitude est égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon" fournit un autre avantage au 12^e parallèle, la lunette du T3 est inclinée seulement de 12° ce qui permet de réduire l'influence de certaines erreurs instrumentales. (Il faut en profiter, car dans 12 000 ans c'est l'étoile Véga, à 25 années-lumière qui indiquera le nord...). Je place ici une autre remarque. En juin, la déclinaison du Soleil vaut 23°26'. Lorsqu'il passe à midi au méridien du lieu de latitude 12° il est au nord ! C'est le cas pendant environ trois mois.

Unités de mesure des angles

Pour le Système international (SI), l'unité d'angle plan est le radian (le périmètre d'un cercle = $2 \pi R$ ou 2 pierres ou 2 Pierre). Laissons-le aux mathématiciens. L'unité "quotidienne", le temps, est exprimée en heures et avec ses sous-multiples bien connus : minutes et secondes ; les symboles étant respectivement : h, min, s. La Terre est découpée en fuseaux de 24 h.

Les théodolites sont gradués en degrés ou en grades.

Le cercle est divisé en 360 degrés. Les sous-multiples du degré sont la minute

sexa(gésimale) et la seconde sexa. Les symboles sont : °, ' et " ; et les secondes sont décimales. Exemple : 30° 30' = 30,5°.

(Voilà pourquoi ces symboles sont utilisés dans les journaux sportifs, c'est plus rapide que min et s).

La relation entre heures et degrés est facile sur la Terre : 24 h x 15 = 360° ; heures et degrés, minutes de temps et minutes d'arc, secondes de temps et secondes d'arc sont dans le rapport 1 à 15. Maintenant, une autre unité qui facilite les calculs est souvent retenue : le degré décimal. 30° 30' = 30,50° et 30° 30' 30" = 30,5083° ; c'est trop facile maintenant avec les calculatrices scientifiques et les serveurs ! Il faut faire attention s'il y a des décimales de seconde.

Le cercle est divisé en 400 grades. Les sous-multiples du grade sont : le déci-grade, le centigrade, le milligrade et le décimilligrade. Les symboles sont : gr, dgr, cgr, mgr et dmgr. En écriture rapide, le cgr est remplacé par le symbole accentué : (') et le dmgr par le symbole : ("). Pratiquement, il n'y a pas d'ambiguïté avec les symboles, l'utilisateur connaît quand même l'unité employée. Depuis 1982, il est recommandé (obligé) de remplacer le mot "grade" par le mot "gon", avec un "g" pour "goniomètre". Et comme 360° = 400 g, 1° = 400/360 = 1,11... gr et 1gr = 360/400 = 0,9°.

Pour les petits angles, en géodésie, on convertit la seconde d'arc en dmgr : 1" = 3" (3,086").

Voici l'exemple de la différence de longitude entre les méridiens de Greenwich et de Paris :

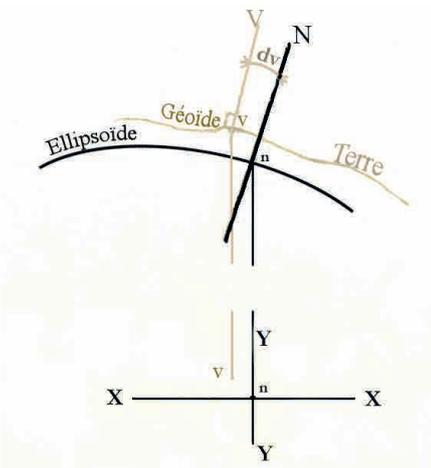
en heure : 0 h 09 min 20,935 s (valeur retenue par l'IGN) ;

en degrés : 2° 20' 14,025" soit : 2,3372(917) degrés décimaux ;

en grades : 2,5969(213) gr.

■ Relation entre les secondes d'arc et le mètre

La latitude s'exprime en degrés d'arc. La première définition du mètre est "la dix millionième partie du quart du méridien terrestre". Ce quart fait 10 000 km pour l'angle de 100 grades soit 100 km pour 1 gr et donc 10 m pour 1 dmgr et pour 0,3" (sexa), c'était la précision demandée pour les coordonnées géographiques.



La longitude s'exprime en h, min et s de temps. L'équateur mesure 40 000 km pour l'angle de 24 h soit de 86 400 s ; d'où $1s = 40\,000/86\,400 = 0,463\text{ km} = 463\text{ m}$, arrondis par facilité à 450 m.

Pour la latitude φ la valeur d'une seconde de temps est $450\text{ m} \times \cos\varphi$ soit pour le 12^e parallèle, 440 m. Et finalement 1/100 de seconde correspond à 4 m (en France, vers Bordeaux, $\varphi = 45^\circ$ et $1s = 320\text{ m}$).

Le "nœud" est l'unité de vitesse dans les domaines maritime et aéronautique. 1° correspond à la distance sur le globe de 40 000 km/360, soit 111,111... km. 1' vaut 60 fois moins, soit 1,852 km ou 1 852 m. Un bateau à la vitesse de 10 nœuds va à 18,52 km/h. 1 852 m est aussi l'unité du "mille marin international". Simple, n'est-il pas !

À cette époque, les conversions se faisaient à la table de valeurs naturelles et à la calculatrice à 16 chiffres Vaucanson. Dans les années 1970, apparurent les calculatrices scientifiques (qui ne prennent pas toujours en compte les décimales de la seconde) et maintenant nous avons les serveurs par le Net... Les grades furent introduits au moment de la création du système décimal. (*Le nom "grade" est officiellement créé par le décret du 1^{er} août 1793 ; Delambre utilisait parfois le terme "degré décimal"*). Lors de la mesure de leur méridien, Delambre et Méchain disposaient chacun de deux instruments nouveaux : les cercles répéteurs. Sur les quatre, trois étaient divisés en grades et un en degrés. Pourquoi 400 grades et pas 100 ou 1 000 grades ? Probablement parce que les deux unités grade et degré ont à peu près la même valeur ; comme les tables en grades n'existaient pas encore, il leur fallait convertir les grades en degrés. Maintenant, nous profitons du grade ou du gon...

Et l'unité le millième est instituée au moment de la sortie du canon de 75, en 1897. C'est une unité utile aux artilleurs car 1:1 000 correspond à un écart de 1 m à... 1 000 m.

■ TS GMT TU UTC

Rappel tout simple : la Terre tourne autour du Soleil ; vu de la Terre, c'est le Soleil qui tourne autour de la Terre, mais pas réguliè-

rement... Pour simplifier, la suite se réfère seulement au méridien de Greenwich (le méridien du lieu est à $\pm \Delta M$).

TS est l'abréviation de "Temps Sidéral". Le jour sidéral est la durée de révolution des étoiles autour de la Terre. Un jour sidéral dure 23 h 56 min 04 s de temps moyen, donc les étoiles avancent de 3 min 56 s par jour de 24 h. Les documents donnent l'heure sidérale pour Greenwich (HSG) à 0 hTU ; l'heure sidérale locale (HSL) est $HSG + \Delta M$ (longitude avec son signe + à l'est).

GMT est l'abréviation de "Greenwich Mean Time". Le Soleil vrai décrit une ellipse appelée "écliptique" inclinée de 23° 26" par rapport à l'équateur terrestre (et céleste). Donc le Soleil vrai (Sv) ne passe pas au méridien de Greenwich exactement toutes les 24 heures. Le Soleil moyen (Sm) est le Soleil fictif qui parcourt l'équateur d'un mouvement uniforme, le Soleil moyen définit le GMT. Comme en astronomie, l'angle horaire AH est nul quand le Soleil passe au méridien, il faudrait changer de jour au milieu de la journée (il est plus facile d'observer le Soleil le jour que la nuit !). Pour éviter cela, il est créé le "Soleil civil" (Sc) décalé de + 12 h.

Le **TU** (UT en langage international) est l'heure de passage, au méridien de Greenwich, du Soleil moyen plus 12 h = Sc. Souvent confondus, GMT et UT diffèrent donc de... 12 heures.

UTC : la comparaison des résultats entre plusieurs observatoires dans le monde et maintenant avec les satellites (précis à 1.10^{-14} s) définit UTC : "temps universel coordonné". (Le satellite "Pharo" aura une précision de 1.10^{-16} seconde, soit un écart d'une seconde au bout de... 300 millions d'années). L'équation du temps E(t) est définie par la petite formule : $E(t) = H\text{ du Sm} - H\text{ du Sv}$ (H pour heure). E(t) varie, approximativement, de + 15 min en février à - 15 min en novembre ; elle est voisine de zéro aux changements de saison.

L'équipe de géodésie

Je commence par résumer et énumérer les tâches à réaliser :
- mesurer l'angle du cheminement ;

- observer les distances zénithales réciproques et simultanées avec les équipes d'astronomie ;
- mesurer la distance au telluromètre du repère d'azimut aux points astro ;
- rattacher certains points du cheminement au nivellement de précision ;
- et bien sûr, mesurer les distances entre les sommets avec le telluromètre et avec le géodimètre.

Généralement, le point géodésique est entre deux stations astro ; mais si les côtés sont courts, deux points géodésiques peuvent être contigus. (*Exemple au prochain numéro sur schéma en fin de la 4^e mission ouest*).

■ Principes généraux des appareils de mesure de distance

Je prends l'exemple simple du poste radio. La station choisie émet sur une certaine longueur d'onde, par exemple le slogan de France Inter était dans les années 1960 : "1 852 m grandes ondes" (1 852 m : chiffre déjà cité). Deuxième caractère : l'onde porteuse est modulée par la parole ou la musique. Les appareils de mesure de distance émettent une onde électromagnétique ou lumineuse, onde modulée par un système électronique piloté par des quartz ; l'ensemble permet les mesures avec la précision donnée par les quartz. Longueur d'onde (λ) et fréquence (f) sont liées par la formule $\lambda \times f = C$, C étant la vitesse de la lumière dans le vide : 300 000 km/s. (exactement : 299 792 458 m/s).

Principe du telluromètre

Le telluromètre émet une onde centimétrique modulée par une série de quartz. Il se compose de deux postes : le premier, appelé "maître" (M) envoie un signal au second appelé "répondeur" (R) ; le répondeur renvoie le signal modifié de 1 kHz, le "maître" compare le signal émis et le signal reçu et affiche une distance. Il faut connaître la distance à 15 km près. Le premier quartz affiche la distance entre 0 et 15 km ; le deuxième affiche entre 0 et 1 500 m ; le troisième entre 0 et 150 m et le quatrième, qui permet les mesures fines, entre 0 et 15 m. Ce quatrième quartz est à la fréquence étalonnée de 10 MHz, ce qui correspond à un trajet aller-retour de 30 m et donc, à une distance mesurée de 15 m.

Le maître M transforme le signal reçu par un cercle qui se lit sur un petit tube cathodique (en haut à gauche sur la photo). Le signal émis par le répondeur se traduit par une faible coupure sur ce cercle et correspond à la lecture. La distance de 15 m se lit sur le cercle gradué en 100 parties, donc la mesure lue est connue à 15 cm. Le système est conçu pour faire tourner l'image du cercle dans quatre positions (analogie avec "cercle gauche et cercle droit") et la moyenne des quatre lectures donne la valeur de la mesure appelée "mesure fine". Cette mesure fine est répétée une vingtaine de fois en modifiant la fréquence fine ; la moyenne des 20 mesures fines donne la distance mesurée, estimée à quelques cm.

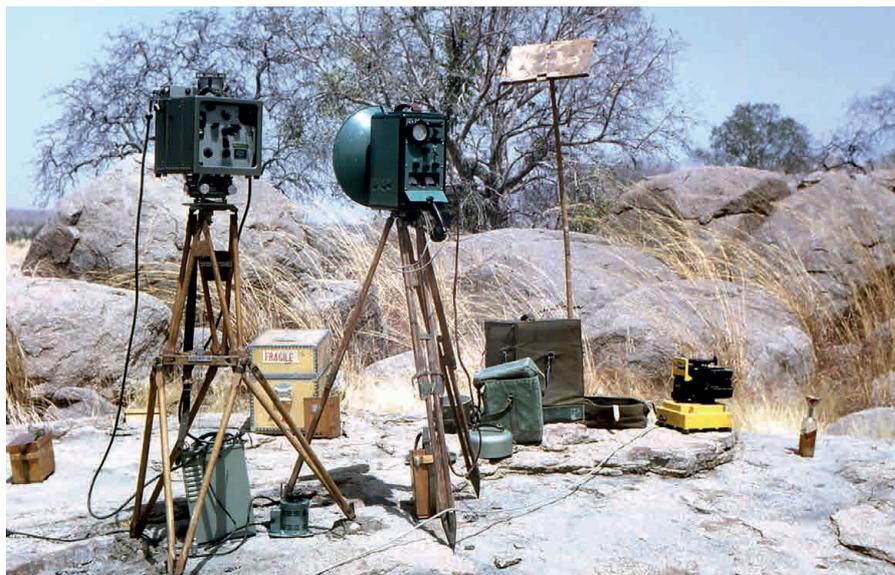
Le poste M affiche une distance qui est fonction de l'indice de réfraction dans l'air "n"; la distance est calculée par $D = C/n$.

En réalité, on calcule un autre indice $N = (n-1) \cdot 10^6$ par des formules fonction des trois éléments physiques : température sèche t , température humide t' et pression atmosphérique pa ; ces trois éléments sont observés au minimum en début et en fin de la mesure globale et à chaque extrémité de la mesure. Mais les ondes électromagnétiques sont très sensibles aux conditions météorologiques, surtout à la pression de vapeur dans l'air calculée à partir de t' .

Voici un ordre de grandeur dans les conditions du 12^e parallèle (par forte chaleur, en fin de mission). Si t varie de $\pm 0,1$ degré, N varie de 0,5 unité ; si t' varie de $\pm 0,1$ degré, N varie d'une unité ; si la pression atmosphérique varie de 1/10 mm Hg (mercure), N varie de 0,03 unité.

En résumé, le telluromètre permet de mesurer la distance pour un indice $N = 325$; puis il faut calculer la distance corrigée à partir des éléments observés : t , t' et pa .

Le telluromètre servait aussi à mesurer la distance du repère d'azimut exigé aux points astro, ainsi que la distance en cas de rattachement au repère de nivellement par nivellement trigonométrique. Il était aussi indispensable pour assurer les liaisons radio entre les deux points stationnés au moment des observations zénithales réciproques et simultanées,



Géodimètre et telluromètre vus du côté de l'observateur.



Les appareils vus de face.



La planche de 2,50 m avec les 27 prismes et le projecteur puis le telluromètre "répondeur".



ainsi que pour commander le déplacement des prismes pour la mesure avec le géodimètre. En France, nous avons essayé les appareils "ApolexTRPP1" qui portaient jusqu'à 40 km, mais ils se sont révélés limités à quelques km sur place. Donc la liaison phonique par telluromètre était indispensable.

Le telluromètre était rustique, alimenté en électricité par une batterie de 6 V, puis une boîte d'alimentation. Il suffisait de savoir changer des diodes et la résistance de 4,7 kΩ de l'alimentation, démonter et essuyer le klystron (l'émetteur) puis le remonter, avoir un petit tournevis en bois pour corriger le cercle de lecture, etc.

Principe du géodimètre

Le géodimètre AGA 4D était l'appareil de mesure des grandes distances le plus précis de son époque. L'émetteur était une lampe à vapeur de mercure et le signal modulé par une série de quartz ; pour améliorer la précision, le signal n'était plus sinusoidal, mais devenu de forme rectangulaire par une cellule dite "de Kerr". Le tout fonctionnait sous 500 V et nécessitait donc un groupe électrogène. La mission disposait de deux AGA 4D et d'un groupe électrogène (de 110 V) fournis par les Américains. Le géodimètre émet une lumière dans le spectre visible à 550 Å (angströms), transmise par la lunette émettrice dirigée vers les prismes, lumière renvoyée par les prismes et reçue par le géodimètre dans la seconde lunette (il faut que les optiques des deux lunettes soient alignées).

Le premier quartz donnait la distance lue entre 0 et 2 000 m ; le deuxième, entre 0 et 200 m, le troisième entre 0 et 20 m, le dernier entre 0 et 2 m. Ensuite, une "ligne à retard", comme un rhéostat, donnait le 1/100 soit 2 cm. La principale source d'imprécision provenait de cette ligne à retard. Pour y remédier, au lieu de mesurer l'appoint avec la ligne à retard, on déplaçait les prismes pour lire autour de l'origine de cette ligne à retard. Les 27 prismes coulissaient sur une planche en "T inversé" longue de 2,5 m et percée de trous repérés tous les 10 cm. La mesure était répétée plusieurs fois : autour du zéro de la ligne, en avançant les prismes de 10 et 20 cm, en les reculant de 10 et 20 cm.

Et pour être sûr de la précision de l'instrument, la fréquence du quartz des mesures fines était suivie en permanence pendant les observations : c'était la tâche du contrôleur américain qui vivait en permanence avec l'équipe de géodésie, mais qui ne parlait pas le français ; nous étions deux sur six à échanger en anglais.

Le principal avantage de la lumière est que l'onde est beaucoup moins sensible à la pression de vapeur que l'onde radioélectrique. Il faut bien sûr apporter les corrections météorologiques, toujours fonction des températures sèche et humide et de la pression atmosphérique. Dans les conditions du 12^e parallèle, une variation de 1/10 de degré sur t ou sur t' fait varier N de 0,1 ; la variation de 1/10 de mm Hg, comme pour le telluromètre, est de 0,03. L'indice de base pour le géodimètre est N = 308,6 et les formules de calcul sont plus simples.

Un côté était l'objet de quatre déterminations dans les tolérances (au 1.10⁻⁶ D) réparties sur deux nuits.

■ Cas des premières mesures et quelques remarques

Pendant les premiers côtés, les deux températures (t et t') étaient lues sur les thermomètres, selon la méthode de l'IGN : à l'ombre d'une planchette, à au moins 1,50 m du sol si la station était au sol. Mais l'écart de la mesure entre les deux appareils pouvait dépasser la tolérance permise. Pour quelques côtés suivants, les mesures furent lues à la fois sur les thermomètres et sur les psychromètres. Surprise, les écarts étaient plus conformes avec les températures du psychromètre. Donc, ces appareils furent toujours utilisés par la suite. Le géodimètre mesurait avec la précision du millionième soit ± 1 cm pour 10 km. Selon les spécifications techniques, l'écart entre les mesures des deux appareils devait être inférieur à 10 cm + 3.10⁻⁶ cm ; sur place, les écarts furent plus réduits, probablement après de nouveaux critères.

Les spécifications imposaient des distances comprises entre 5 et 40 km. Dans la pratique, la moyenne des distances fut autour de 15 km. Le plus long côté mesuré fut de 23 km

(première mission) et le plus court de 5,160 km (4^e mission est).

À remarquer page 63 : la planchette avec les deux thermomètres, le groupe électrogène jaune de 110 V pour l'alimentation du géodimètre, la petite bouteille à droite avec... de l'essence. Explication : plein, le réservoir ne tenait que pendant 50 min ; le géodimètre se stabilisait après 20 min environ et la mesure durait au minimum 45 min. Si le groupe s'arrêtait, il fallait à nouveau attendre quelques minutes avant de reprendre les mesures. D'où la nécessité de remplir le réservoir pendant les mesures. Le jerrican de 20 litres était à plusieurs mètres ; une fois remplie, la petite bouteille servait à compléter, avec un petit entonnoir, le réservoir du groupe, celui-ci étant en fonctionnement avec quelques vibrations. Comme les observations se faisaient de nuit, il fallait penser à descendre à temps du signal. Le sol était toujours éclairé, par une lampe à pétrole, puisque le contrôleur des fréquences observait en bas du signal (pas encore secouriste, je suivais déjà quelques notions de sécurité).

Les photos sont prises au sol, pendant un étalonnage. Le géodimètre et les telluromètres étaient étalonnés au début de la mission et à la fin ; cela ne gâchait rien de vérifier pendant. Ici n'était mesurée que la calibration : la constante d'étalonnage. Dans le géodimètre, la lumière parcourait 3 cm dans les prismes et environ 20 cm dans les optiques émettrice et réceptrice. Dans le telluromètre, le centre électromagnétique était le milieu de l'antenne. La constante d'étalonnage est la correction qu'il faut apporter à chaque mesure, c'est l'écart en cm entre le centre "électronique" et l'axe de fixation sur le support.

Maintenant, il faut s'imaginer la plateforme hexagonale du signal, avec 1,8 m entre les rambardes opposées. Cette plateforme est occupée du côté des instruments par le matériel et deux personnes puis, du côté des prismes, par la planche de 2,5 m, le telluromètre et une ou deux personnes, et toujours la nuit... Sur un signal, le géodimètre devait être centré sur le plateau à l'aplomb du repère principal. Côté "répondeur", la planche de 2,5 m était



posée sur la rambarde et elle aussi centrée et alignée. Les telluromètres étaient mis sur le plancher du signal pour assurer la liaison radio. Pour les mesures, les telluromètres étaient posés sur une planchette fixée sur la rambarde et alignés. Ils ne peuvent pas être centrés, car cette rambarde aurait perturbé la mesure.

■ **Journée type** (une à deux fois par mois) :

- au lever du jour, nivellement de précision en partant du repère de nivellement pour rattacher le point du cheminement le plus proche (astronomique ou géodésique) ;
- calculs dans la journée ;
- départ vers 17 h des trois équipes : une au point "M" et deux à chaque point "R" ;
- mesure des distances zénithales "au top" avec l'une, puis l'autre équipe astro ;
- mesure des deux distances au telluromètre ;
- observation des seize couples à la station ;
- mesure des deux distances au géodimètre ;
- retour au camp vers 23 heures pour le dîner.

Si deux points géodésiques se suivaient, l'équipe devait mesurer les deux angles horizontaux, les trois mesures zénithales et les trois distances (exemple sur le schéma de la 4^e mission ouest, à la fin).

Toutes ces opérations étaient quand même le plus souvent étalées sur plusieurs jours, fonction de l'avancement des trois équipes d'observation et du changement de camp (l'indépendance dans l'interdépendance, bis).

■ **Première mission Tchad** (décembre 1966 à mai 1967)

Résumé en quelques chiffres

Composition : vingt-deux personnes ; commandement (J. Desudde) : quatre personnes plus un ou deux Américains ; Michel Louis, chef des travaux spéciaux, est venu pendant deux ou trois semaines pour aider à la mise en route de la mission ; reconnaissance et construction : six personnes ; astronomie : deux

équipes de trois personnes ; géodésie : six personnes IGN plus le contrôleur américain des fréquences qui vivait en permanence avec l'équipe et qui ne parlait pas le français (entre ceux qui ne parlaient pas l'anglais, les échanges se faisaient par gestes et mimiques), plus six aides africains permanents. À l'époque, j'étais le plus jeune, affecté à l'équipe de géodésie qui comprenait, heureusement, quatre "vieux broussards".

Travaux techniques

45 points en tout dont 23 points astro ; 32 signaux hauteur moyenne 14 m ; maxi 23 m ; Distances mesurées : 46 au géodimètre totalisant 687 km ; 81 au telluromètre pour 712 km ; en nivellement de précision : 25 km.

Début de la mission

Nous sommes arrivés à Fort-Lamy (ancien nom de N'Djamena) le 13 décembre 1966, vers 4 h du matin ; j'ai conservé et retrouvé mon passeport ! Quel dépaysement ! Certains avaient quitté Paris fin novembre pour la base logistique IGN de Bangui. Leur rôle consistait à transporter le matériel de campement, acheminer les véhicules et autre matériel de Bangui à Fort-Lamy et à recruter une partie du personnel local. Après quelques courtes nuits dans la capitale, le convoi est parti pour Abéché, 800 km en convoi, Noël à Abéché, puis direction Adré, à la frontière Tchad-Soudan, pour le début des travaux.

Les liaisons radio entre les équipes

Chacune des cinq équipes disposait d'un émetteur-récepteur, le bon vieux ANGR9. L'indicatif était "TSU" (*Tango Sierra Uniform*) suivi de trois chiffres (par exemple 270) dont le dernier correspondait à une équipe. La liaison commençait vers midi. C'était le moyen

pour que l'équipe de reconnaissance fournisse la position et l'itinéraire d'un nouveau point ; c'était indispensable pour la coordination des trois équipes d'observation et dans bien d'autres cas. Un peu avant 13 h, nous écoutions le "Jeu des mille francs", relayé par Radio Brazzaville. C'est ainsi que vers Pâques 1967, nous avons écouté le jeu enregistré à Noël 1966 ; ce jeu a bien changé 55 ans après !

Quelques photographies, quelques souvenirs forcément personnels.



Capitaine (pêché dans le lac Fitri ?).



Belle tortue de sable.



Le départ en convoi : 8 camions PL (T46 et T55) ; 8 PL légers ; 6 Land Rover Diesel, non visibles.



Le frigo africain (viande boucanée).

Exemples d'hébergement



À partir de mars : campement collectif, sous les moustiquaires pour la fraîcheur la nuit et contre les mouches la journée (la petite tente verte est celle du contrôleur américain).



Notre gîte rural au point 42, le bureau est en haut à gauche, les "chambres" sont sous l'arbre (début mars 1967). Ces cases étaient abandonnées.

■ Petits incidents techniques

Le contrôleur américain a eu des ennuis avec son matériel électronique, ce qui a pénalisé l'avancement pendant deux ou trois semaines que l'équipe de géodésie a dû rattraper. Quelques semaines après, il a voulu aussi vérifier la fréquence fine du telluromètre maître M1, il l'a dérégulé ! Ce qui a "entraîné une modification de la fréquence, le rendant inutilisable pendant plus de quinze jours"; (écrit dans le rapport de fin de mission). À Saint-Mandé, le problème aurait été vite réglé : le laboratoire était relié directement à l'Observatoire de Paris par un signal de 1 000 Hz (avec la précision de 1.10^{-6} seconde ou mieux). Sur place, après quelques jours, j'ai trouvé une solution : aligner le répondeur R1 sur le second maître M2, en bon état, sur une fréquence intermédiaire, puis échanger le M2 par le M1 en respectant le centrage, puis aligner M1 sur R1. Bien que plus compliquée à exécuter qu'à écrire, cette méthode a fonctionné, l'indisponibilité n'a duré que quinze jours !

■ Quelques anecdotes

Fin mars, nous avons dû stationner une semaine autour d'un point d'eau qui s'est révélé contenir beaucoup de natron et qui, malgré le passage plusieurs fois dans les filtres Esser, malgré les pastilles de chlore, a soulagé nos intestins ! Un Français, que nous avons connu à Abéché, revenant de la capitale, s'est arrêté une nuit à notre camp. Nous ne devions pas être très

frais, car le lendemain il nous a laissé deux caisses de bières sur les quatre qu'il rapportait pour lui !

Deux ou trois membres de la mission, dont moi, avaient apporté leur fusil de chasse ; en plus du plaisir, c'était un complément de viande fraîche, partagé entre les équipes. Mon fusil, calibre 16, (cadeau de mes 16 ans, fils de cultivateur...) était suffisant pour atteindre les pintades qui sortaient de la brousse à la tombée du jour et se perchaient dans les arbres. Touchées, elles tombaient à terre et couraient quand même, il fallait les rattraper après une petite course, à la grande joie des enfants africains alertés par le bruit. Côté culinaire, nous ne mangions que les filets ; trop coriace du reste ! Je ne préfère pas évoquer les autres petits gibiers...

Nous changions de camp deux fois plus que les équipes d'astronomie ; le déménagement était devenu un rituel. Au sommaire : ranger le matériel technique et les imprimés ; démonter les tentes ; charger les véhicules et en dernier, arrêter le frigo à pétrole, puis déplacement au point suivant. Une fois l'emplacement choisi, le premier travail était de remettre en marche le frigo puis de monter le nouveau camp, pour treize personnes avec le personnel africain de l'équipe (6 + 1 + 6). Il fallait être très méticuleux pour s'occuper du frigo, des filtres Esser, des batteries, etc., c'était le rôle de Marcel et j'ai eu rapidement sa confiance !

À force de manipuler les thermomètres, j'étais devenu (un peu) maniaque. Voici



Dans le lac Fitri (entre Fort-Lamy et Abéché). Le fut de 200 l sur la Land n'est pas encore plein. On devine la gourde pendue à la portière. Nous n'avons rencontré que deux lacs, l'autre était beaucoup plus petit ; il ne faut pas croire que c'était pareil partout !



quelques températures vers la fin, en avril et mai. Nous commençons un peu avant la tombée de la nuit par les distances zénithales puis le telluromètre : le thermomètre affichait dans les 37° et baissait un peu la nuit. Les midis, je surveillais les 45°, mais le thermomètre s'arrêtait toujours à 44° (à l'ombre évidemment).

En fin de mission, la pluie apparaissait l'après-midi. La première fois, comme dans les films, nous en avons profité, mais pas longtemps, car la température était descendue à 24° ; il fallut se couvrir. Un midi, j'ai relevé la température d'un Ricard qui paraissait glacé : 20° ; cela montre que le frigo à pétrole (qui n'était pas un Frigidaire, mais un Ignis, belles initiales !) produisait bien des glaçons.

La boisson majoritaire était quand même l'eau. Les "anciens" m'avaient appris le principe de la gourde de deux litres : une bouteille en verre d'un litre entourée par une serpillère, une seconde identique, puis les deux entourées encore par une grande serpillère. La gourde était plongée dans de l'eau quelques minutes, puis suspendue toute la nuit à une branche ou bien accrochée à la portière du véhicule, avec le déplacement, l'évaporation produisait de la fraîcheur. Je n'ai pas pris la température, mais si la boisson à 20° paraissait glacée, celle de la gourde devait être autour de 30°. Pour éviter d'étancher la soif à la tombée du jour, le seul moyen était d'appliquer la règle du randonneur : boire avant d'avoir soif (plusieurs litres par jour, avec ou sans Antésite).



Scènes autour de l'eau (et ce ne sont pas des histoires).
En haut : Abéché, 26 12 1966 - à droite : Ati, début mars 1967.



Les premiers aides africains.

En plus des boissons alcoolisées habituelles disponibles dans la capitale, on buvait aussi du vin et le seul qui résistait aux fortes températures était le Nabao, vin portugais qu'il fallait couper avec de l'eau. Ce vin était vendu en bonbonnes de 10 ou 20 litres, attention à ne pas les casser !



À cette époque, la sécheresse commençait à apparaître dans les zones sahéniennes. Deux anciens étaient dans le Tibesti, au nord du Tchad, vers la frontière libyenne, dix ans auparavant. Ils racontaient ne pas avoir eu de problème d'eau. Nous, nous pouvions nous déplacer vers un puits ou vers un petit lac comme le Lac Fitri. Un fut de 200 litres et d'autres de 50 litres à l'arrière de la Land Rover étaient remplis avec des seaux.

Retour sur Paris le 10 mai 1967. ●

Rendez-vous au XYZ 172 pour la deuxième partie couvrant les années 1968 à 1970.

Contact

Jean-Claude LEBLANC
jc.leblanc@orange.fr



L'équipe de géodésie en fin de mission, à Massaguet (100 km de Fort-Lamy). Au bureau.





Campo di marte de Nathalie du Pasquier

© MRAC

Nathalie du Pasquier : *Campo di marte* Masaki Nakayama : *Body scale,* *circle triangle square*

■ Jean-Pierre MAILLARD

Nichée entre Béziers et la Méditerranée, la ville de Sérignan a ouvert en 1991 un espace d'art contemporain pour recevoir des expositions temporaires de grande qualité. En choisissant de baptiser l'équipement du nom de Gustave Fayet (1865-1925) les édiles ont honoré un collectionneur de Béziers, propriétaire viticole et peintre lui-même, qui a soutenu nombre d'artistes tels Paul Gauguin ou Odilon Redon. On doit aussi mettre au crédit du mécène la remise en état de l'abbaye de Fondfroide dans le département voisin de l'Aude, un joyau de l'art cistercien, qu'il a sauvé de la ruine pour en faire sa résidence accueillante aux artistes et un lieu culturel encore vivant aujourd'hui. Au fil du temps, l'espace d'art sérignanais a trouvé son public et s'est agrandi pendant que le fonds de l'institution s'étoffait, notamment par le don d'œuvres effectué par des artistes exposants. En 2006, alors détentrice d'une véritable collection, la ville a créé un musée pour valoriser celle-ci et la partager.

Le MRAC

La dynamique du musée de Sérignan a retenu l'attention du conseil régional jusqu'à impliquer la collectivité territoriale, ce qui a renouvelé dès lors son attrait et sa visibilité. C'est ainsi qu'est né, le 1^{er} janvier 2010, le musée régional d'art contemporain Languedoc-Roussillon (MRAC) de Sérignan sachant que "Languedoc Roussillon" se nomme désormais "Occitanie/Pyrénées-Méditerranée". Les développements successifs ont porté à plus de 3 200 m² la surface muséale. Sur le plan artistique

la transition a été soulignée par la réalisation d'une œuvre de Daniel Buren, "Rotation", apposée sur l'ensemble des parties vitrées du musée initial, et celle d'une grande fresque en céramique "Les femmes fatales" de l'artiste islandais Erró. Avec ces œuvres en façade, le bâtiment du MRAC marque résolument sa vocation contemporaine. L'intervention de Daniel Buren est immédiatement reconnaissable à la vue de bandes verticales, qu'il ne cesse de mettre en scène, et d'une composition de triangles dont les couleurs, sous le soleil, inondent l'intérieur du bâtiment, comme le font

les vitraux dans les églises. Avec Daniel Buren, le MRAC marque son intérêt pour l'art et la géométrie, intérêt rappelé par *Campo di marte*, l'exposition temporaire des printemps et été 2022, comme par la collection du musée.

Campo di marte

Jusqu'au 25 septembre 2022, le MRAC met en valeur les créations de Nathalie du Pasquier, et par là même, lui offre sa première grande exposition dans un musée français. Composée d'une centaine d'œuvres réalisées entre les années 1980 et maintenant, la présentation s'affranchit de la rétrospective pour composer, dit-elle, une symphonie silencieuse. Ce faisant l'artiste a voulu montrer que l'on pouvait réaliser une œuvre avec toutes celles rassemblées.

Les salles reçoivent des tableaux, des objets en bois, en céramique, des constructions et des interventions plastiques qui vont du sol au plafond de telle sorte que l'on a plus l'impression d'entrer dans l'intérieur d'une maison d'habitation que dans une galerie ou un musée. La géométrie est



dominante sur les papiers peints, les objets abstraits et de nombreuses toiles. Il est heureux que quelques-uns des tableaux soient figuratifs pour casser la rigueur de l'orthogonalité dans un ensemble aussi fourni.

On remarque les cabines faites de panneaux qui se montent comme un meuble en kit. Certaines ont été peintes à l'huile comme des tableaux, d'autres constituant de petites chambres à l'intérieur desquelles se présentent des situations tridimensionnelles qui suscitent la curiosité. On reconnaît aussi l'influence de cultures non occidentales dans la palette des couleurs, dans ceux des motifs et des formes de nombreuses pièces présentées.

Campo di marte est conçue et coproduite par le musée d'art contemporain de Rome (MACRO) et le MRAC. Son titre, que l'on peut traduire par champ de Mars, renvoie simplement à celui de Rome, très apprécié par l'artiste et justement à proximité du MACRO.

Nathalie du Pasquier

Autodidacte née à Bordeaux en 1957, Nathalie du Pasquier vit et travaille à Milan depuis 1979. Par ses voyages de jeunesse, elle a découvert des cultures africaine, indienne et australienne qui ont nourri son inspiration. Puis, en Italie, elle a participé au groupe de Memphis, un collectif de designers actifs dans les années 1980 qui était porteur d'un renouveau du mobilier, des tissus d'ameublement et autres tapis. On doit notamment à Memphis l'introduction

de l'usage du laminé plastique dans l'agencement et la prépondérance du choix des matériaux, comme des couleurs, dans la réflexion sur le mobilier design. Son activité de designer l'a ensuite conduite sur le chemin de l'abstraction vers la peinture et l'installation pour se détacher des objets du quotidien qu'elle produisait. C'est en mêlant "à des ensembles d'objets familiers des éléments géométriques incongrus" que Nathalie du Pasquier s'est finalement mise à construire des objets abstraits.

La collection permanente du musée de Sérignan mérite également que l'on s'y arrête.

Body scale, circle triangle square

Comme Léonard de Vinci avec *L'homme de Vitruve*, Masaki Nakayama veut révéler la géométrie du corps humain. Les trois photographies de 175 x 175 cm chacune, *Body scale*, *circle triangle square*, complétées d'une barre en acier, constituent des expérimentations corporelles dans un jeu géométrique primaire avec l'espace. Elles font partie d'une série, initiée en 1970, et sont indifféremment complétées par de l'acier, comme celles montrées à Sérignan, du bois ou des cordes.

Comme le souligne Henri Robert, les trois formes géométriques ne sont pas sans évoquer leur dimension symbolique dans le bouddhisme zen et dans le shintoïsme des "trois origines".

Pour autant l'artiste précise avoir une démarche sans spiritualité : "Ce qui se trouve entre l'espace réel de mon corps actif et l'espace réel de ce qui est capturé dans mes photographies n'est pas la distance, mais l'écart entre des existences qui se chevauchent dans un espace à plusieurs dimensions. C'est ainsi qu'une relation mutuellement harmonieuse est née."

Masaki Nakayama

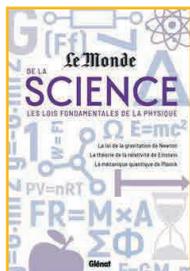
Né en 1945 à Kofu au Japon, Masaki Nakayama, diplômé de l'École de Komagome à Tokyo, vit et travaille dans son pays à Saitama. D'abord sculpteur sur bois, il a ensuite associé la photographie à son travail dans une démarche singulière. Son œuvre, visible dans des musées japonais, a récemment été présentée par la galerie Christophe Gaillard à Paris.

Le MRAC de Sérignan offre une visibilité supplémentaire à l'art contemporain. Dans ce domaine, régionalement, il s'ajoute au MO.CO, aux FRAC de Montpellier et de Toulouse, ces derniers impliquant un partenariat avec l'État. Ce faisant, l'Occitanie a élargi de façon indépendante son soutien aux arts plastiques et, par conséquent, aux créateurs de ce début de XXI^e siècle. C'est tant mieux. On le voit, pour cette destination, il n'y a pas que la Méditerranée, des plages de sable fin, des vignobles à perte de vue et les passés romain et cathare pour inciter à aller du côté des Corbières maritimes. ●



Body scale de Masaki Nakayama

© MRAC



■ Le monde de la science les lois fondamentales de la physique

Le monde de la science, publié en partenariat avec le journal *Le Monde*, est une invitation à découvrir la vie de trois scientifiques – Newton, Einstein et Planck – et leurs principaux apports dans la compréhension du monde, du temps et de l'espace. Cette approche originale permet de restituer le contexte dans lequel les théories ont pu être énoncées et démontrées. Des explications simples et des arguments rationnels rendent le texte facile à suivre, tandis que les images et les graphiques aident à comprendre le contexte historique et les découvertes des scientifiques.

Trois axes majeurs sont mis en avant dans cet opus : la gravitation, la relativité et la mécanique quantique. La gravitation est la première manifestation de la nature dont nous prenons conscience à l'enfance. C'est aussi elle qui coordonne le mouvement des astres dans le ciel. Accumulées par Tycho Brahe (1546-1601) et affinées par Galilée (1564-1642) grâce à sa lunette astronomique, les mesures dans le système solaire conduisent Kepler (1571-1630) à énoncer ses fameuses lois sur les orbites elliptiques. Ces dernières conduiront Isaac Newton (1642-1727) à comprendre la force gravitationnelle et son universalité.

Quelques décennies plus tard, c'est Albert Einstein qui est la vivante incarnation de la capacité de la science à métamorphoser notre vision du monde. Pris dans la tourmente de deux guerres mondiales puis de la terreur nucléaire, Einstein a poursuivi son œuvre créatrice à travers les terribles convulsions de l'Histoire. Il laisse derrière lui l'un des plus grands héritages scientifiques que l'Humanité ait connus : la célèbre relation $E = mc^2$ entre la masse et l'énergie, un travail de pionnier à l'origine de la physique quantique actuelle, et sa théorie de la relativité qui a bouleversé pour toujours nos idées les plus enracinées sur l'espace, le temps et l'univers.

Enfin, Max Planck formule en 1900 une hypothèse selon laquelle l'énergie n'est pas émise de façon continue, mais sous la forme de "paquets", ou quanta. Une

théorie pour le moins radicale, d'où naîtra une branche entièrement nouvelle de la physique : la mécanique quantique. Ayant l'infiniment petit pour champ d'action, celle-ci constitue, avec sa lointaine cousine la relativité, le socle de la vision moderne de l'univers.

► GLÉNAT
35,50 € - 368 pages
ISBN : 9 782344 053041



■ Histoire illustrée de l'informatique

Emmanuel LAZARD
et Pierre MOUNIER-KUHN

*Préface de Gérard BERRY, professeur
au Collège de France*

C'est un ouvrage de référence traitant de façon chronologique, fouillée et illustrée, de l'histoire de l'informatique.

De la machine d'Anticythère au cyberespionnage et aux *Big Data*, des cartes perforées à l'Internet, des tabulatrices aux tablettes, il nous propose un voyage dans le temps, une archéologie de notre environnement numérique.

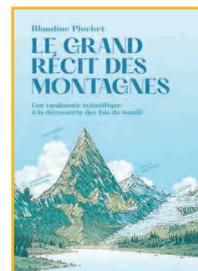
Cette 3^e édition, enrichie de notices supplémentaires, aborde de nouveaux territoires, parmi lesquels la 5G, les objets connectés, ou encore la crise des semi-conducteurs.

L'abondance et la qualité des illustrations contribuent au plaisir de lecture, et incitent à une navigation linéaire ou aléatoire entre les époques.

En annexe, on trouve une importante bibliographie et une liste des musées et collections.

Les auteurs, Emmanuel Lazard, ancien élève de l'École normale supérieure, est maître de conférences à l'université Paris-Dauphine où il dirige l'un des centres informatiques. Pierre Mounier-Kuhn est chargé de recherche au CNRS et à l'université Paris Sorbonne.

► EDPSCIENCES
39 € - 333 pages
ISBN : 9 782759 827046



■ Le grand récit des montagnes Une randonnée scientifique à la découverte des lois du monde

Blandine PLUCHET

Géantes qui se dressent au bout du chemin et nous dominent, les montagnes coupent le souffle. Pour qui sait observer, elles sont pourtant bien plus qu'un simple élément du paysage : ce sont les derniers refuges du monde originel.

Gardiennes des secrets de la nature, elles nous révèlent quantité de choses sur la Terre, de la formation des reliefs à l'évolution du climat en passant par les phénomènes atmosphériques et optiques. Elles abritent aussi d'étranges observatoires d'altitude ou souterrains à l'écoute des signaux cosmiques dans les ténus. De promenades géologiques en randonnées alpines, suivons l'autrice à la découverte de ces temples de la science !

Les montagnes, plus grand labo du monde.

Physicienne, Blandine Pluchet se consacre à l'écriture afin de faire découvrir la science au plus grand nombre par le biais de la fiction ou du documentaire, adulte comme jeunesse.

Illustrations de Laetitia Locteau.

► FLAMMARION
20 € - 272 pages
ISBN : 9 782080 245946

■ Les tribulations d'une scientifique en montagne

Adeline LOYAU

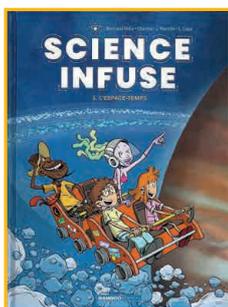
Non, la vie des scientifiques en montagne n'est pas un long chemin tranquille !

Si les primatologues passent une grande partie de leur vie dans les forêts tropicales, les chercheurs spécialisés dans les amphibiens exercent parfois en montagne... et ce n'est pas toujours simple ! On peut tout aussi bien essayer une tempête de neige ou un incendie, se faire manger sa chaussure par une vache, devoir ranimer un triton devant les yeux effarés des stagiaires, se voir réclamer un permis inexistant par un



garde-pêche alcoolique ou croiser le chemin d'un schizophrène en cours de décompensation... Non, la vie de scientifique en montagne n'a rien d'une routine. Adeline Loyau nous emmène sur les chemins de la science d'altitude dans un récit passionnant et plein d'humour. *Biologiste, chercheuse associée au Laboratoire d'écologie fonctionnelle et environnement de Toulouse, docteure en éco-éthologie, Adeline Loyau est spécialiste du comportement animal et des maladies de la faune sauvage.*

► **GLÉNAT**
19,95 € - 288 pages
ISBN : 9 782344 0518



■ Science infuse 1 - L'espace temps

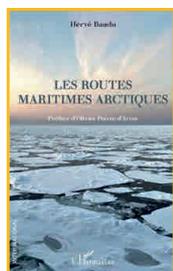
BEKA et CHACMA
Mise en images par Julien MARIOLLE
Couleur Laurence CROIX

Véritable aventure riche en enseignements, cette série de bandes dessinées destinée à la jeunesse présente de façon simple, pédagogique et amusante, les principales théories de la science actuelle : l'astrophysique et le cosmos, la mécanique quantique et l'infiniment petit, les mathématiques appliquées et la biotechnologie. De quoi faire rêver les jeunes (et les plus grands) grâce à la Science... infuse !

BEKA, scénariste, Bertrand Escaich est un des membres du duo de scénaristes BEKA. Aux éditions BAMBOO, ils ont notamment créé les séries à succès Les Rugbymen (plus de 3 millions d'exemplaires).

CHACMA - Étudiant polytechnicien, Charles-Louis Detourney donnait des cours particuliers en mathématiques et en sciences. Devenu ingénieur industriel en chimie, il a continué de mêler les genres : chercheur au labo fédéral de criminologie, organisateur de grands événements de jeunes, cadre dans une société pharmaceutique, vice-président d'un mouvement de jeunesse, etc. Jusqu'au jour où il rencontre Bertrand des BEKA qui lui propose de réunir ses grandes passions : la science et la pédagogie via la bande dessinée !

► **BAMBOU ÉDITION**
14,90 € - 64 pages
ISBN : 978-2-8189-8463-5



■ Les routes maritimes arctiques

Hervé BAUDU

Préface d'Olivier POIVRE d'ARVOR

Avec le réchauffement climatique, trois fois plus important aux pôles que sur le reste de la planète, les eaux polaires arctiques sont de plus en plus accessibles au trafic maritime et aux ressources d'hydrocarbures jugées considérables, et ce sur de plus en plus longues périodes estivales. La construction de brise-glaces russes, les projets gigantesques d'extraction d'hydrocarbures n'ont jamais été aussi importants que dans cette décennie.

Les routes maritimes arctiques plus courtes sont-elles appelées à concurrencer celles classiques par les canaux de Panama et de Suez ? L'augmentation du trafic maritime est-elle source de tension dans cette zone de plus en plus soumise à son exploitation ?

Cet ouvrage permet de mieux comprendre les enjeux maritimes, environnementaux, économiques et géopolitiques liés à l'exploitation de cet espace arctique en décrivant les principes qui les régissent.

Membre de l'Académie de marine, Hervé BAUDU est professeur de sciences nautiques à l'École nationale supérieure

maritime. Ses travaux sur la navigation dans les glaces l'ont conduit à naviguer à de nombreuses reprises en Arctique et en Antarctique. Il est expert des sujets maritimes polaires auprès du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères.

► **L'HARMATTAN**
17 € - 155 pages
ISBN : 9 782140 206160

LE COIN DES REVUES



■ CNES mag n° 91 Innovation Catalyser l'expertise française Orchestrer le changement

Opérateur pour le compte de l'État, le CNES accompagne les mutations économiques qui font bouger les lignes. Programme d'investissements d'avenir (PIA), plan de relance, plan France 2030... Au fil des dispositifs, il adapte sa stratégie pour stimuler la compétitivité des partenaires historiques comme des acteurs émergents.

La girafe et l'astronaute Jacques ARNOULD

La girafe et l'astronaute partagent une même destinée, celle de se rapprocher du ciel. Mais leur adaptation à cette mission, leur sélection, ne relèvent pas des mêmes ressorts...

Jacques ARNOULD, historien des sciences et théologien, est chargé de mission pour les questions éthiques au CNES.

► [https : //cnes.fr/fr/cnesmag-91](https://cnes.fr/fr/cnesmag-91)

Répertoire des annonceurs - n° 171

GEODATADAYS	2 ^e de couv.
LEICA GEOSYSTEMS	2
REIS STOLZEL	7

Le cadre intégré de l'information géospatiale (IGIF), une opportunité pour les spécialistes géodésiens, géomètres et géomaticiens ?

■ Claire GALPIN

Dans les institutions internationales, les cadres d'analyse issus de la modélisation des processus d'un ou plusieurs secteurs de l'économie et d'un pays sont un outil utile pour susciter la compétition et insuffler la transformation par la comparaison. Après les guides et outils fit for purpose appliqués au système foncier, un nouveau cadre d'analyse est en train d'émerger avec l'objectif de créer des infrastructures de données spatiales dans les pays.

Une infrastructure de données spatiales est un système qui rassemble diverses ressources d'information géographique/géospatiale disponibles via le web et qui répond à certaines conditions d'interopérabilité pour que les données puissent être utilisées par tout type d'utilisateurs. C'est la combinaison des applications SIG, des métadonnées, des utilisateurs et des outils dont le but ultime est l'utilisation de données spatiales d'une manière plus efficace et plus flexible. En 2017, la Banque mondiale et la Division statistique des Nations Unies (UNSD) ont élaboré le cadre IGIF (*Integrated Geospatial Information Framework*) avec l'objectif de "combler le fossé numérique géospatial". Le cadre vise à aider les pays à évoluer vers des économies digitales, des services en ligne et le commerce électronique afin d'améliorer les services aux citoyens, d'accroître les capacités d'utilisation des technologies géospatiales, d'améliorer les processus de prise de décision des gouvernements, de faciliter le développement du secteur privé, de prendre des mesures pratiques pour réaliser une transformation numérique.

Le cadre repose sur neuf voies stratégiques dans trois domaines d'influence principaux et propose une approche innovante de la gestion de l'information géographique.

Le cadre est appuyé par un guide en trois parties permettant tout d'abord d'établir l'état des lieux et une évaluation

diagnostique de l'information géospatiale, puis de déterminer une vision pour le pays à partir d'une analyse d'impact, et finalement, d'établir un plan d'action pour l'investissement et la mise en œuvre pour atteindre cette vision. Pour les professionnels de l'information géospatiale, il existe une opportunité d'entrer dans une équipe grâce à leur compétence dès l'état des lieux qui est un diagnostic et une évaluation de la situation actuelle en termes de gestion de l'information géospatiale dans le pays. Ce travail est structuré autour des neuf voies stratégiques de l'IGIF et aboutit à définir une situation de référence qui alimentera la réflexion à mener lors des prochaines étapes. Élaborer la vision à plus ou moins long terme pour le pays va demander d'établir une analyse d'impact permettant d'organiser et classifier les priorités du gouvernement en matière d'information géospatiale dans le but de soutenir et d'accélérer la réalisation de ces objectifs stratégiques. L'analyse d'impact prendra également en compte les conditions socio-économiques du pays. Un outil est développé afin d'évaluer la rentabilité socio-économique de l'investissement dans un *Imaging Development Systems (IDS)* d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Finalement l'équipe pluridisciplinaire travaille à définir un plan d'action sous

forme d'une feuille de route détaillée et chiffrée pour la création ou le renforcement de l'IDS à travers une série d'interventions politiques et de projets de mise en œuvre interdépendants. Il reste un assez long chemin à parcourir pour financer et mettre en œuvre le plan d'action.

En parallèle d'initiatives à très grandes échelles comme la directive INSPIRE de l'Union européenne, il faut citer la Corée du Sud qui, depuis 1995, travaille sur son infrastructure nationale avec un grand succès et dont les principales leçons tirées touchent aux points suivants :

- la création d'une structure de gouvernance permettant de regrouper les institutions publiques et privées, les utilisateurs de l'infrastructure afin de définir la vue d'ensemble ;
- éviter les duplications et établir une norme d'intégration des systèmes d'information à l'échelle nationale. Actuellement de nombreuses initiatives sont en cours de lancement et d'élaboration, notamment en Afrique francophone, mais pas seulement. Intéressé par plus d'informations, merci de contacter geometresansfrontiere@gmail.com. ●

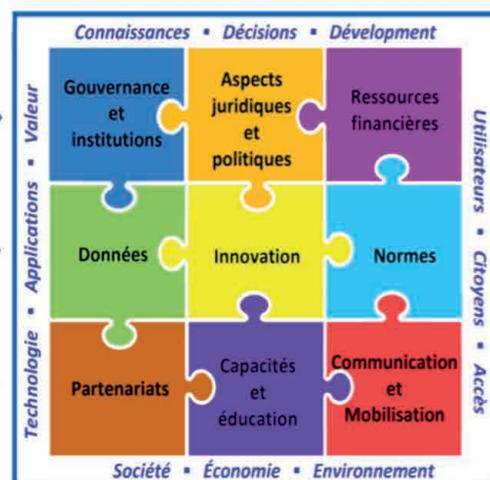
► Pour aller plus loin, le cadre peut être consulté à l'adresse suivante : <https://ggim.un.org/IGIF/>

Cadre IGIF.

Gouvernance

Technologie

Personnes



© source Banque mondiale



14 & 15 SEPTEMBRE 2022

LES JOURNÉES NATIONALES GÉONUMÉRIQUES de L'AFIGÉO & DÉCRYPTAGÉO

FUTUROSCOPE - POITIERS



 www.geodatadays.fr
 contact@geodatadays.fr
 #GeoDataDays

Parc du Futuroscope
CS 52000
86133 Jaunay-Clan Cedex

