

xvz

aft
association francophone de topographie



n° 172



L'expédition scientifique
de Jean Richer dans l'île
de Cayenne page 46

**Expédition au glacier
d'Arcouzan en Ariège
page 18**



FESTIVAL INTERNATIONAL DE GÉOGRAPHIE

de Saint-Dié-des-Vosges

33^e édition

30 sept,
1^{er} & 2 oct
2022

Conférences
Débats
Littérature
Expositions
Géo-numérique
Gastronomie
Cinéma
Spectacles

déserts

PAYS INVITÉ : **LE PORTUGAL**

www.fig.saint-die-des-vosges.fr

Fondateur: Christian Pierret

en partenariat avec



Grand Est

CNL



REPÚBLICA
PORTUGUESA

COMARCA
PORTUGUESA

GEPAC

INSTITUT
FRANÇAIS

sofia

CP

Scam

V

Strasbourg

SNCF

SARONTEMPORADA
FRANCE-PORTUGAL
PORTUGUESA 2022

Manifestation organisée dans le cadre de la Saison France-Portugal 2022

REPÚBLICA
FRANCAESA

REPÚBLICA
PORTUGUESA

COMARCA
PORTUGUESA

GEPAC

INSTITUT
FRANÇAIS

bleu

culture

3 grand est

1

Vosges

CARTO

Vosges

aft
association francophone de topographie
et sa revue Xyz

SOMMAIRE

Directeur des publications
Tania Landes
Maître de conférences INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint
Flavien Viguier
Ingénieur topographe, SNCF

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

Rédacteur en chef
Bernard Flacelière
Ingénieur topographe, retraité

Rédacteur en chef adjoint
Flavien Viguier

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

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

Conception et maquette
Dorothée 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
3^e trimestre 2022 ISSN 0290-9057
Tirage de ce numéro : 800 ex
CPPAP : 0324 G 80866

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

Adhésion à l'AFT comportant l'abonnement et le téléchargement gratuit du PDF. Visitez
[http://www.aftopo.org/rubrique Pour adhérer](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 : débouché après 50 m de traversée sous le glacier d'Arcouzan. Au fond, le guide Bruno Colla, contemple les sommets du Montcalm (3 077 m) et la pique d'Estats (3 143 m). © Philippe Sablayrolles



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 Louis Tschaen 7

> Hommage à Jean Denègre 10

Association

> Rapport moral de l'année 2021 présenté à l'assemblée générale de l'AFT le 16 juin 2022 en présence à l'ENSG et visioconférence
Mathieu KOEHL 12

Manifestation



> Les journées techniques de l'Association francophone d'hydrographie
Mounir AJROUCHE et Céline KHANTACHE 15

> XXIV^e Congrès de la Société internationale de photogrammétrie et de télédétection (ISPRS) Nice, du 6 au 11 juin 2022
Tania LANDES - Laurent POLIDORI
Pierre GRUSSENMEYER 16

La vie des écoles

> Expédition au glacier d'Arcouzan en Ariège Relevé topographique en 3D
Philippe SABLAYROLLES 18

Qualité

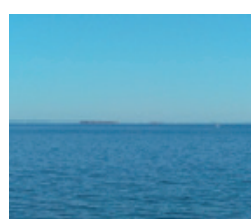


> Mise en place d'un système qualité encadrant l'ensemble des méthodes de levés 3D de la démarche commerciale jusqu'au produit fini
Joseph LALOIX 20

Cartographie

> Pourquoi le rendu des zones rocheuses sur les nouvelles cartes IGN est-il si différent de l'ancien ?
Paul COURBON - Dominique FOUBERT 27

Géodesie



> Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : utilisation concrète et simulations de levés bathymétriques au sonar multifaisceaux
Thomas TOUZÉ 31

Compensation

> L'orthogonalisation généralisée une solution algorithmique au problème des moindres carrés
Joël VAN CRANENBROECK 37

Histoire

> L'expédition scientifique de Jean Richer dans l'île de Cayenne
Laurent POLIDORI 46

Topo vécue



> Le cheminement du douzième parallèle (deuxième partie)
Jean-Claude LEBLANC 53

Art et géométrie

> Nathalie Talec : la Route de l'écho
Jean-Pierre MAILLARD 62

Ouvrages

André BAILLY 64

GSF

> Une problématique émergente dans celle de la formalisation du foncier : l'agriculture urbaine
Claire GALPIN 67

Pour la recherche de nos annonceurs, consulter la p. 66

PROCHAIN XYZ - n° 173
Détermination de coordonnées de station sur plan coté

THE FUT URE IS|TRK

AUTONOME.
INTELLIGENT.
SIMPLIFIÉ.



leica-geosystems.fr

L'avenir de la cartographie mobile



©2018 Hexagon AB and/or its subsidiaries and affiliates.

Leica Geosystems is part of Hexagon. All rights reserved.

Leica
Geosystems

Le conseil de l'association renouvelé

Nos adhérents ont suivi l'actualité associative de juin dernier et noté les événements qui la ponctuent : l'élection des membres du conseil et l'assemblée générale annuelle. Je vous laisse découvrir le rapport moral présenté à cette assemblée générale le 16 juin 2022 à trouver en *page 12*, il remémore l'année 2021.

L'élection bisannuelle a mis en évidence que trois conseillers ne se sont pas représentés à la fin de leur mandat. Pierre Grussenmeyer, Jean-Pierre Maillard et Stéphane Durand ont souhaité mettre fin à leur rôle de conseiller, un engagement qui n'était plus compatible avec leurs emplois du temps. Le conseil les remercie pour les actions menées pendant les nombreuses années de présence active au conseil, respectivement vingt-quatre, dix-huit et six années. Ils promettent néanmoins de continuer à participer à la vie de l'AFT, et notamment à la rédaction de notre revue XYZ en tant que relecteur, membre de comité de rédaction, voire auteur.

En revanche, Tania Landes, Françoise Duquenne et Élodie Sissler arrivées au terme de leur mandat de six ans se sont représentées et ont été réélues. Le conseil leur adresse ses félicitations et leur souhaite un fructueux nouveau mandat.

Trois postes de conseiller restaient donc en lice. Ils ont été pourvus par Thomas Touzé, Philippe Sablayrolles et Élisabeth Gardon. Nous les accueillons avec plaisir et souhaitons que, nouveaux élus, ils trouvent leur pleine place au sein du conseil. Deux autres candidats, Antoine Zakhary et Pierre Procureur, n'ont pas eu la faveur des électeurs. Le conseil ne peut que les encourager à penser à renouveler leur candidature pour les prochaines élections de 2024.

Le conseil du même jour a élu le nouveau bureau désormais composé de huit membres. En faisant l'unanimité, Françoise Duquenne conserve la présidence de l'association, tandis que Bernard Flacelière et Matthieu Koehl l'assistent en tant que vice-présidents. Ghyslain Ferré est promu secrétaire général, Élodie Sissler assurant le poste de secrétaire générale adjointe. Michel Trouillet et Jean-Michel Richer restent respectivement aux postes de trésorier et trésorier adjoint. Enfin Tania Landes garde la direction des publications, toujours assistée de son adjoint Flavien Viguié. Pour en savoir plus sur l'organisation de l'AFT, le lecteur pourra se rendre sur notre site Internet <https://www.aftopo.org/> à la page "Qui sommes-nous ?". Il trouvera la liste des dix-huit membres du conseil, le nom des trois membres honoraires, les rôles ou attributions de chacun, la composition des différentes commissions ainsi que les noms des chargés de mission.

Quand vous recevrez votre revue et lirez cet éditorial, si aucune pandémie ni aucune tragédie géopolitique ne contrarie les activités mondiales, l'AFT aura été présente au congrès de la fédération internationale des géomètres (FIG) à Varsovie, aux GeoDataDays au Futuroscope de Poitiers et aux 19^e journées de la topographie à l'INSA Strasbourg. Les événements professionnels qui suivront durant le dernier trimestre sont listés en *page 10*, avec en point d'orgue le 17^e forum de la topographie le 17 novembre, au lycée des métiers Gaudier-Brzeska à Saint-Jean-de-Braye, près d'Orléans, où nous vous donnons rendez-vous. Le thème choisi est l'intégration de solutions connectées sur les chantiers et nous prévoyons salon et conférences à la hauteur du sujet. Pour en savoir plus, actualité, programme, renseignements pour les exposants et les participants, visitez notre site Internet et la billetterie <https://www.billetweb.fr/forum-aft>.

Nous vous souhaitons, chers adhérents, partenaires annonceurs et professionnels, une très bonne rentrée en compagnie de votre revue XYZ.

Pour le conseil de l'AFT,
Bernard Flacelière, vice-président et rédacteur en chef.

■ Appel à projet IA pour les territoires

Le ministère de la Transition écologique a lancé la constitution d'une communauté des acteurs mobilisant l'IA pour les territoires et d'un appel à projet France 2030. L'objectif de cette communauté est de se regrouper pour mener des réflexions autour du fort potentiel de l'IA au service des besoins des territoires. L'appel à projet vise, quant à lui, la création de démonstrateurs d'IA dans les projets de transition écologique dans les territoires.

L'ambition du ministère est d'animer une communauté qui réunirait les acteurs privés et publics pour définir des priorités d'actions, par exemple, les retours d'expérience, l'accès à l'expertise, la mutualisation par des échanges croisés, sur toutes les missions qu'une collectivité peut rencontrer (à l'exception du social et de la sécurité) : mise en avant de la ville durable, les bâtiments (existants), la mobilité, l'économie circulaire, la participation citoyenne...

► Pour plus d'informations, consulter les événements du site de l'AFIGEO : <https://www.afigeo.asso.fr/>

■ Sogelink-Geodesial Group devient Sogelink



En 2021, Sogelink et Geodesial Group (avec ses filiales Geomedia, Geomensura et Bloc in Bloc) fusionnaient afin de proposer aux clients une combinaison unique de solutions logicielles. Dorénavant, les deux groupes sont réunis sous une seule et même bannière "Sogelink".

► Lien : <http://gdr-magis.imag.fr/>

■ ERRATA - XYZ 171 - l'article sur le 12^e parallèle de Jean-Claude Leblanc

1 - En page 59, en haut de la 3^e colonne, on parle de HG = l'heure de Greenwich en TU à l'instant de l'observation ; Il faut comprendre HG = HSG (heure sidérale Greenwich) à l'instant de l'observation avec HSG = HSG à 0h TU (donnée par les tables) plus conversion de l'heure TU, de l'instant de l'observation, en TS. Nous remercions Frédéric Weber pour sa pertinence.

2 - En page 62, en bas de la colonne centrale, Jean-Claude mentionne Pharo dans Le satellite Pharo aura une précision... Il corrige ici le nom du satellite en PHARAO, l'acronyme de projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite.

■ Nouveau Leica Pegasus TRK

Leica Geosystems a présenté l'introduction du système de cartographie mobile de capture de la réalité Leica Pegasus TRK, introduisant l'intelligence artificielle, des flux de travail autonomes et des interfaces intuitives. La numérisation 3D dynamique avancée



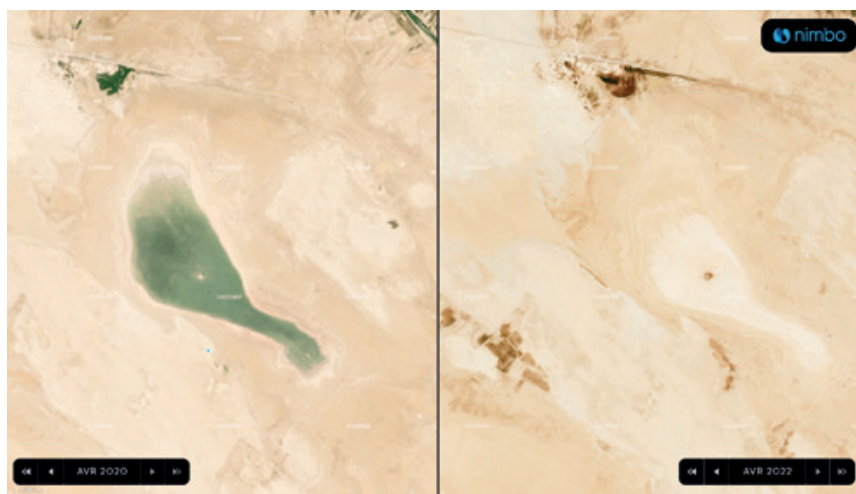
et le système d'imagerie extensible pour l'enregistrement, la mesure et la visualisation des environnements augmentent la productivité grâce à des flux de travail automatisés et intelligents. Le Pegasus TRK peut être utilisé par une seule personne, ce qui rend les projets de cartographie plus efficaces et plus rentables. La solution Pegasus TRK comprend une caméra améliorée par l'IA et un calibrage automatique de la caméra. Pour se conformer aux réglementations en matière de confidentialité, son IA peut détecter et brouiller les identifiants, tels que les personnes et les véhicules, en temps réel.

► Pour en savoir plus : <https://leica-geosystems.com/fr-fr/products/leica-pegasus-trk>

■ Sécheresse et crise de l'eau en Irak révélée par l'imagerie satellite

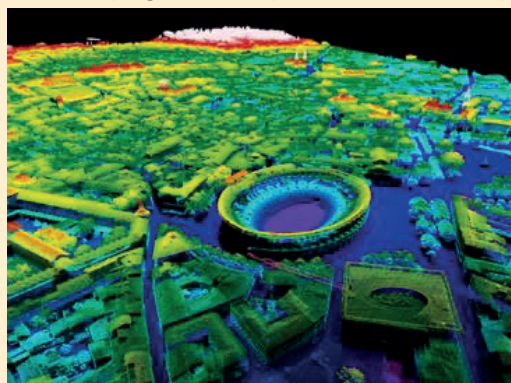
À l'occasion de la Journée mondiale de lutte contre la désertification et la sécheresse (17 juin 2022), la société Kermap a mis en lumière, à travers sa plateforme Nimbo Maps, la situation critique que traverse l'Irak. Le pays a ainsi vu ses surfaces en eau chuter de 50 % ces deux dernières années, selon les calculs dérivés de l'imagerie satellite. Les répercussions sont multiples, notamment sur le secteur agricole, dont les surfaces irriguées ont été divisées par quatre en seulement trois ans. Au total, ce sont même deux tiers des surfaces végétalisées de ce pays grand comme la France qui ont disparu en trois ans."

► Lien : <https://maps.nimbo.earth/>



Lac Sawa, avril 2020 vs avril 2022

■ Cartographie de la France en 3D : un dispositif d'accompagnement pour favoriser l'exploitation des données LiDAR



Pour faciliter l'exploitation des données LiDAR et favoriser l'émergence de projets innovants, l'IGN propose un dispositif d'accompagnement et lance l'appel à projets IGNfab "Donne du relief à tes projets avec les données LiDAR", destiné aux start-up et aux PME. Un "bac à sable" ouvert à tous permet aux utilisateurs de se familiariser, d'interagir et de télécharger les données LiDAR acquises dans le cadre

du programme national LiDAR HD. Il est ainsi possible de découvrir les premières données brutes du programme LiDAR HD sur la zone de Nîmes (10 points/m² en moyenne) ainsi que des données LiDAR de moindre densité sur diverses zones géographiques (urbain, forestier et littoral).

Pour faire vivre le processus de publication de données et favoriser l'utilisation des données LiDAR dans une boucle d'amélioration continue, l'institut ouvre un espace d'échange avec les utilisateurs des données et prépare un LiDAR Tour National qui permettra de construire des temps d'échanges privilégiés autour de cas d'usage spécifiques, et avec les communautés, dans plusieurs régions en France.

► Les résultats des acquisitions Lidar aéroportées sont progressivement diffusés en open data sur le site <https://geoservices.ign.fr>.

■ EXAGONE TERIA Société à mission



Société à mission depuis le 30 août 2021, EXAGONE TERIA rejoint la Communauté des sociétés à mission et ses

680 entreprises labellisées. Initiée par les géomètres-experts pour créer un service de géolocalisation de précision par GPS, TERIA a enrichi son activité par une démarche sociétale et environnementale. La qualité de société à mission a été introduite par la loi PACTE et permet à une entreprise de déclarer sa raison d'être à travers plusieurs objectifs sociaux et environnementaux.

■ L'intégrité des signaux GNSS : un enjeu sociétal majeur !

Dans sa lettre d'informations de juillet 2022, le service de géodésie et de métrologie de l'IGN met l'accent sur l'enjeu sociétal que représente l'intégrité des signaux GNSS.

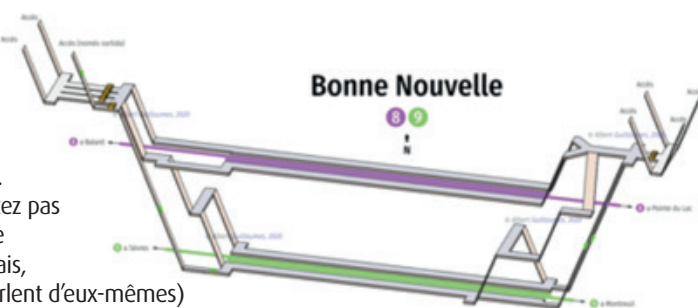
Les utilisations de ces signaux sont de plus en plus larges et grand public, en particulier avec l'intégration des puces GNSS dans de nombreux outils tels que les smartphones. La contrepartie est une dépendance accrue de la société à ces services, parfois pour des activités d'importance vitale. Ces signaux sont sensibles à de nombreuses perturbations naturelles ou artificielles (brouillage, leurrage). Dans le but d'analyser ces phénomènes, la société FDC a été mandatée par la Fédération de Recherche FIRST-TF, réseau national des acteurs de la métrologie du temps et des fréquences, en collaboration avec le ministère de la Transition écologique et solidaire, pour conduire une étude destinée à permettre une meilleure compréhension des effets d'une altération des signaux GNSS sur le fonctionnement de certains secteurs d'activité d'importance vitale (SAIV).

► Plus d'informations : <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=geodinfo>

■ Des stations de métro en 3D

Si vous êtes perdus dès que vous prenez le métro, peut-être que des représentations graphiques en 3D peuvent vous aider. Dans ce cas, n'hésitez pas à aller visiter ce site (en catalan et anglais, mais les dessins parlent d'eux-mêmes) très visuel.

► Lien : <http://stations.albertguillaumes.cat/>



■ Partenariat ESGT - CFS de Thiès (Sénégal)

Depuis une quinzaine d'années, l'ESGT/CNAM et son partenaire Le Mans Université, dispensent une licence professionnelle Travaux Publics Géomètres et Aménagement sur son site du Mans. Cette année, un nouveau partenariat a été initié avec le CFS (Campus franco-sénégalais) de Thiès. Une première promotion a suivi l'école de terrain dans la réserve naturelle de Popenguine en liant études topographiques et géologiques.





■ L'IA pour une description plus rapide de l'occupation du sol

L'occupation du sol est un enjeu clé de la transition écologique. À la demande du gouvernement, l'IGN s'est lancé dans un programme de production de données automatisées par intelligence artificielle (IA). L'objectif est de livrer des données d'occupation du sol cohérentes au niveau national, à intervalle rapproché et en concertation étroite avec les territoires, pour une couverture France entière d'ici 2024. Les premières ressources sur le département du Gers (32) sont aujourd'hui disponibles. Dans le cadre de l'Observatoire de l'artificialisation des sols, l'IGN, en collaboration avec le CEREMA et l'INRAE, produit un référentiel de données géographiques pour décrire l'occupation et l'usage des sols selon la nomenclature OCS GE (Occupation du sol à grande échelle). L'IGN mise sur l'IA pour automatiser cette production. C'est notamment la puissance des méthodes d'apprentissage profond (*deep learning*) qui permet de reconnaître automatiquement des objets (bâtiment, arbre, surface de bitume...) contributifs des classes d'occupation des sols sur des images aériennes ou spatiales. Au-delà du produit final, l'IGN met à disposition en open data toutes les ressources qui contribuent au processus automatisé. Concrètement, dès à présent, depuis le site géoservices, chacun peut accéder aux annotations (données permettant d'entraîner les modèles *deep learning*), aux jeux de données *deep learning*, aux modèles IA et codes informatiques associés, aux cartes de prédictions *deep learning*.



Identification automatique de la couverture des sols grâce à l'IA, Auch (32)

©IGN

■ Projets Centipède

Centipède RTK est un réseau collaboratif de bases GNSS ouvertes et disponibles pour toute personne se trouvant dans la zone de couverture. Le réseau est étendu par des instituts publics, des particuliers, des acteurs privés comme les agriculteurs ou d'autres partenaires publics. L'objectif du projet est d'offrir une couverture complète du territoire métropolitain. Il est soutenu financièrement par INRAE et a bénéficié, dès son démarrage en 2019, de moyens mutualisés entre des instituts de recherche, des organismes publics, des agriculteurs et des entreprises privées.

► Plus d'informations : <https://centipede.fr/>



**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**

Hommage à Louis Tschaen, parti le 10 avril 2022 à l'âge de 97 ans

■ Tania LANDES – Denis TSCHAEN

Qui n'a pas connu M. Tschaen ? M. Tschaen était un contributeur de la revue XYZ, non seulement au travers de la rédaction d'articles qui relataient ses recherches, mais aussi de sa relecture scrupuleuse de toute publication de l'AFT. Il aura exercé le métier de professeur de géodésie, d'astronomie, d'instruments et méthodes topométriques et de cartographe à l'ENIS, devenue ENSAIS et aujourd'hui INSA Strasbourg. Sa patience, sa rigueur et son exigence étaient ressenties par tous ses élèves et ses connaissances. M. Tschaen était connu également pour ses analyses astronomiques et essais d'interprétation du fameux phénomène du rayon vert de la cathédrale de Strasbourg, découvert par Maurice Rosart. La disparition de M. Tschaen, en avril 2022, aura étrangement coïncidé avec celle du vitrail au travers duquel le faisceau "vert" se diffractait. L'encre s'arrêtera de couler...

Après sa retraite, M. Tschaen rendait régulièrement visite aux enseignant·e·s de la spécialité topographie de l'INSA Strasbourg, que ce soit pour discuter d'un plan cadastral ou pour reprendre la mise en page de certains de ses écrits ou simplement pour partager avec eux ses souvenirs (figure 1), en particulier ses mémoires de guerre. Cette guerre, sa captivité en Sibérie et surtout ses camarades de guerre, il en parlait avec tant d'émotion... Il se souciait également du devenir des anciens élèves, du niveau

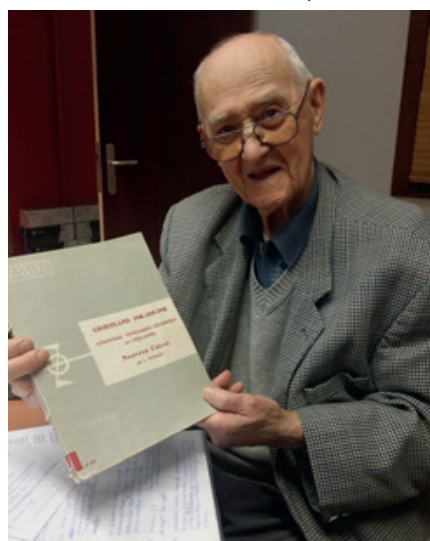


Figure 1. Louis Tschaen présente l'ouvrage sur le Groenland lors de contacts avec Jacqueline, la fille de Jean Bourgoin (mars 2016).

actuel des jeunes recrues, il s'intéressait à l'évolution de la formation, à l'intégration des nouvelles technologies dans les enseignements. Il chérissait tant son école dont il est sorti diplômé en 1949.

M. Tschaen était une personne érudite, qui menait inlassablement de longues et intenses recherches aux archives départementales, au point de se spécialiser de façon inégalable dans l'histoire des cadastres du XVIII^e et du XIX^e siècle. Sa passion pour la topographie n'avait pas de limite.

Né le 22 août 1924, M. Tschaen allait fêter ses 98 ans. Il aura laissé derrière lui des centaines de kilomètres de lignes d'écriture aussi bien d'articles scientifiques que de mémoires personnelles.

Sa vie ne fut pas commune. Grâce à son fils, nous avons pu rassembler des éléments sur sa vie et ses écrits, qui, vous vous en doutez, ne constituent qu'une infime partie des documents qu'il aura laissés derrière lui. Vous admirerez le niveau de détail des informations composant son curriculum vitae.

L'ensemble des enseignant·e·s topographes de l'INSA Strasbourg ainsi que les membres du Conseil de l'AFT adressent leurs sincères condoléances à la famille, amis et aux proches de M. Tschaen.

Curriculum vitae de Louis Tschaen

- 1924 : naissance à Colmar le 22 août, fils de Louis Tschaen, boulanger à Traubach-le-Haut et ensuite à Kaysersberg, (1898-1934) et de Marie Eugénie Haas (1897-1967). Enfance et adolescence passées à Kaysersberg ;
- 1928-30 : fréquentation de l'école maternelle de Kaysersberg, appelée à l'époque "salle d'asile", sous la direction de sœur Paulina ;
- 1930-36 : fréquentation de l'école communale de Kaysersberg (maîtres : Mme Cohard, MM. Bourgeois, Weck, Frey, Moeglin, Sonntag) ;
- 1934 : le 4 juillet, décès de papa (36 ans).

Formation secondaire classique

- 1936-39 : étude secondaire classique (allemand, latin, grec) au collège de Zillisheim : professeurs de classe : abbés Koenig (5^e), Bordmann (4^e), Grasser (3^e) ;
- 1939-40 : continuation (2^e) au Préventorium de Marbach (professeur de classe : abbé Gentine) ;
- 1940 : l'Alsace est envahie et occupée par l'armée allemande et l'administration nazie s'installe dans le pays avec toutes ses contraintes ;
- 1940-42 : poursuite des études secondaires classiques au Martin Schoengauer Gymnasium à Colmar : (7^{te} und 8^{te} Klasse, allemand, anglais, latin, grec), mais en langue allemande ; professeurs de classe : MM. Buch et Sailer ; en juin 1942, passage de l'*Abitur*, l'équivalent allemand du baccalauréat français (*Reifeprüfung*).

Guerre et incorporation de force, formation militaire, campagne d'Ukraine, captivité en URSS

- 1942, octobre : incorporation dans le service obligatoire du travail (*RAD*). Camp de Wittmundhafen, à proximité de la mer du Nord ;
- 1943 : le 16 janvier, incorporation de force dans l'armée de terre allemande ; formation militaire à Hollabrunn et Horn en Autriche et à Znaïm en Tchécoslovaquie ;
- 1943 : le 1^{er} novembre, départ pour le front de l'Est en Ukraine ;
- 01.12.43 : installation dans les tranchées de la ligne du front dans la tête de pont de Nikopol au-delà du Dniepr ;
- 02.02.44 : abandon de cette tête de pont, traversée du Dniepr sous le feu des canons soviétiques, installation à Dutchino, sur la rive droite du Dniepr ;
- 10.03.44 : nouveau repli et retraite pour atteindre la rive droite du Bug, atteinte le 17.03 ;
- Fin mars : nouveau repli et retraite pour éviter un encerclement, traversée du Dniestr le 13.04 et arrivée en Roumanie (Bessarabie) : repos, reconstitution de l'unité et formation ; retour au front dans la tête de pont de Pererita-Kochinitza près de Waduluwoda, et ensuite, plus au nord dans la région d'Orchei ;
- 23.08.44 : nouvelle retraite par Kischinew pour cause d'encerclement ;
- 30.08.44 : prisonnier (*wojna pleni*), retour à pied à Kischnew, et ensuite, à Tiraspol ;
- 23.09.44 : embarquement en wagon fermé de chemin de fer, voyage en passant par Moscou, Samara, Oufa, Oural ;
- 20.10.44 : camp de prisonniers de guerre à Urschumka dans l'Oural sur le bord de la Sibérie ; travail dans une carrière de granit, terrassement par -20°C, travaux dans un kolkhoze ;
- 18.05.45 : transfert par train dans un camp à Tscheliabinsk ;
- 12.10.45 : départ du voyage de retour en chemin de fer ;
- 09.11.45 : arrivée à Francfort-sur-Oder, et ensuite, séjour dans un hôpital ;

- 24.11.45 : départ de Francfort-sur-Oder ;
- 01.12.45 : arrivée à Fallersleben dans un camp anglais ;
- 06.12.45 : après un passage en Belgique, arrivée à Strasbourg où nous sommes rapatriés, et ensuite, démobilisés ;
- 07.12.45 : retour à la maison après 2 ans et 3 mois d'absence, dont 15 mois sans nouvelles de ma part pour ma famille.

Formation technique de géomètre

- 1946-47 : stage au service du Génie rural et de l'Hydraulique agricole du Haut-Rhin à Colmar (10 mois) ;
- 1947-49 : formation technique en section des géomètres de l'ENTS, l'École nationale technique de Strasbourg (*figure 2*) ; en juillet 1949 : obtention du diplôme d'ingénieur géomètre ;
- 1949 : emploi dans le cabinet de l'architecte Lewandowski à Kaysersberg (3 mois) ;
- 1950 : emploi dans l'entreprise de travaux topographiques ETNA à Tunis (4 mois) ;
- 1950-53 : topographe au service topographique de Tunisie (2 ans et 8 mois) ;
- 1952 : le 6 octobre, mariage à Kaysersberg avec Antoinette Marie Burgard (1916-2003) ;
- 1953-56 : stages par période de 3 mois pendant les vacances scolaires d'une durée totale d'un an dans le cabinet

de géomètre de M. Dingler ;

- 1957 : examen et diplôme de géomètre-expert DPLG.

Professeur à ENSAI Strasbourg

- 1953-62 : enseignant (professeur adjoint des ENIAM) chargé des travaux pratiques de topographie et des cours de dessin de plan à l'École nationale d'ingénieurs de Strasbourg (ENIS) ;
- 1953 : le 16 septembre, naissance d'un fils, Denis Henri Tschaen ;
- 1957-60 : collaboration avec Albert Bauer, ancien professeur, secrétaire général de l'EGIG, dans le domaine des études glaciologiques et géodésiques sur l'Indlandsis du Groenland, sur l'île de Kerguelen et le glacier de l'Argentièrre (*figure 4*). Première publication sur l'astronomie et le nivellement géodésique sur l'Indlandsis du Groenland 1948-1950 chez les Expéditions polaires françaises, Missions Paul-Émile Victor : "*Groenland 1948-1949-1950. Astronomie-Nivellement Géodésique sur l'Indlandsis. Nouveau calcul.*" ;
- 1959 : le 3 février, naissance d'une fille, Marie Brigitte Tschaen ;
- 1962-87 : professeur à l'ENIS, puis ENSAIS (*figure 3*) ; chargé des cours d'instruments et méthodes topométriques, de géodésie, d'astronomie de position, de tracé d'axes et de cartographie, chargé de l'accompagnement des élèves de classe terminale dans leur voyage d'études annuel et du



Figure 2. Travaux pratiques à l'ENTS, Louis Tschaen est à droite.



Figure 3. Louis Tschaen en 1967.

suivi des stagiaires de 4^e année de l'ENSAIS. En 1975 et 1978, deux missions pédagogiques à l'École d'ingénieurs d'Arzew (Algérie) et, en 1981, une mission pédagogique à l'École d'ingénieurs de Bamako (Mali) ;

- 24.12.67 : décès de maman ;
- 1987 : retraite.

À la retraite

- formation en généalogie et en paléographie régionale ;
- travaux de recherches suivis de publications (une centaine d'articles et ouvrages) dans divers domaines tels que :
 - les phénomènes lumineux de la cathédrale de Strasbourg (10 articles) ;
 - recherches généalogiques ;
 - dépouillement d'actes notariés des XVII^e et XVIII^e siècles (24 fascicules) : jusqu'en 2006, dépouillement de 12 061 actes contenus dans 321 cartons ou liasses rangés sur 29 mètres linéaires, résumés et publiés en 20 fascicules comportant au total 3 061 pages publiées par le Cercle généalogique de Mulhouse ;
 - diverses études historiques dont les sujets sont inspirés des actes notariés dépouillés ;
 - études relatives à la profession de géomètre ;
 - le cadastre de la province d'Alsace du XVIII^e siècle ;
 - l'économie des communautés de la province d'Alsace aux alentours de 1760 ;

- les cadastres napoléoniens d'Alsace du XIX^e siècle ;
- les cours domaniaux en Alsace ;
- la collaboration à la rédaction du dictionnaire technique multilingue (allemand-anglais-français) en 15 volumes de la Fédération internationale des géomètres dans le cadre de l'Association française de topographie, etc. Les thématiques abordées sont calcul de compensation, géodésie, établissement des réseaux de base, instruments géodésiques et topographiques, topographie, photogrammétrie, levés hydrographiques, topométrie souterraine, généralités.

M. Tschaen avait transmis à certains d'entre nous des fascicules reprenant, sous forme de notes de lectures, des ouvrages qu'il avait particulièrement appréciés, tels que celui de Janine Casevecchie, publié aux éditions Hachette Livre en 2008 et intitulé *"Une idée de bonheur par jour"*. Le dicton correspondant au jour de sa disparition, le 100^e jour de l'année, est un joli clin d'œil qu'il nous fait : *"Ce n'est pas dans la science qu'est le bonheur, mais dans l'acquisition de la science (Edgar Allan Poe)"*. ●

Des calculs sur l'ellipsoïde

De 1985 à 1987, je travaille sur les parties géodésie et cartographie de développements informatiques intégrés dans une suite de logiciels de Géosciences. Les anciens reconnaîtront les termes HP9000, Unix, Fortran 77, GKS, etc. Elf Aquitaine et Total sont associés sur le projet. Pour les calculs des coordonnées des limites de permis de recherches et leurs représentations cartographiques, nous avons besoin de modules de calcul sur l'ellipsoïde, calculs directs et inverses sur géodésiques et loxodromies, intersections de géodésiques, de loxodromies, échantillonnages suivant ces courbes. Je pense alors à l'ENSAIS et à mon professeur Tschaen qui accepte le travail dans un cadre entreprise-école, nous met en relation avec le professeur Annoni pour la partie informatique et avec le jeune diplômé Jean-François Bécan (toujours adhérent à l'AFT). Les algorithmes sont rédigés par Louis Tschaen tandis que Jean-François Bécan écrit les lignes de Fortran. Les résultats à obtenir lors des tests sont calculés par M. Tschaen à l'aide d'une calculatrice scientifique de poche. Les codes des sous-programmes ont été portés ensuite par Elf Aquitaine vers différents supports et applications, en langage C et suivants. Je garde un excellent souvenir de ces travaux.

Bernard Flacelière



Figure 4. Depuis le glacier d'Argentières, Louis Tschaen prend un nouveau départ dans nos souvenirs.

Hommage à Jean Denègre

Je me souviens de Jean Denègre qui fut l'un des pères de la géomatique française, un promoteur infatigable des applications nouvelles à l'IGN, puis au Conseil national de l'information géographique avant de diriger notre ENSG dans ses nouveaux locaux de la Cité Descartes, lui qui avait fait l'X sur la montagne Sainte-Geneviève, rue Descartes. Lui qui réussit l'exploit de voler la vedette à l'ENPC en ce début octobre 1997, avec Jean Poulit, captant l'attention du président de la République et du ministre de l'Équipement du tout récent gouvernement de cohabitation qui allait durer cinq ans et qui, le 30 janvier 1999, reviendrait au grand complet à Marne-la-Vallée tenir un séminaire de travail dans notre Centre de documentation scientifique. Je me souviens de Jean accueillant tout sourire Lionel qui le dépassait d'une bonne tête, Martine Aubry, Élisabeth Guigou, Claude Allègre, Jean-Pierre Chevènement, Hubert Védrine, Dominique Strauss-Kahn, Alain Richard, Jean-Claude Gayssot à nouveau, Catherine Trautmann, Jean Glavany, Dominique Voynet, Daniel Vaillant, Émile Zuccarelli, Marie-Georges Buffet, Pierre Moscovici, Ségolène Royal, Charles Josselin, Claude Bartolone, Jean-Jacques Queyranne, Bernard Kouchner, Louis Besson, Christian Sautter, Marylise Lebranchu, Christian Pierret de St-Dié



(où nous sommes présents au Festival de Géo sans interruption depuis cette date, à la demande de Jean), Jean-Pierre Masseret, Michelle Demessine, bref la gauche plurielle de l'époque... Je me souviens, quelques années plus tard, lui avoir fait visiter la cartothèque avec son ami Jean-Claude Drouot, alias Thierry-la-Fronde, l'idole des jeunes de mon âge... qui joue également dans un court-métrage de Jean intitulé Sixtine : https://youtu.be/BbV-Sms_0Ww. Enfin je me souviens aussi d'avoir présenté, à sa demande, les nouveaux bâtiments de Saint-Mandé au cercle de l'Ordre national du Mérite dont il faisait partie en toute modestie. Tout cela, ajouté à ses incontestables qualités humaines appréciées autant par ses collègues tout au long de sa carrière que par ses amis randonneurs de l'IGN ou d'ailleurs au temps de la retraite, méritait bien que je lui rende cet hommage dans les colonnes de XYZ.

Bernard BÈZES

Président de l'Association des retraités de l'IGN

Agenda des manifestations 2022

■ 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'événement digital, par esri France <https://www.geo-evenement.fr/>

■ Du 18 au 20 octobre, INTERGEO Hybrid, Essen

<https://www.intergeo.de/en>

■ Du 8 au 10 novembre, colloque G2, Géodésie, géophysique et montagne, Grenoble <https://g2-grenoble.sciencesconf.org/>

■ 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/>

■ Du 15 au 16 décembre, ISPRS Optical 3D Metrology workshop et LowCost 3D workshop, Wuerzburg, Allemagne <https://o3dm.fbk.eu/> et <https://lc3d.fbk.eu/>

■ Du 17 au 19 janvier 2023, 50^e congrès ATEC ITS France, transports, environnement, circulation, Paris, beffroi de Montrouge <https://congres.atec-its-france.com/>

Olivier Reis

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

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

Reinhard Stölzel

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

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

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service

Jeudi 13 octobre

Cercle Géo 2022

ESGT | 1 boulevard Pythagore, Le Mans

~ Conférences (10/15min) ~



De 8h30 à 12h30

~ Pause déjeuner ~



De 12h30 à 14h

~ Stand (+ présentation) ~



De 14h à 18h

~ Stage Dating ~



De 14h à 18h

Thème de l'année

Imagerie 3D

Ils seront présents :



Étudiants



Professionnels



Institutions



Enseignants

Inscriptions pour les entreprises et / ou ⊕ d'informations :

→ **cerclegeo@supgeto.com** ←

Tarifs entreprises : Conférence 300 € // Stand (+ présentation) 300 € //
Stage Dating **gratuit**

Source image : IGN

Rapport moral de l'année 2021 présenté à l'assemblée générale de l'AFT le 16 juin 2022 en présence à l'ENSG et visioconférence

L'assemblée générale précédente s'est tenue le 17 juin 2021 par visioconférence. Aujourd'hui, les conditions sanitaires s'étant améliorées, une assemblée générale en présentiel a pu être organisée à l'ENSG, que nous remercions par la même occasion. Profitant de l'expérience acquise durant ces dernières années, cette AG peut également être suivie à distance.

Une nouvelle année est donc passée et cette assemblée générale nous donne l'opportunité de refaire un bilan des principaux faits qui ont marqué la vie de l'AFT durant l'année 2021. Pour pouvoir suivre plus facilement les évolutions, nous reprenons les mêmes thématiques que les années précédentes.

Le fonctionnement administratif

■ Fonctionnement

Fin 2021, l'AFT comptait 375 adhérents 56 abonnés (contre 381 et 59 en 2020). L'AFT compte parmi ses activités principales la gestion de plusieurs publications dont la revue trimestrielle XYZ, la lettre numérique d'actualités (normalement diffusée trois fois par an, mais qui a rencontré quelques difficultés de parution en 2021), un lexique ainsi que quelques ouvrages de référence. L'AFT est également impliquée dans d'autres associations et organismes. Après un forum annuel reporté à plusieurs reprises et qui n'a finalement pas pu se tenir en 2020 du fait de la crise sanitaire de la Covid-19, le forum a pu à nouveau être organisé et tenu en novembre 2021.

Les activités reposent toujours sur un secrétariat salarié à temps partiel, sur un conseil composé de membres bénévoles et actifs, sur une messagerie électronique omniprésente, à présent également sur des visioconférences, sur un site Internet refondu et sur sa présidente énergique, son rédacteur en chef toujours à l'affût et son trésorier toujours appliqué et plein de ressources.

Du côté du secrétariat, la gestion du courrier, des facturations, les inscriptions

et les relances des adhésions et abonnements sont les fonctions vitales.

Les séances des Conseils commencent par une revue des actions décidées et de l'application de ces décisions avec toujours ce même but d'amélioration continue.

L'AFT repose également sur son organisation et sa structure. En 2021, année impaire, il n'y a pas eu de renouvellement du bureau de l'AFT.

■ Modification du règlement intérieur

Quelques propositions de modification du règlement intérieur ont été faites par Emmanuel Natchitz, Bernard Flacelière et Françoise Duquenne avec des commentaires émis par Jean-Pierre Maillard sur le règlement du Prix de l'AFT, une suppression de contribution à un abonnement Internet, notamment.

■ Site web :

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

En 2020, un groupe de travail, piloté par Françoise Duquenne a activement fait avancer un premier projet de refonte du site web pour arriver à la mise en place d'un nouveau site conçu par la société Intercept.

Nous rappelons dans ces lignes que les sommaires des revues XYZ peuvent

être téléchargés. Les articles ou des revues complètes au format numérique peuvent aussi y être achetés. Les articles de plus de deux ans sont disponibles à tous. Les adhérents peuvent télécharger gratuitement les numéros de l'année et de l'année précédente en étant à jour de leur cotisation.

La rubrique "Qui sommes-nous ?" reprend l'organisation de l'AFT, La rubrique "Revue XYZ" permet la recherche et l'achat d'articles, voire de revues complètes,

La rubrique "Ouvrages" donne l'accès à la boutique proposant l'achat des livres et fascicules de référence, La rubrique "Agenda" rappelle les grands événements de l'année, Enfin, le "Lexique" et l'espace d'adhésion en ligne sont accessibles.

Mais les relations avec la société en charge du site web ne sont pas idéales, cette dernière ne répondant finalement plus aux attentes de l'AFT.

Une nouvelle mission de transfert cette fois du site web a été amorcée en 2021. Celle-ci doit, dans un premier temps étudier la nécessité de transférer le site chez un autre hébergeur en examinant les avantages et inconvénients, puis, si l'étude est positive, faire une étude technique et économique d'un tel transfert en envisageant plusieurs options, pour enfin procéder au transfert. Cette mission est assurée par Flavien Viguier, Pierre Assali, Tania Landes et Mathieu Koehl.

■ Forum 2021

Le forum, initialement prévu le 26 mars 2020, a été reporté au 5 novembre 2020, puis encore reporté au 6 mai 2021, puis... le forum a finalement pu avoir lieu à Égletons le 18 novembre 2021.



L'AFT n'aurait que difficilement supporté un report supplémentaire.

Les retours ont été satisfaisants avec 27 stands.

Nous avons compté environ 400 visiteurs tout au long de la journée et plus de 70 exposants et invités.

6 ou 7 publiereportages ont accompagné ce forum.

Les adhésions et comptes financiers

Au 31 décembre 2021, les relances ciblées ainsi que l'arrivée de quelques nouveaux adhérents ont permis de conserver un nombre d'abonnés/adhérents relativement stable : 436.

La situation financière de l'Association est restée saine, voire légèrement renforcée en 2021 (cf. rapport financier) grâce au forum enfin réorganisé, à des reports, une limitation des déplacements et une bonne gestion des nombres de tirage de la revue XYZ.

Les mouvements atteignaient quelques 70 k€ en 2021 avec encore un bilan positif de l'ordre de 3 600 €.

Nous remercions ici Michel Trouillet, notre trésorier, pour le suivi très rigoureux de l'état des finances de l'AFT.

L'AFT remercie également très chaleureusement Samuel Guillemin, Bernard Flacelière et Flavien Viguier pour la poursuite des partenariats, notamment pour la revue XYZ.

Les Conseils

L'association a tenu quatre conseils en 2021, tous tenus en visioconférence ou de manière hybride :

- le 18.03.2021 : le Conseil n° 149 ;
- le 17.06.2021 se sont tenus l'Assemblée générale et le Conseil n° 150 ;
- le 23.09.2021 : le Conseil n° 151 ;
- enfin, le 16.12.2021 : le Conseil n° 152.

La participation des membres du Conseil reste satisfaisante, le quorum était atteint à chaque séance, notamment grâce à des participations par visioconférence et avec des procurations.

Au cours des séances, le Conseil, après débat, décide des actions principales engagées par l'Association :

- Les séances commencent par un point sur les actions décidées lors des conseils précédents ;

- Le point sur la situation financière de l'AFT est incontournable. Après les propositions de budget prévisionnel, le trésorier fait les bilans successifs des comptes permettant de suivre l'évolution des recettes et des dépenses pour tendre vers un budget équilibré ;
- L'état d'avancement et les prévisions de publication de la Revue XYZ, notamment les articles et rubriques sont analysés et présentés à chaque séance. Le comité de rédaction se réunit régulièrement par visioconférence pour sélectionner les thématiques, définir les propositions de contenu et enfin les valider sous la houlette du rédacteur en chef ;
- L'évolution de la publicité et celle des partenariats y sont également évoquées et discutées. Ces derniers contribuent majoritairement à un budget équilibré. C'est d'eux aussi que dépendent la densité de la revue et son nombre de pages qui a dû être réduit pendant cette période de Covid-19 ;
- Le Forum a finalement pu avoir lieu. La trésorerie de l'AFT en a été un peu consolidée ;
- Les résultats du Prix de l'AFT y sont évoqués également : en 2020, deux ex aequo se partagent le prix : Camille Parra de l'ENSG et Matthieu Rebmeister de l'INSA. Ils ont été rappelés pour participer au Forum 2021, par présentation en vidéo de leurs études ;
- Autre point : le site web de l'AFT et ses propositions d'amélioration ;
- Le point est également fait sur les réseaux sociaux : l'AFT dispose de comptes sur Facebook, Twitter et LinkedIn, initiés et toujours modérés par Bernard Flacelière, Élodie Sissler et Flavien Viguier ;
- La "lettre d'actualités topographiques" de l'AFT qui n'a pas pu être éditée trois fois comme à l'habitude ;
- La section belge et luxembourgeoise n'a toujours pas été vraiment lancée !

- Le calendrier des manifestations et des participations de l'AFT est remis à jour à chaque séance.

Les publications

■ La revue XYZ

En 2021, sont parues quatre nouvelles revues XYZ toujours aussi captivantes et estimées.

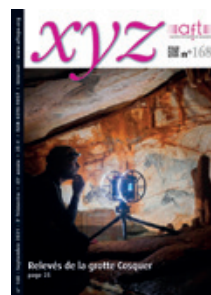
En termes de volume, les revues comportaient respectivement : n° 166 (72 pages), n° 167 (72 pages), n° 168 (56 pages), n° 169 (68 pages).

Le rythme trimestriel des publications a été respecté. Les rédacteurs poursuivent la recherche de la variété dans tous les domaines de la topographie. Les différentes rubriques proposées par la revue sont toujours en rapport avec les problématiques de la topographie moderne et future : les "éditoriaux" décisifs, les "brèves des constructeurs" et "Infotopo", les articles techniques et scientifiques, la revue littéraire et professionnelle, parfois des "récréations mathématiques", de la "topo vécue", la vie des associations et la vie des écoles sont toujours aussi raffinés et donnent aux lecteurs une représentation générale des mutations de la topographie. En tant que rédacteur en chef, Bernard Flacelière continue à assurer l'aboutissement de la revue en menant le comité de rédaction vers des exigences élevées. Le comité de lecture, est composé de personnalités reconnues et étudie, propose des améliorations et donne son aval sur les contenus des publications.

Ainsi, les différents numéros [de 166 à 169] de 2021 comportaient respectivement :

- des "Infotopo",
- des rapports sur les différentes manifestations.

Et parmi les classifications thématiques de la revue :





- Géodésie/GNSS (3+4+1+1 articles)
- Topographie/Topométrie/Auscultation (0+0+0+2 articles)
- Lasergrammétrie (0+2+0+0 articles)
- Photogrammétrie (0+0+0+1 article)
- Histoire (0+0+1+0 article)
- Patrimoine (0+0+2+0 articles)
- Hydrographie/Navigation (1+0+0+1 articles)
- Télédétection (1+0+0+0 article)
- La vie de la profession (1+1+0+1 articles)
- Association (3+2+2+0 articles)
- BIM (0+0+1+0 article)
- * Urbanisme (0+0+0+1 article)

Le tout complété par les rubriques "Art et Géométrie" (1+1+1+1 articles) et de la Topographie et des Géomètres sans Frontière "TSF/GSF" (1+0+1+1 articles), de la Topo vécue (1+0+0+1 articles), la vie des écoles (0+0+0+1 article).

On peut noter qu'en 2021 il n'y a pas eu d'articles sur les thématiques classiques comme :

- Formation
- Drone
- Cartographie/PCRS
- Ingénierie
- Foncier/Cadastre
- Règlementation
- La réalité virtuelle
- * Intelligence Artificielle
- * Environnement
- SIG/Géomatique/Géoservices
- Droit

Comme chaque année, il s'agit à ce moment de féliciter le travail distinctif et imaginaire de Dorothée Picard qui, grâce à son sens de l'agencement, nous permet d'offrir aux lecteurs une revue de très haute qualité.

■ Autres publications (rappel)

- "Lutte pour un avenir" (Louis Catinet)
- Numéro Hors-série : "Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique" (Paul Courbon)
- Numéro Hors-série : "Méthodes GNSS pour la Topographie"
- "Lexique topographique"
- "Sciences géographiques, connaissance du monde et conception de l'Univers dans l'Antiquité" (Raymond D'Hollander)
- "Mesurer la Terre - 300 ans de géodésie française" (Jean-Jacques Levallois)

*Il s'agit de rubriques introduites récemment

- "Le marégraphe de Marseille" (Alain Coulomb)
- "Art et géométrie" (Jean-Pierre Maillard)
- "Les références de temps et d'espace" (Claude Boucher)
- "Lexique GNSS pour le positionnement" de la commission CNIG/GEOPOS
- "Cours de géodésie" (Françoise et Henri Duquenne)

■ Publications numériques

Une lettre d'actualités topographiques de l'AFT composée par Emmanuel Clédat et Pierre Assali et publiée numériquement, puis transmise par la liste d'adresses de messagerie professionnelles de l'AFT, au rythme de trois par an en alternance avec les revues XYZ. La lettre a rencontré quelques difficultés à être préparée.

Les manifestations

Les manifestations de 2021 sont restées sur des formats "à distance" et "numérique". Si elles n'ont pas été reportées ou annulées, elles se sont déroulées en visioconférence ou sur des plateformes dédiées. Elles ont été régulièrement annoncées dans les revues XYZ.

Le Prix AFT 2021

Il a déjà été évoqué avec les deux étudiants ex-aequo de l'ENSG et de l'INSA en 2020. Ce prix a été remis en 2021. Le règlement et la composition du jury ont été toilettés. Une nouvelle version est conduite par Emmanuel Natchitz.

Pour le Prix de l'AFT 2021, un jury de 13 membres a départagé les propositions d'articles de cinq candidats dont deux de l'INSA et trois de l'ESGT. Le 1^{er} prix a été attribué à Raphaël Haenel de l'INSA, le 2^e à Maxime Merizette de l'ESGT. Grâce au soutien indéfectible du sponsor Leica Geosystems, ce Prix est doté de 2 000 € de récompense et sera distribué aux lauréats en 2022. Ainsi se termine ce bilan de l'année 2020 !

L'AFT poursuit ses engagements pour le déploiement et la propagation des connaissances en topographie.

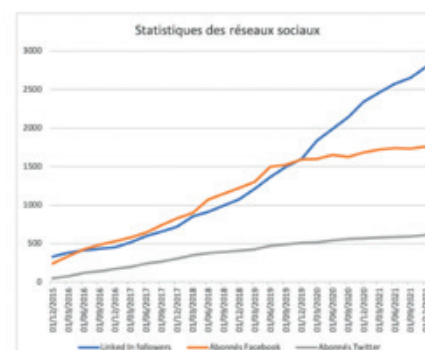
Nous rappelons chaque année à l'oc-

cas de ce bilan que l'AFT met tout en œuvre pour conserver sa place parmi les associations reconnues dans les différents milieux professionnels qu'elle touche de près ou de loin en proposant l'accès aux informations et aux connaissances par l'intermédiaire de ses ouvrages, de "La lettre d'actualités topographiques de l'AFT", de la "revue XYZ" et grâce aux participations dans les congrès et colloques scientifiques internationaux.

Pendant cette année pour laquelle les contacts physiques sont encore restés limités avant un petit répit en fin d'année, la visibilité sur les réseaux sociaux était essentielle en appui au site Internet : Élodie Sissler est cogestionnaire avec Bernard Flacelière pour l'importante animation de la page Facebook et du compte LinkedIn. Ce dernier devrait être consolidé par d'autres contributions (ou contributeurs). Flavien Viguier participe grandement aux partages des tweets.

- L'embarquée observée sur LinkedIn ne s'est pas arrêtée en si bon chemin et s'est poursuivie avec la même croissance qu'en 2020 pour atteindre près de 2 800 contacts, alors que Facebook et Twitter accusent des plateaux respectifs à 1 700 abonnés et un peu moins de 600 followers.

Pour finir, l'AFT remercie ici encore



vivement l'IGN pour son soutien, notamment pour le prêt des locaux et des infrastructures, l'ENSG pour la salle de ce jour et l'INSA pour les infrastructures lors des Journées de la Topographie qui hébergent également, c'est une tradition bien ancrée maintenant, les 3^es réunions du Conseil chaque année. ●

Mathieu KOEHL,
Secrétaire général

Les journées techniques de l'Association francophone d'hydrographie

Après deux années de report, les journées techniques de l'AFHy (Association francophone d'hydrographie) ont enfin pu avoir lieu dans le port de Lyon les 17 et 18 mai 2022. Organisées par l'AFHy et CNR (Compagnie nationale du Rhône), elles ont permis à 80 spécialistes du domaine de l'hydrographie (instituts, entreprises, donneurs d'ordres) de se retrouver pour des échanges techniques fructueux lors de tables rondes, de présentations variées et de démonstrations de matériels innovants.

Cette année, les produits phares ont notamment été les drones de surface (USV¹) et les robots d'inspection subaquatique (ROV²). Les drones de surface (USV), équipés de matériel bathymétrique de pointe, sont capables de réaliser des levés dans des zones complexes en totale autonomie. Les robots sous-marins téléguidés (ROV) embarquent des capteurs compacts et performants (caméras, sonar) et disposent aujourd'hui d'une excellente maniabilité rendant possible l'accès à des zones sous-marines particulièrement difficiles. Une nouvelle caméra sous-marine Orphie a fait sensation et a montré des images détaillées des fonds malgré des eaux turbides, résultat d'une optique couplée à un traitement d'image novateur ! Côté méthodologie, il a notamment été question de l'apport de l'intelligence artificielle pour les traitements de données bathymétriques et de l'introduction de la norme S-100 qui va révolutionner la manière de partager l'information hydrographique.

1. USV : Unmanned Surface Vehicle
2. ROV : Remotely Operated Vehicle



Le navire Frédéric Mistral était sur site et son équipage a réalisé une démonstration des méthodes de levés bathymétriques tout en présentant également le fonctionnement de l'activité bathymétrique de la CNR et le rôle des Directions Territoriales. Cela a été l'occasion de valoriser le savoir-faire de la CNR dans ce domaine essentiel pour la sûreté hydraulique et la sûreté de navigation. Ces journées ont rencontré un vif succès avec de nombreux retours positifs. Les prochaines rencontres autour de l'hydrographie auront lieu lors de la conférence Hydro22 du 6 au 8 décembre 2022, à Monaco. ●

Mounir Ajrouche et Céline Khantache,
pour l'AFHy

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre,
professeur associé, ENSTA Bretagne, Brest

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

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

DURAND Stéphane
maître de conférences, ESGT, Le Mans

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

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA Strasbourg

LEQUEUX James,
astronome émérite à l'Observatoire de Paris

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène,
ingénieur recherche, ENSTA Bretagne, Brest

MOREL Laurent,
professeur des universités, ESGT, Le Mans

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier,
ingénieur, traducteur, Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval, Québec

TOUZÉ Thomas,
dr. ingénieur géomètre, EDF, Grenoble

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

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



XXIV^e Congrès de la Société internationale de photogrammétrie et de télédétection (ISPRS) Nice, du 6 au 11 juin 2022

■ Tania LANDES - Laurent POLIDORI - Pierre GRUSSENMEYER

Après six longues années de préparation, le XXIV^e Congrès de la Société internationale de photogrammétrie et de télédétection (ISPRS) a enfin pu se tenir en présentiel à Nice, du 6 au 11 juin 2022, sous la direction de Nicolas Paparoditis (IGN) et organisé par la Société française de photogrammétrie et de télédétection (SFPT). L'Association francophone de topographie, ainsi que l'Ordre des géomètres-experts faisaient partie des soutiens institutionnels aux côtés des grands organismes publics de recherche (CNES, CNRS, IGN, IRD, INRIA). Le comité d'organisation était composé des personnes dont la majorité sont des membres de l'AFT (figure 1) accompagnés de Inez Burger, directrice associée de in2events (<http://www.in2events.eu/>), organisatrice de congrès professionnels.

La réunion physique ISPRS 2022 à Nice était la troisième édition du XXIV^e Congrès ISPRS. En effet, le congrès aurait dû se tenir en 2020 déjà, toutefois, pour les raisons sanitaires que vous connaissez, l'édition de 2020 a dû se dérouler à distance "Virtual Edition 2020" avec la promesse de se voir en 2021. Cette manifestation se tient normalement tous les quatre ans,

un rythme perturbé seulement trois fois depuis la naissance de l'ISPRS en 1910 : pendant les deux guerres mondiales et pendant la pandémie de covid-19. Cette situation exceptionnelle aura obligé le comité d'organisation à revoir complètement sa copie et proposer une plateforme professionnelle répondant au besoin spécifique d'un congrès international à distance. Malheureusement,

2021 n'aura pas été plus propice que 2020 à un congrès physique et nous aura amené à organiser, à nouveau, un événement à distance "Digital Edition 2021". Ainsi, nous aurons tout mis en œuvre pour assurer la continuité scientifique pendant la pandémie, permettant à nos chercheurs, et notamment à nos doctorantes et doctorants, de diffuser de nouvelles connaissances et d'avoir des échanges avec des collègues expérimentés. Pour favoriser cette continuité, l'inscription au congrès en 2020 aura donné accès aux trois éditions. Nous avons aussi voulu que cet événement soit plus accessible, en proposant des tarifs très réduits et un certain nombre d'exonérations de frais pour permettre à de nombreux collègues, et en particulier aux jeunes collègues du monde entier, d'assister au Congrès. Cependant, en raison de la persistance de la crise sanitaire en 2022 et de tensions géopolitiques grandissantes aux portes de l'Europe, la possibilité de voyager est restée très incertaine jusqu'à la veille du congrès pour les ressortissants de nombreux pays du monde, ce qui a exigé l'organisation, en très peu de temps, d'un événement hybride. Ainsi, les auteurs qui ne pouvaient pas se rendre à Nice ont pu présenter leurs travaux à distance (notamment 600 Chinois). Pour beaucoup d'entre nous, ce rendez-vous niçois en 2022 était le premier grand événement physique géospatial depuis le début de la pandémie. Nous avons à nouveau pu apprécier l'importance des échanges, la rencontre de collègues du monde entier, même si de nombreux chercheurs étaient bloqués chez eux en raison de leurs politiques nationales de voyage. Le programme du congrès présentiel



Figure 1. Le comité d'organisation du 24^e congrès (en 3 éditions !) de l'ISPRS. De gauche à droite : Ewelina Rupnik (IGN), Inez Burger (in2events), Eric Labergerie (CNAM-ESGT), Clément Mallet (IGN), Nicolas Paparoditis (IGN), Pierre Grussenmeyer (INSA Strasbourg), Laurent Polidori (UFPA), Loïc Landrieu (IGN), Tania Landes (INSA Strasbourg).



Figure 2. L'équipe strasbourgeoise de l'INSA Strasbourg s'est déplacée en force avec doctorantes, doctorants, enseignants, ingénieur d'études pour participer au congrès.

à Nice mettait bien sûr le point d'orgue sur la science, mais pas seulement ! En effet, l'une des principales missions de l'ISPRS, au-delà d'étendre la frontière de la connaissance, est d'aborder à la fois la science et la technologie, et de maintenir un lien fort entre le monde universitaire, les agences nationales et l'industrie. Outre les sessions scientifiques des cinq commissions de l'ISPRS, les sessions plénières et les cérémonies de remise des prix, un autre point fort aura été la rencontre avec les exposants. Parallèlement aux sessions scientifiques, des sessions industrielles (*technology track*) ont permis aux acteurs de l'industrie géospatiale de présenter oralement leurs dernières innovations en complément d'une grande exposition, et des sessions de prospective (*forum track*) ont abordé sous la forme de tables rondes les interactions entre la science, l'industrie et les organisations publiques sur les sujets brûlants de la communauté géospatiale afin de fournir des feuilles de route pour les prochaines années. Enfin, en complément de ce programme, le congrès était précédé de sessions de formation (*tutorials*) et suivi d'une école d'été.

Quelques chiffres sur ce congrès : 3 éditions, une Assemblée générale dans l'édition 2022 avec 29 membres ordinaires représentés en personne et environ 25 participants à distance, plus de 2 700 participants, plus de 3 400 contributions scientifiques de plus de 80 pays pour l'ensemble des 3 éditions (2020, 2021 et 2022) du XXIV^e congrès, le plus gros contributeur étant de loin la Chine, suivie de l'Allemagne, la France, l'Italie et l'Inde.



Figure 3. Dîner de gala dans un cadre exceptionnel, à la villa Ephrussi de Rothschild.

Ces chiffres témoignent du très fort dynamisme de la communauté scientifique et industrielle dans le domaine de l'imagerie géospatiale et de l'information géographique. Plus de 7 000 évaluations ont été menées par le comité de lecture, plus de 1 800 présentations orales ou posters, 16 conférenciers invités de tous les continents et 2 263 articles publiés dans les Annales et Archives de l'ISPRS. Ces publications sont référencées par *Web of Science*, Scopus et Ei. Tout au long de ces trois éditions, nous avons expérimenté un nouveau média complémentaire aux communications : les vidéos pré enregistrées de dix minutes, qui ont été mises en libre accès sur la médiathèque de l'ISPRS après le congrès. Ainsi, toutes les sessions seront disponibles en replay pour les participants inscrits. Pour les trois éditions, nous avons collecté plus de 1 500 vidéos, supports très utiles pour avoir un aperçu rapide du contenu du papier et à des fins éducatives.

Une question demeure sur la forme des futurs grands événements ISPRS : hybride ou pas hybride ? Telle est la question. Il est certain que le prochain congrès se déroulera à Toronto en 2026, sous la direction de Derek Lichti, avec la Société canadienne de télédétection.



Figure 5. Exemple de présentation orale en vidéo préenregistrée.

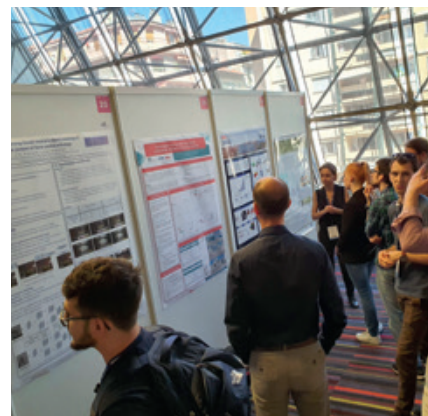


Figure 4. Session de posters.

Organisation de l'ISPRS pour la période 2022-2026

Lors des premiers jours du congrès, l'assemblée générale a désigné les nouveaux présidents des cinq commissions l'ISPRS pour la période 2022-2026.

Commission I – Capteurs : Xinming Tang (Chine) & Antonio Tommaselli (Brésil)

Commission II – Photogrammétrie : Alper Yilmaz (USA) & Jan Dirk Wegner (Suisse)

Commission III – Télédétection : Laurent Polidori (France) & Alessandra Gomes (Brésil)

Commission IV – Sciences de l'information spatiale : Sisi Zlatanova (Australie) et Maria Antonia Brovelli (Italie)

Commission V – Éducation et rayonnement : Gay Jane Perez (Philippines) & Josefino Comiso (USA)

Chaque Commission (<https://www2.isprs.org/commissions/>) comprend plusieurs groupes de travail dont les contributions seront présentées lors des futurs événements organisés par l'ISPRS. L'assemblée générale a également permis de désigner les nouveaux membres du Conseil (<https://www.isprs.org/structure/council.aspx>) :

Présidente : Lena Halounová (Rép. Tchèque)

Vice-président : Nicolas Paparoditis (France)

Président sortant : Christian Heipke (Allemagne)

Secrétaire général : Lie Jinag (Chine)

Trésorier : Stewart Walker (USA)

Directeur du Congrès ISPRS 2026 : Derek Lichti (Canada). ●

► Pour plus d'informations : www.isprs.org

Expédition au glacier d'Arcouzan en Ariège Relevé topographique en 3D

Philippe SABLAYROLLES

Il en a fallu du courage à ces étudiants du BTS MGTMN du Caousou pour pénétrer dans les entrailles du glacier d'Arcouzan !

Le jeudi 7 octobre 2021, après 1 300 m d'ascension vers le refuge des Estagnous (figure 1) tous les membres de la mission y ont passé leur première nuit. Les ablutions dans le lac des Estagnous avec une eau à 7 °C, pour les plus valeureux des géomètres, ont revigoré les corps déjà épuisés par cette première étape.

Il est déjà 19 heures et les assiettes bien remplies de soupe fumante réchauffent les carcasses frigorifiées. La journée de demain sera épuisante, il faut reprendre des forces.

La montre sonne à 5 heures, il faut quitter le cocon chaud du duvet pour un bon petit déjeuner. Les sacs à dos se remplissent rapidement (pique-nique, gourdes, trépied, batteries, crampons, scanner laser 3D, GNSS, canne, piolet, prisme, veste, baudrier et casque sans oublier la frontale), car avec un départ à 6 heures il faudra se frayer un chemin dans la nuit jusqu'au col de Pécouch (figure 2). Aurore prendra la direction du mont Valier à 2 838 m d'altitude, Manuel et Rémy celle du glacier.

Les premiers rayons du soleil éclairent enfin les sommets du mont Valier. L'équipe, casques sur les têtes, atteint après deux heures de marche le col du Petit Valierat (figure 3).



Figure 1. Montée au refuge des Estagnous depuis le Pla De La Lau.

Les cordes sont en place et les baudriers enfilés. Le pivot GNSS trône maintenant au col. Une descente d'une heure attend les étudiants entre gispet (fétuque eskia)¹ et rochers pour enfin poser le pied sur la moraine du glacier. Il est 9 h 30 et le soleil éclaire péniblement la moitié du glacier fortement crevassé cette année.

L'équipe des géomètres met en place le scanner laser 3D et déploie le système GNSS (figure 4 et figure 5). Rémy et Manuel mettent la main à la pâte entre prisme, scanner et GNSS. Les glaciologues prélèvent des carottes et plantent



Figure 4. Travaux GNSS sur la moraine latérale du glacier.

¹ Plante pyrénéenne qui appartient à la famille des Poacées (*Festuca eskia*). Cette graminée forme de vastes pelouses fermées ou en gradins.



Figure 2. Col de Pécouch très tôt le matin.



Figure 3. Col du petit Valierat.



Figure 5. Mesurages au scanner laser 3D du glacier et de la moraine.



Figure 6. Accès sous le glacier par une brèche latérale.



Figure 7. Sous le glacier.

des pignes qui seront relevées au GNSS. L'objectif est de mesurer le déplacement du glacier par comparaisons lors de la prochaine mission.

Après s'être affairés au bord du glacier, les crampons sont enfilés (pour la première fois) et nos deux valeureux étudiants pénètrent dans les entrailles du glacier par une petite cavité (figure 6). Le guide ouvre la marche. Les conseils sont donnés pour un déplacement en toute sécurité dans ce milieu hostile. La glace nous enserre. Des crevasses béantes au-dessus des têtes défilent. Des stalactites transparentes surplombent les casques et les reflets bleutés de la glace vive nous stupéfient (figure 7). Enfin, c'est le bout du tunnel, le pic du Montcalm (3 077 m) et la pique d'Estats (3 143 m) se détachent à l'horizon (figure 8).

Aurore, qui a pris la direction du mont Valier, domine de plus de 300 m l'équipe sur le glacier en contrebas. Elle assurera une couverture photographique du glacier depuis ce point culminant. À 13 h 30, le glacier est déjà dans l'ombre depuis plus d'une heure, il est temps de quitter ce monde glaciaire et féérique.



Figure 8. Débouché de la cave de glace 50 m après l'accès.

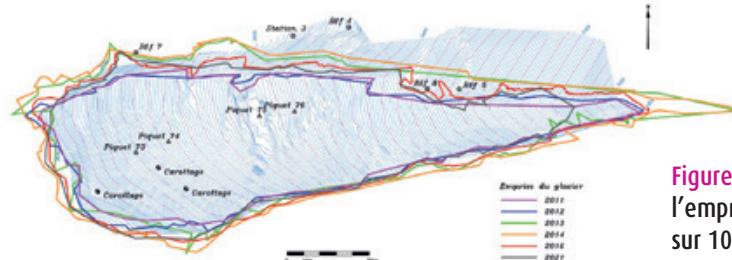


Figure 10. Variation de l'emprise du glacier sur 10 ans.

Les bras et les cuisses sont en feu pour remonter les 150 m de parois. Quelques pierres terminent leur course plus bas après de multiples rebonds qu'il faut parfois anticiper. Après, tout va vite, redescendre les 30 m de cheminée, traverser les 500 m d'éboulis enneigés pour enfin quitter les équipements qui rejoindront le sac à dos. La crête de Pouech franchie, nous retrouvons la chaleur du soleil couchant. Les pieds souffrent dans la descente entre les blocs, les dalles glissantes et le gispet. Dans un dernier effort pour atteindre le refuge, Manuel est exténué. Les esprits sont joyeux, mais les corps meurtris. Un vin chaud fume dans la main des montagnards alors que le soleil se couche sur les 3 404 m de l'Aneto. C'est l'occasion d'une photographie regroupant six étudiants (anciens et nouveaux)



Figure 9. Les étudiants du Caousou avec le mont Valier en arrière-plan.

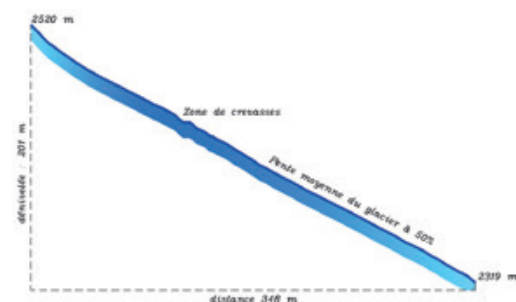


Figure 11. Profil en long du glacier.

du BTS MGTMN du Caousou, Aurore, Manuel, Rémy, Jean-Sébastien, Aurélien et Philippe (figure 9).

La soirée est animée, les conversations fusent. Entre récits de montagne et missions topographiques du bout du monde, les Ariégeois entament *Se Canta* de Gaston Phébus qui résonne dans tout le refuge. Il est temps de regagner les duvets pour un repos bien mérité.

Samedi matin, après 4 heures de descente, nous retrouvons la maison du Valier. Le temps de se rafraîchir et toute l'équipe partage un dernier repas convivial. Les étudiants garderont en tête toute leur vie cette belle expérience au cœur de l'Ariège.

Dans les prochains jours, les données seront exploitées par les étudiants du BTS MGTMN du Caousou (figures 10 et 11), certainement l'occasion d'une soirée de restitution avec les principaux acteurs de cette belle aventure. ●

Mise en place d'un système qualité encadrant l'ensemble des méthodes de levés 3D de la démarche commerciale jusqu'au produit fini

■ Joseph LALOUX

Désireux de réorganiser et d'optimiser ses procédures, TPLM-3D souhaite aujourd'hui revoir globalement son système qualité. L'objectif est simple : face à une concurrence grandissante, l'entreprise aura plus de chances de se démarquer si elle maîtrise et met en avant les notions de "temps" et la "qualité".

Ces dernières seront donc au cœur de nos réflexions lors de la réalisation des modes opératoires et de la mise en place du nouveau système qualité de l'entreprise. Le travail réalisé au cours de ce PFE intervient à différentes étapes d'un projet lasergrammétrique terrestre : la phase commerciale, les phases d'acquisitions et de traitement des données, ainsi que la phase de gestion de projet.

Contexte et objectifs de l'étude

Durant ses 17 ans d'activité dans le domaine du relevé 3D et de l'exploitation de données tridimensionnelles, l'entreprise TPLM-3D s'est progressivement dotée d'un système qualité encadrant l'ensemble de ses opérations. Cependant, les évolutions numériques et technologiques importantes des dernières années (ex. : consolidation des

nuages de points sur le terrain, drone...) ont fait naître de nouveaux usages qui sont encore trop peu structurés au sein de l'entreprise, à la fois commerciale-ment, techniquement et d'un point de vue qualité (ex. : procédure et fiche de contrôle).

Désireux de réorganiser et d'optimiser ses procédures, TPLM-3D souhaite aujourd'hui revoir globalement son système qualité. Ce projet de fin d'études repose sur trois objectifs distincts :

MOTS-CLÉS

Acquisition 3D, BLK2GO, scanner laser terrestre (TLS), SharePoint, Système d'aide à la décision (SAD), Système de management de la qualité (SMQ)

- La conception d'un système d'aide à la décision, permettant l'élaboration de l'offre commerciale ;
- La rédaction d'une documentation nécessaire au bon usage des appareils (ex. : modes d'emploi) et au bon suivi des méthodes (ex. : fiches de contrôles et modes opératoires d'acquisition et de traitement) lasergrammétriques terrestres de chez TPLM-3D. Les documents rédigés à ce sujet permettront aux membres de l'entreprise d'avoir un fil conducteur à respecter sur les chantiers faisant appel à ce type de technologie ;
- La mise en place de la nouvelle structure générale du système qualité de TPLM-3D. Pour y arriver, on s'intéressera aux outils numériques existants de façon à gagner en efficacité et en productivité sur certaines tâches d'un lever 3D.

Principe d'un système management de la qualité

Dans le cas d'une organisation inadap-tée, de procédures mal appliquées, de contrôles délaissés, voire inexistantes, ou encore de dysfonctionnements internes, l'entreprise aura peu de chances de se démarquer face à la concurrence. Pour rester dans la compétition, elle se doit donc de disposer d'une organisation structurée et d'appliquer des méthodes de travail à la fois robustes, maîtrisées et contrôlables. Afin d'assurer un succès durable, il est essentiel que l'entreprise se tourne vers le système de manage-ment de la qualité.

Pour instaurer un système qualité, il convient de s'intéresser à l'approche

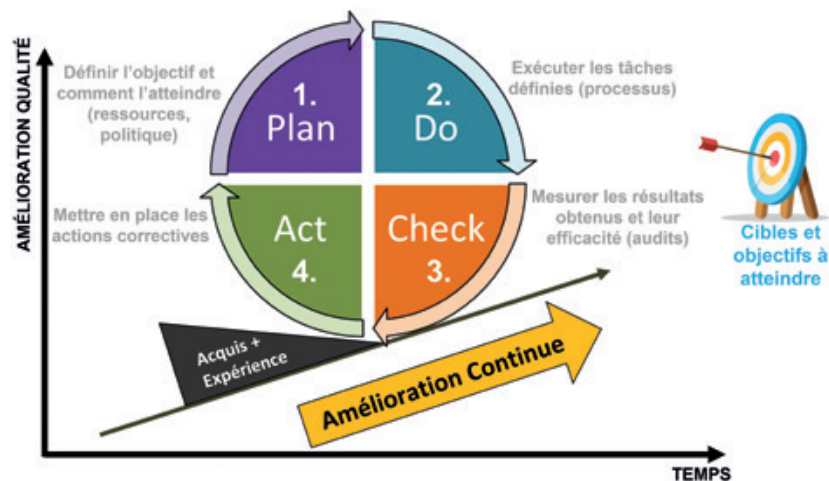


Figure 1. Illustration de la roue de Deming, aussi appelée le cycle PDCA.

[Source : S.Demure [2020] <https://www.cost-house.com/post/evitez-le-reengineering-adoptez-le-lean-management>]

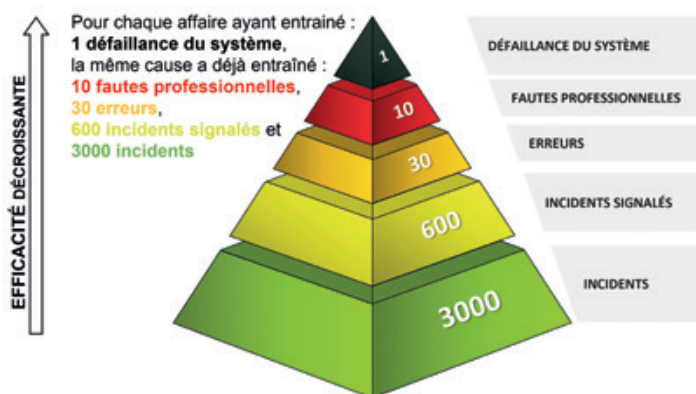


Figure 2. Pyramide de l'alerte qualité reposant sur le principe de la pyramide de Bird.

managériale à mettre en place. C'est là qu'intervient le système de management de la qualité. Ce dernier correspond à l'ensemble des actions mises en place par une entreprise qui souhaite maintenir un contrôle permanent sur le travail effectué et obtenir des résultats à la hauteur des attentes du client.

Ce système, présenté dans la norme ISO 9000, se décline en sept principes. Dans le cadre de ce projet, nous avons mis l'accent sur un de ces principes : l'amélioration continue (voir figure 1). Il repose sur quatre piliers illustrés avec la roue de Deming : la planification (Plan), la réalisation (Do), la vérification (Check) et l'agissement (Act). Cette démarche cyclique a pour vocation d'accroître continuellement les performances de l'entreprise. L'établissement d'objectifs clairs, la mise en place d'outils (ex. : plan d'action), la contribution de chacun et la recherche d'opportunité d'amélioration permanente sont des éléments clés pour appliquer ce principe.

Malgré la présence d'un système qualité au sein de l'entreprise, nul n'est à l'abri de faire des erreurs qui risquent de mettre à mal le déroulement du projet

sur lequel il travaille (ex. : retard, surcoût financier...). Ces erreurs peuvent être catégorisées selon leur fréquence et leur degré de répercussion sur la qualité du travail. Pour représenter ces différentes catégories, on peut s'appuyer sur le principe de la pyramide de Bird. Ce concept exprime le fait que plus le niveau d'incidents ou de presque accidents est élevé, plus la probabilité d'accident grave est élevée. Dans notre cas, il n'est pas question d'accidents de travail, mais plutôt d'erreurs commises par les professionnels. La pyramide de l'alerte qualité (voir figure 2) se décompose en cinq parties : les incidents, les incidents signalés, les erreurs, les fautes professionnelles et la défaillance du système. Plus le niveau d'incidents et d'incidents signalés est élevé, plus le risque de faire face à une défaillance du système qualité est important. Les chiffres sont ici fournis à titre indicatif.

Le but de cette partie est donc de prendre conscience que le système qualité ne pourra être fonctionnel que si les non-conformités (ex. : problème technique durant le lever, problème sur la qualité d'un livrable, réclamations client, mis en danger de la santé du

personnel...) sont détectées et signalées rapidement. Il convient de s'attaquer à la source des problèmes avant que ces derniers ne prennent une ampleur trop importante. On cherchera donc à surveiller et à réduire un maximum d'incidents, pour éviter de faire face à des fautes professionnelles pouvant engendrer une défaillance du système qualité de l'entreprise. De plus, un incident commis par un professionnel peut également être répété par son collègue si celui-ci n'a pas eu vent des éléments engendrant ce problème. La détermination de ces causes, qui peuvent être techniques, méthodologiques ou humaines, est la première démarche à avoir. Il convient alors de proposer des solutions pour remédier au problème. Tous ces éléments sont répertoriés et communiqués au reste de l'entreprise au travers d'un rapport de non-conformité (RNC), archivé dans l'intranet. Si ce document est validé par la direction de l'entreprise, les actions correctives proposées seront appliquées et instaurées dans le système qualité de manière à ne pas réitérer l'incident.

Création d'un système d'aide à la décision

■ Objectifs

Lors de l'élaboration de l'offre commerciale, il devient fondamental de ne pas se tromper sur le choix du mode opératoire car les temps d'acquisition et de traitement sont très différents d'une méthode à l'autre. Or, la décision à prendre n'est pas toujours évidente, car de nombreux paramètres sont à prendre en compte.

L'objectif ici est donc de créer un système d'aide à la décision (acronyme

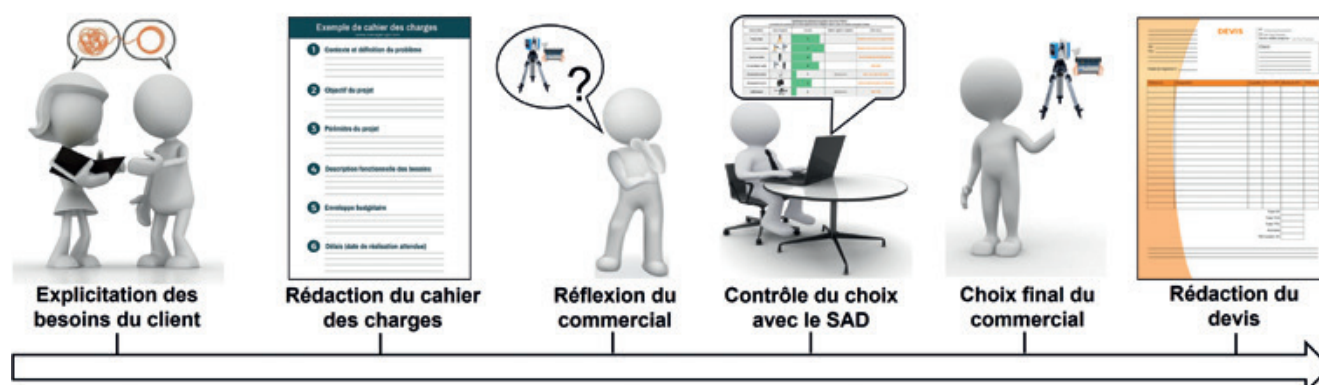


Figure 3. Étapes clés de la phase de conception d'un projet.

A. Définition du chantier → valeurs et poids à remplir par l'utilisateur	
Critères du projet	Valeurs
Précision relative maximale (en cm)	10m
Niveau de détail minimum (en cm)	30m
Effet volume (en m³)	19 296m³
Configuration des lieux	Très grande surface (10001m² - 500000m²)
Surface : intérieur & extérieur compris (en m²)	19 296m²
Hauteur maximale (en m) [ex : façade, hauteur sous plafond]	20m
Espace en extérieur (% par rapport à la surface du chantier)	13%
Nombre d'étages maximum	4 étage(s)
Espace confiné et encombré	Quelques espaces confinés et encombrés
Configuration alignée [ex : tunnel, long couloir]	Un peu
Agencement des pièces	Organisation des pièces à demi structurée, un peu de "boite à chaussures"
Zone difficilement accessible [ex : puit, citerne, escalier trop pentu]	Non
Type de livrable	3
Panoramique 360°	<input type="checkbox"/> FAUX
Modèle 3D	<input checked="" type="checkbox"/> VRAI
Nuage de points & Ortho-image de nuage de points	<input checked="" type="checkbox"/> VRAI
Plan de coupe et d'élévation	<input checked="" type="checkbox"/> VRAI
Plan topographique	<input type="checkbox"/> FAUX

A. Paramétrage des méthodes d'acquisition 3D en fonction des critères → valeurs déjà fixées			
Nom des méthodes	Méthode 1 Scanner statique	Méthode 2 Scanner laser pré-consolidation	Méthode 3 Scanner laser mobile
Précision relative maximale (en cm)	1cm	1cm	2cm
Niveau de détail minimum (en cm)	0.5cm	0.5cm	2cm
Effet volume (en m³)	-	-	-
Petite surface (0m² - 1000m²)	0	0	0.5
Surface moyenne (1001m² - 5000m²)	0.5	0.5	0.5
Grande surface (5001m² - 10000m²)	0.5	0.5	1
Très grande surface (10001m² - 500000m²)	0.5	1	1
Configuration des lieux	-	-	-
Surface : intérieur & extérieur compris (en m²)	-	-	-
Petite surface (0m² - 1000m²)	0.5	0.5	1
Surface moyenne (1001m² - 5000m²)	0.5	0.5	0.5
Grande surface (5001m² - 10000m²)	0.5	1	0.5
Très grande surface (10001m² - 500000m²)	0.5	1	0
Hauteur maximale (en m) [ex : façade, hauteur sous plafond]	-	-	-
Petite hauteur (0m - 3m)	0.5	0.5	1
Hauteur moyenne (4m - 5m)	0.5	0.5	0.5
Grande hauteur (6m - 10m)	1	1	0.5
Très grande hauteur (11m - 100m)	1	1	0

A. Résultats obtenus après que le fichier Excel ait comparé les deux tableaux ci-dessus			
Classification des méthodes d'acquisition 3D de chez TPLM-3D en fonction du caractère plus ou moins optimal de leur utilisation dans le cadre du chantier renseigné ci-dessus			
Nom des méthodes	Image des appareils	Score final	Critères non-go
Scanner statique		77	MANQUE DE RECURSUR LES FAÇADES ÉLEVÉES
Scanner laser pré-consolidation		100	MANQUE DE RECUR SUR LES FAÇADES ÉLEVÉES
Scanner laser mobile		63	NE PAS UTILISER EN EXTERIEUR (BLK200)
Pré-consolidation + mobile		89	VIBRATIONS
Photogrammétrie aérienne		45	VENT, PLUIE, ZONE TROP BOISÉE
Photogrammétrie terrestre		15	SURFACES RÉFLÉCHISSANTES ET BRILLANTES
LiDAR aéroporté		51	VENT, PLUIE

Tableau 1. Présentation du fonctionnement et des résultats fournis par le système d'aide à la décision.

SAD) sous forme de fichier Excel. Ce dernier permet de faciliter la réflexion du commercial quant au choix de la méthode la plus adéquate à adopter pour répondre aux besoins du client (voir figure 3).

■ Principe du fonctionnement

Pour cela, nous avons recensé les critères qui doivent être pris en compte par le commercial. On y retrouve les critères techniques de relevé (ex. : la

précision, le niveau de détails ainsi que le type de livrable attendus par le client), les critères spécifiques au terrain (ex. : la configuration des lieux...) et les critères dits particuliers (ex. : le temps, le coût...). Tous ces critères influencent la prise de décision, ils ont donc été définis le plus objectivement possible. Pour chacun d'entre eux, nous avons indiqué les valeurs associées qui permettront d'exprimer ces éléments mathématiquement (ex. : sous forme

d'intervalle, de valeur limite, de valeur chiffrée, de pourcentage ou encore de valeur booléenne [vrai, faux]).

Le fichier Excel se divise en plusieurs tableaux, l'un d'entre eux présente le paramétrage de chaque méthode de lever 3D vis-à-vis des critères cités précédemment (voir tableau 1.B). Dans un second tableau, l'utilisateur renseigne les éléments caractéristiques du projet qu'il étudie (surface de la zone à relever, précision attendue...) ainsi que la pondération qu'il souhaite donner pour chaque critère (voir tableau 1.A). Le système d'aide à la décision fait alors une comparaison entre ces deux tableaux. Il propose alors un classement des méthodes d'acquisitions 3D (sous forme de score) en fonction du caractère plus ou moins optimal de leur utilisation dans le cadre du chantier (voir tableau 1.C).

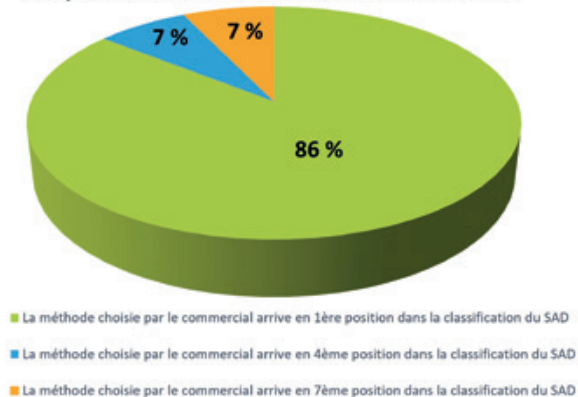
Ne disposant d'aucun moyen de contrôle concret, il est difficile d'assurer le bon fonctionnement de ce système et la pertinence des résultats fournis. La seule possibilité que nous ayons à disposition pour vérifier la cohérence de ses résultats consiste à multiplier son utilisation lors de la réalisation des devis. En fonction des retours d'expérience, positifs comme négatifs, nous pourrions en tirer les conclusions qui s'imposent. Nous avons donc entrepris de tester le fichier Excel par rapport aux différents cas de figure offerts par les chantiers réalisés par TPLM-3D. L'étude que nous comptons mener consiste à comparer le choix des méthodes sélectionnées par le responsable commercial avec celui fourni par le SAD. À noter que les méthodes choisies par le commercial pour ces douze chantiers se sont avérées être les plus adaptées pour répondre aux attentes des clients.

■ Conclusion

Ces résultats (voir graphique 1) confirment bien que la classification générée par le SAD n'est pas fiable à 100 %. En effet, bien que cette étude repose sur des critères qui se veulent être les plus précis possible, cela reste une approche commerciale et estimative.

Après échange avec le commercial de l'entreprise, il semblerait que cet outil ne sera pas systématiquement utilisé. Il sera là en appui pour les chantiers qui

Résultat suite à la classification par le SAD de sept méthodes d'acquisition 3D sur un échantillon de douze chantiers



Graphique 1. Résumé des résultats présentant l'efficacité du SAD.

Méthode	Appareil utilisé	Avantages & inconvénients
Scanner statique	Leica HDS6100	<ul style="list-style-type: none"> + Précision généralement millimétrique + Densité importante de points - Coût élevé du matériel - L'opérateur est souvent inactif pendant la phase d'acquisition - Peu de recul vis-à-vis des données recueillies
Pré-consolidation	Logiciel Z+F LaserControl Scout & Z+F IMAGER 5016 / Z+F IMAGER 5010X	<ul style="list-style-type: none"> + On retrouve les avantages du scanner statique + Contrôle de la qualité des données et du recalage en temps réel + Gain de temps avec des résultats rapidement exploitables - Coût du matériel très élevé (appareil, logiciel terrain, tablette)
Scanner dynamique	Leica BLK2GO	<ul style="list-style-type: none"> + Rapidité pour la phase d'acquisition + Facilement utilisable dans les zones difficiles d'accès + Précision en moyenne centimétrique - Efficacité en extérieur est encore bien limitée

Tableau 2. Avantages et inconvénients des méthodes d'acquisition lasergrammétrique utilisées chez TPLM-3D.

nécessitent une réflexion plus poussée quant au choix de la méthode de lever 3D la plus adaptée.

L'explication du besoin du client ainsi que le choix des techniques à mettre en œuvre ont été abordés avec le système d'aide à la décision. Il convient maintenant de s'intéresser aux méthodes de lever lasergrammétrique terrestre de l'entreprise.

Étude des méthodes lasergrammétriques terrestres

Dès sa fondation en 2004, TPLM-3D s'est mise à investir dans les scanners laser. Ces deux dernières années, l'entreprise s'est dotée de nouveaux appareils qui témoignent des évolutions numériques et technologiques actuelles (voir tableau 2).

Scanner dynamique

L'entreprise a fait l'acquisition d'un scanner à main, le BLK2GO. Cette technologie met l'accent sur la mobilité, la rapidité ainsi que la simplicité d'utilisation. Elle permet d'atteindre des zones parfois difficiles d'accès pour les scanners laser statiques (ex. : les combles). Elle est donc à privilégier pour gagner du temps. Néanmoins, du fait de sa précision centimétrique et de la présence de dérives dans certains nuages de points obtenus, il est souvent utilisé par l'entreprise pour compléter les levés effectués avec les scanners laser statiques.

Les chantiers faisant appel au BLK2GO ont été mis à profit pour effectuer une série d'expériences sur : la précision relative de l'instrument, l'exactitude de ses données, l'analyse de la vitesse de déplacement, le champ de vision de l'appareil, le nombre de "walks"¹ réalisés en moyen sur une journée de terrain ainsi que l'usages de filtres sur le nuage de points.

Méthode de préconsolidation

La méthode de préconsolidation se base sur le même principe que la méthode statique du scanner laser terrestre (TLS). La différence est que l'appareil est directement lié à une tablette ou à un ordinateur portable via un réseau wifi. L'opérateur a la possibilité de piloter l'appareil à distance, de collecter, de visualiser en temps réel et de gérer l'acquisition des données par

¹ Parcours effectué durant le lancement d'une numérisation 3D au BLK2GO.

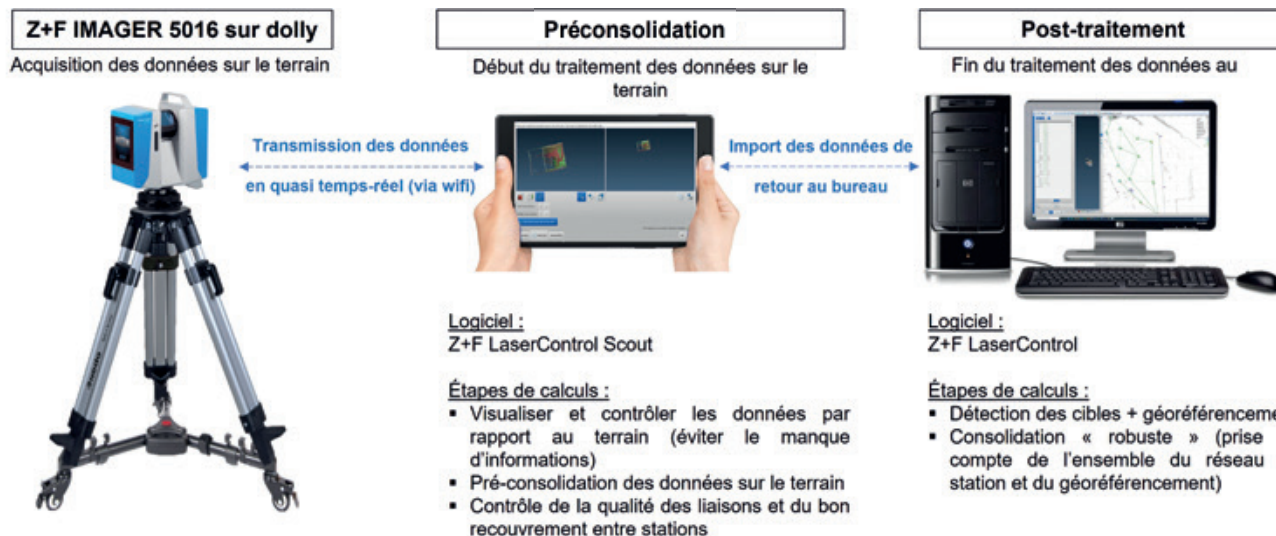


Figure 4. Principe de la méthode dite de préconsolidation avec le scanner laser Z+F IMAGER 5016.

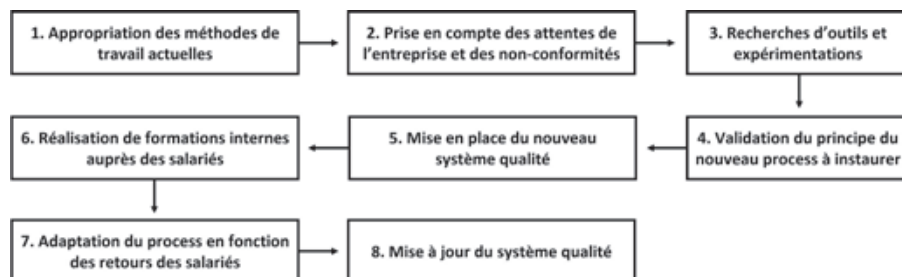


Figure 5. Étapes clés de l'instauration d'un nouveau système qualité.



un assemblage rapide des nuages de points (voir figure 4). Cette méthode augmente la rentabilité du chantier en offrant un gain de productivité et d'efficacité non négligeable à son utilisateur. Ce gain est d'autant plus sensible que le projet est de taille conséquente (ex. : lever lasergrammétrique de la cathédrale de Sens durant cinq semaines).

Rédaction des documents propres à ces méthodes

Durant le PFE, une documentation technique a été rédigée pour chacune de ces deux méthodes. Le but de ces documents est d'optimiser le temps de travail de l'opérateur et de limiter au maximum les problèmes qui peuvent survenir durant la phase d'acquisition et celle de traitement des données.

Grâce aux méthodes appliquées sur les chantiers, aux études réalisées durant le PFE ainsi qu'aux retours d'expérience des membres de l'entreprise, les documents suivants ont été rédigés :

- Un mode d'emploi, qui présente l'utilisation et le rangement de l'appareil en question ainsi que l'éventuelle mise à jour du software associé à cet instrument ;
- Un mode opératoire, qui décrit une suite d'étapes à effectuer pour mener à bien une opération définie (ex. : phase d'acquisition et de traitement des données) ;
- Une fiche de contrôle, qui permet de lister les différentes étapes à effectuer pour mener à bien un projet et pour contrôler les tâches. Elle permet le bon suivi d'un dossier.

Conclusion

Grâce à cette documentation, TPLM-3D dispose de méthodes de lever à la fois rodées et maîtrisées. Néanmoins, pour y arriver, cette documentation doit s'intégrer au processus de l'entreprise. Elle

doit donc être mise à disposition des salariés se trouvant au bureau ou sur le terrain. Actuellement, ces documents sont stockés sur le serveur de l'entreprise et sont accessibles uniquement depuis les locaux de TPLM-3D. Nous allons donc maintenant nous intéresser à la mise à jour du système qualité de l'entreprise pour faciliter l'accès à ces données.

Nouvelle structure du système qualité

Approche adoptée

La mise à jour du système qualité d'une entreprise est un processus long à mettre en place. Il est essentiel de monter un système à la fois fonctionnel, fiable et pérenne. Nous avons décomposé le travail en huit étapes présentées dans la figure 5.

Détermination des attentes

Cette restructuration va apporter de nombreux changements concernant la manière dont travaillent les membres de l'entreprise. Le risque, dans ce type de projet, est de créer un système avec beaucoup de promesses, mais qui, par la lourdeur des étapes et la densité d'informations, ne prend pas en considération les besoins et les recommandations du

personnel. Les salariés étant les principaux concernés par cette mise à jour du système qualité, il faut que les actions mises en place facilitent le travail sur certaines tâches tout en assurant un suivi qualité tout au long du projet. Il nous a donc semblé essentiel d'avoir connaissance des attentes et des retours d'expérience de chacun. Pour cela, nous avons rédigé un questionnaire pour permettre de mieux nous rendre compte des éléments sur lesquels une remise en question et d'éventuels changements doivent être apportés.

Espace cloud

Après avoir cerné les attentes des salariés et de la direction, nous avons orienté nos recherches sur l'utilisation d'un espace cloud pour le stockage de la documentation du système qualité. Cette espace cloud doit répondre aux trois critères suivants :

- être un espace sécurisé ;
- être accessible sur smartphone ;
- être un espace de stockage collaboratif.

TPLM-3D étant localisé sur le territoire de l'Union européenne et les données traitées portant sur des résidents européens, la Réglementation générale sur la protection des données² s'applique à l'entreprise. Les enjeux du RGPD sont nombreux pour une entreprise : cela améliore la sécurité et la gestion des données ainsi que l'image véhiculée par l'entreprise auprès de sa clientèle. Avant de se lancer dans la rédaction du système qualité, il convient de s'assurer

² RGPD : loi européenne de 2018, qui a pour objectif d'encadrer le traitement des données personnelles sur le territoire de l'Union européenne et de limiter leur exploitation en dehors de leur usage initial.

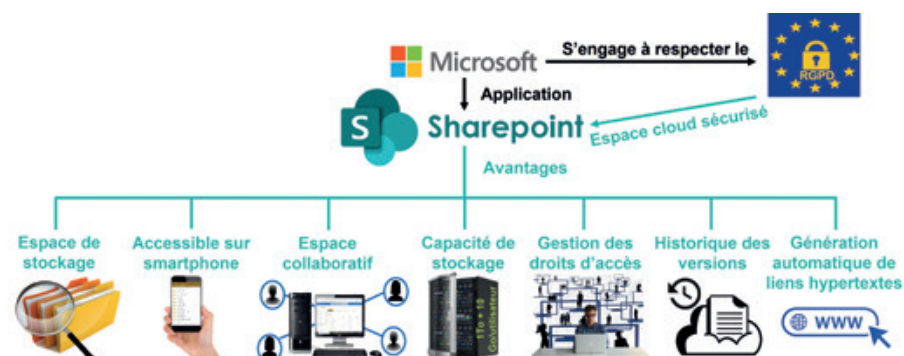


Figure 6. Atouts d'un site SharePoint exploité pour le système qualité.

que le processus mis en place (ex. : mesure de sécurité, types de données traitées et archivées...) soit conforme à cette loi européenne.

TPLM-3D a pris la décision d'utiliser SharePoint (voir figure 6) comme espace central de son nouveau système qualité où les salariés pourront trouver les informations dont ils ont besoin.

■ Outils ajoutés au système qualité

D'autres outils ont été intégrés au système qualité de l'entreprise :

- **L'application OneNote** dédiée à la prise de notes rapide et à la rédaction de croquis sur smartphone (bien que cela n'égale pas aujourd'hui un croquis manuscrit).
- **L'application AutoCAD**, compatible avec SharePoint, choisie ici comme viewer dwg sur smartphone. En l'absence de plan papier sur le terrain, il permet d'accéder au plan numérique afin de disposer d'un support d'échange avec le client.
- **Les fichiers de type formulaire**, présentent les avantages d'un PDF tout en étant directement modifiables sur ordinateur et sur smartphone au bureau et sur le terrain.
- **Les QR Codes** pour accéder rapidement aux documents du système qualité sur le terrain (voir figure 7). Pour la création du QR Code, il a été élaboré un mode opératoire qui consiste à préserver le lien URL SharePoint où sont stockés ces documents. On bénéficie ainsi des trois avantages suivants :
 - La sécurité du stockage des données. Le document restera stocké sur un serveur Microsoft. Il ne part donc pas sur un serveur Google où la politique de confidentialité pose un problème quant à la divulgation des données.
 - La sécurité sur l'accès aux données. Sur le chantier, les passants qui flasheraient ce QR Code devront fournir un identifiant et un mot de passe pour accéder au document. Grâce à cela, TPLM-3D garde le contrôle de l'accès à ses documents disponibles depuis les QR Codes.
 - La conservation du QR Code après la mise à jour d'un document. De cette façon, le lien d'accès sera conservé, ce qui évitera de devoir recréer un QR Code à chaque mise à jour du document.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a permis de mettre en place un système d'aide à la décision qui réalise une classification des méthodes d'acquisition 3D de l'entreprise TPLM-3D en fonction des caractéristiques d'un chantier. Cependant, nous avons constaté que le SAD ne peut prévoir tous les cas de figure. Le risque ici serait de laisser croire à l'utilisateur que cet outil décide pour lui et qu'il est infallible. C'est pourquoi son utilisateur devra toujours être vigilant face aux résultats fournis. De nouveaux tests devraient s'ajouter à cette étude de manière à disposer d'un échantillon plus représentatif sur les résultats fournis. Dans cette recherche de l'amélioration du SAD et de manière à garder cet esprit critique vis-à-vis de la classification annoncée, certains éléments clés sont à prendre en compte :

- la bonne compréhension des attentes du client ;
- la connaissance des points forts et des faiblesses des modes opératoires disponibles ;
- l'anticipation des problèmes pouvant survenir lors de la mission ;
- l'expérience professionnelle.

Les études techniques menées sur le BLK2GO durant ce PFE auront permis à l'entreprise de mieux comprendre son fonctionnement. La documentation rédigée sur ce scanner à main et sur la méthode de préconsolidation servira à uniformiser les méthodes d'acquisition et de calcul tout en limitant le nombre de non-conformités à ce sujet. Elles ont également pour objectif de rendre autonome un salarié qui prend en main pour la première fois ces modes opératoires.

Ce projet de fin d'études aura également permis d'instaurer et de mettre en place les grandes lignes de la mise à jour du système qualité de l'entreprise TPLM-3D. En se basant sur les attentes et les expériences de chacun, il a été possible de monter ce projet fédérateur.

Adapté aux nouvelles méthodes de travail, ce nouveau système qualité est en train de prendre place au sein de l'entreprise. Il conviendra de pour-

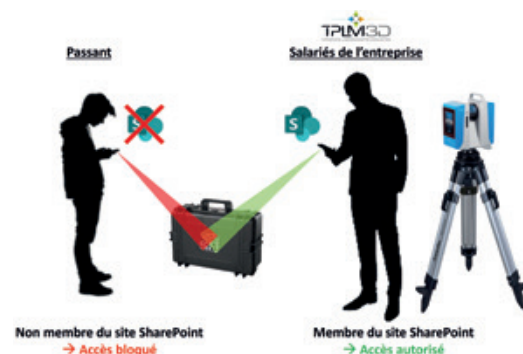


Figure 7. Principe de la sécurité sur l'accès aux données du QR Code.

suivre les formations sur les nouveaux outils auprès des salariés. L'entreprise doit encore finaliser rapidement ce travail sous peine d'avoir à gérer la coexistence de l'ancien et du nouveau système qualité. ●

Remerciements

Je remercie toute l'équipe de TPLM-3D pour sa confiance et sa disponibilité. Un remerciement tout particulier à Hamza Bouch, diplômé de l'ESGT, avec qui j'ai travaillé en collaboration durant six mois et à Philippine Hubert pour son aide au cours de ce projet.

Contact

Joseph Laloux
Ingénieur géomètre-topographe
laloux.joseph@gmail.com

ABSTRACT

Aiming to reorganize and optimize its procedures, TPLM-3D wishes today to globally review its quality system. The work carried out during this graduation project occurred at different stages of a lasergrammetric project: the commercial, the acquisition and data processing phases, as well as the project management phase. The notions of "time" and "quality" were at the core of our thoughts during the realization of the operating modes and the implementation of the new quality system within the company.

[Live+] SIG 2022

Le Géo événement

Du 10 au 14 octobre en format digital

Cette année, nous accueillons comme Grands Témoins



Jérôme Fourquet
*Directeur du Département
Opinion et Stratégies
d'Entreprise de l'Ifop*

Myriam et Pierre Cabon
Aventuriers



**Programme, grands témoins,
partenaires, masterclasses,
animations, inscriptions :
sig2022.esrifrance.fr**

Vous pouvez nous contacter sur :
sig2022@esrifrance.fr



esri France
THE SCIENCE OF WHERE™

Pourquoi le rendu des zones rocheuses sur les nouvelles cartes IGN est-il si différent de l'ancien ?

■ Paul COURBON - Dominique FOUBERT

La rédaction de XYZ est alertée par Paul Courbon, l'un de nos auteurs, sur le rendu des zones rocheuses sur les nouvelles cartes IGN. Il compare les anciennes cartes au 1/25 000 et les nouvelles, que l'on peut également visualiser sur le Géoportail. Excès d'automatisation du dessin, mauvais choix dans les méthodes de restitution, économie des moyens en personnels, Paul essaie de comprendre pourquoi il ne retrouve plus les falaises d'antan, leurs courbes de niveau et leurs ombrages. Sollicité, Dominique Foubert, ancien topographe du service de la cartographie à l'IGN, nous déroule des pistes de réflexion liées à l'historique de la production des cartes. Effectivement, grâce à l'appui de Christophe Pécot, les souvenirs se précisent et Dominique nous explique "pourquoi et comment" on en est arrivé là.

MOTS-CLÉS

Cartographie, restitution falaises, rochers, courbes de niveau

Mais si certaines étapes de cette évolution étaient faciles à mettre en œuvre, d'autres l'étaient moins. Après les discussions qui se sont déroulées et qui rassemblaient certainement des personnes compétentes, celui qui a pris la décision finale a, pour moi, commis un crime de "lèse-cartographie". Il y a des limites à ne pas dépasser. Sur certaines feuilles, on a su ne pas tomber dans l'erreur, mais sur d'autres, on se demande comment on a permis des gribouillis infâmes indignes d'une institution comme l'IGN qui a cartographié dans un nombre impressionnant de pays étrangers. A-t-on laissé trop de liberté à des gestionnaires et de purs informaticiens manquant de formation cartographique ?

Cependant, mettant de côté mon jugement sévère, je me suis adressé au service-client de l'IGN et je livre, ci-après, la réponse que j'en ai reçue.

Le service en charge de la cartographie, auquel vos questionnements ont été soumis, partage votre avis : le rendu numérique tramé des zones rocheuses est beaucoup moins esthétique et représentatif du terrain que celui qui était fait à la main. C'est pour cela que nous avons conservé le dessin manuel "ancien" sur les secteurs à fort enjeu. Sur des zones telles celles que vous avez illustrées, nous avons certainement opté pour une solution de facilité (économies...), avec une régression certaine de qualité.

L'affichage de courbes noires peut effectivement être plus approprié dans certains cas, mais pas partout.

Ce sujet complexe est pour l'instant "mis en pause" en production, mais continue à être étudié à l'ENSG. Nous espérons que des actions concrètes pourront être menées une fois le territoire couvert par un Modèle Numérique de Terrain de haute résolution permettant de nouvelles opportunités techniques à moindre coût.

Un effet négatif d'une informatisation totale

■ L'exemple des zones rocheuses sur les nouveaux 1/25 000 de l'IGN

Des progrès énormes ont été accomplis avec Géoportail de l'IGN, qui permet une exploitation exceptionnelle de la cartographie de notre territoire, avec, en outre, un agrandissement de la carte, la rendant plus lisible et parlante que le tirage papier 1/25 000.

Pourtant, malgré ma satisfaction à utiliser cet outil remarquable, j'ai été désagréablement surpris par l'évolution de certains rendus cartographiques. J'ai été étonné par les gribouillis infâmes que l'on retrouve actuellement sur certaines zones rocheuses et qui ont été acceptés. Dans l'informatisation généralisée, ne pouvait-on trouver mieux ?

Bien sûr, je fais partie de la vieille génération à qui l'on a appris à triturer les courbes et que l'on a amené à faire des levers à la planchette d'une manière parfois excessive. Je suis aussi d'une génération qui a appris son métier avant l'arrivée de l'informatique. Mais je ne pense pas que cela altère mon jugement, car je me suis toujours tenu au courant

de l'évolution des techniques et je sais me servir d'un certain nombre d'outils informatiques.

■ Une évolution prévisible et entrevue depuis trente ans

En plusieurs décennies, l'effectif de l'IGN a fortement baissé, de plus, l'encaissement budgétaire est devenu de plus en plus strict. Il est alors compréhensible qu'avec les progrès enregistrés en informatique, on ait essayé de supprimer les interventions manuelles et recherché un coût de production plus faible et je ne doute pas que cela ait fait l'objet de discussions sérieuses. Je donne ci-après le témoignage du chef de service des cartes aux moyennes échelles au début des années 1990 : "J'ai, à l'époque, abordé le problème du rendu des rochers en présence du chef de projet de la BD topo et cette question a fait polémique, car il n'était pas question de rajouter des données manuelles aux données numériques. Nous avons donc envisagé d'autres solutions qui ont été abandonnées par la suite, et ce, au moment où j'étais appelé à d'autres responsabilités en laissant des consignes à mon successeur".



Comparaison de deux exemples

Je vais comparer ici deux exemples opposés : un sur la feuille de Brignoles (Var) à quelques kilomètres au N.O. du village du Val et l'autre, sur la feuille de Gordes (Vaucluse), à quelques kilomètres du village de Lioux.

Au Val, je n'en ai pas cru mes yeux : même un non-professionnel du dessin n'aurait pu faire pire que ces gribouillis-

lis infâmes censés représenter des zones rocheuses ! C'était pourtant des zones rocheuses d'une pente éloignée de la verticale, où on aurait pu simplement tracer les courbes en noir, ou si cela posait trop de difficultés sur le plan de l'automatisation, ne rien faire (figures 1 et 2).

À Lioux, j'ai pris un exemple qui a évité ces horreurs (j'allais écrire ces erreurs !). Dans la Combe de Vaumale, du fait de la grande pente des rochers,

les courbes se confondent (figure 3). On n'a rien fait, on a laissé les choses en l'état sans se permettre les excès vus au Val (figure 4). Ce n'est pas parfait, mais on ne tombe pas dans les mêmes rendus impensables. Au vu de ces exemples, je laisse le lecteur juger, sera-t-il moins sévère que moi ? ●

Contact

Paul COURBON ITGCE promotion 1956,
paul.courbon@yahoo.fr

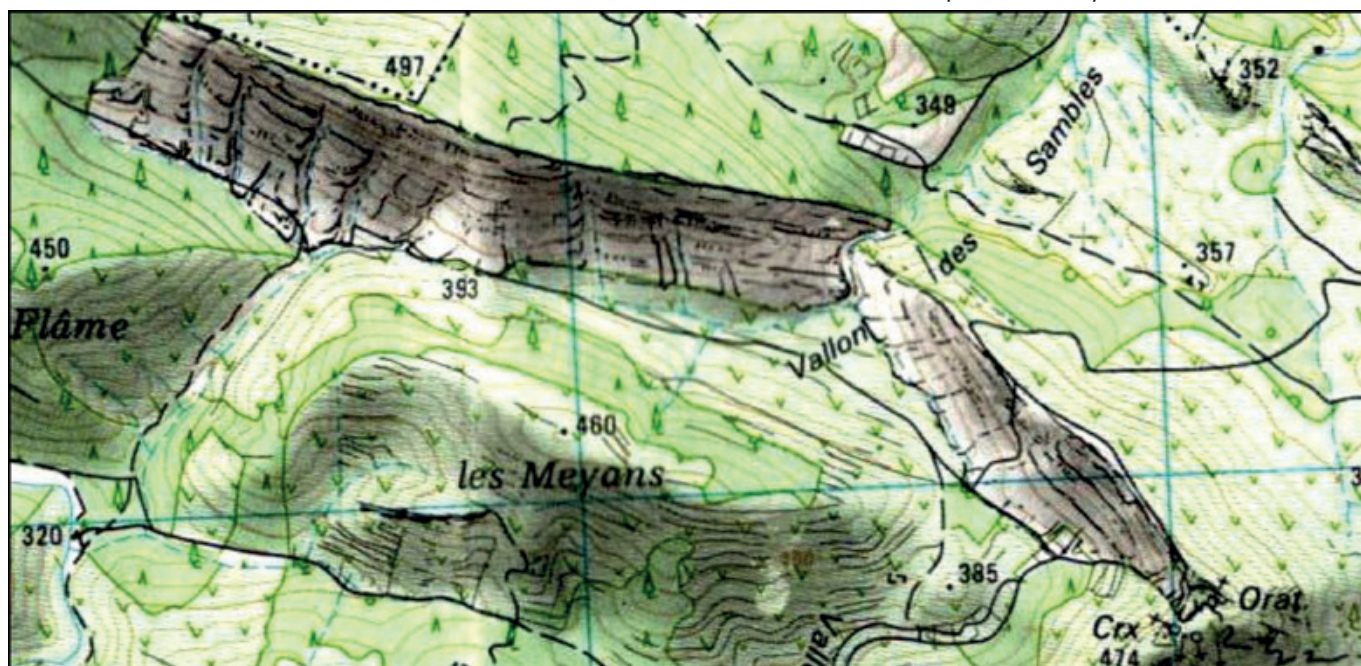


Figure 1. Édition papier 1997 de la carte de Brignoles, le rendu d'une zone rocheuse non verticale, où les courbes sont parfaitement lisibles.

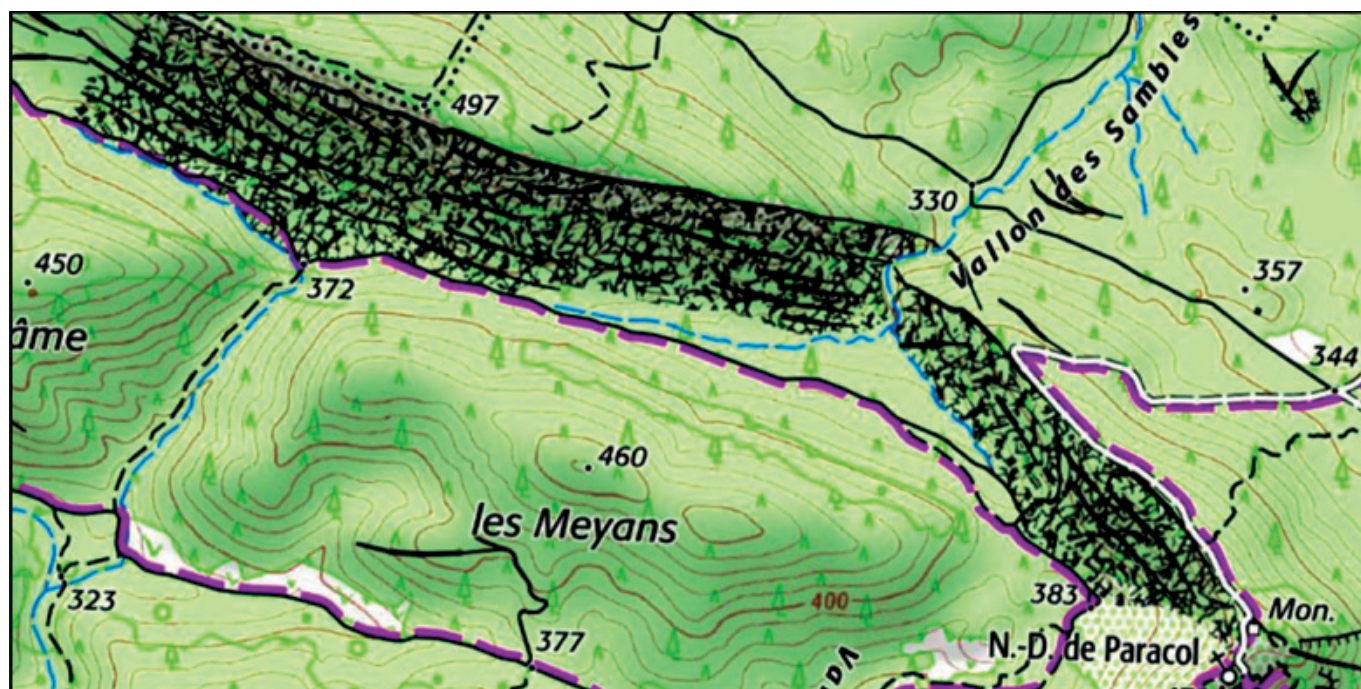


Figure 2. Sur Géoportail, les courbes ont disparu sous un gribouillis infâme qui occulte tout.

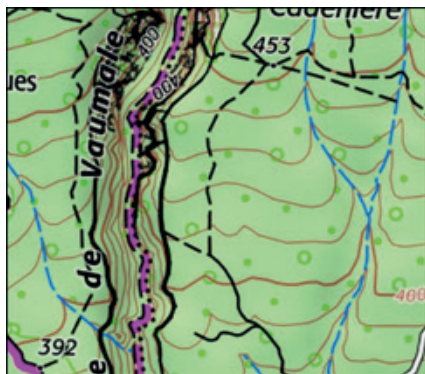
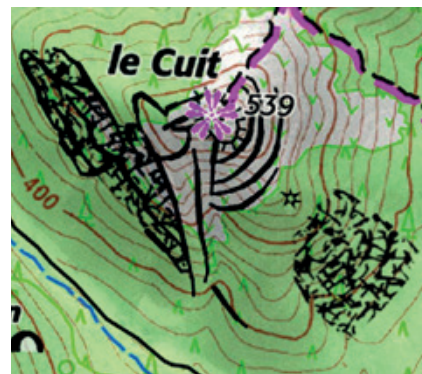


Figure 3. Feuille de Gordes : la Combe de Vaumale est très encaissée et bordée par des parois rocheuses parfois verticales, comme le montrent les courbes qui se confondent.

Figure 4. Feuille de Brignoles : les zones rocheuses sont loin d'être verticales, il aurait suffi de mettre les courbes en noir, ou, si cela posait problème, ne rien faire. Pourquoi ces gribouillis impensables qui occultent tout ?



Problème de la représentation du rocher sur la carte topographique Type 93

Évolution de la carte de base de l'IGN depuis le Type 72

Pour répondre aux questions légitimes que se pose Paul Courbon, j'aimerais remettre l'évolution de la carte au 1/25 000 dans son contexte. Je ne suis pas le mieux placé à l'IGN pour refaire l'historique de la carte, mais en tant que topographe puis chargé de planification de la carte de base de 2010 à 2015, j'ai assisté aux nombreux chamboulements de la carte topographique au 1/25 000, parfois en tant qu'acteur, mais souvent en tant que spectateur.

Bref historique

Mise au point du Type 93

Le projet de la nouvelle carte de base issue des bases de données numériques en cours de constitution a abouti au début des années 90 à une montée en charge des LPI (lignes de production intégrée), ateliers au nombre de six, d'une vingtaine de personnes chacun regroupant reconstituteurs, topographes et opérateurs de saisie sur ordinateur. Il y avait une forte émulation dans ces LPI, car le personnel était jeune

et les différents corps travaillaient en collaboration. Les reconstituteurs qui le souhaitaient pouvaient faire une mission dans l'année sur le terrain. Le travail s'apparentait à du complètement, car le topographe travaillait à partir d'un brut de restitution et faisait du levé à la planchette et des enquêtes en mairie. L'avantage du numérique, c'est qu'il suffisait de coder les objets (routes, chemins, sentiers, maisons, hangars, etc.) pour qu'ils apparaissent sur l'écran de l'ordinateur avec la bonne symbolisation.

La production est montée en puissance, les LPI comptaient bientôt une centaine de personnes quand, en 2001, l'État a demandé d'accélérer la constitution de la BDTopo, car les départements et régions étaient tous demandeurs de données numériques et il leur était insupportable d'attendre la fin de la BDTopo en 2017. Nous n'avions réalisé que 25 % du territoire en BDTopo en 2001, même si cela représentait presque 60 % de la population, car nous avions commencé par les grandes villes et les départements commandés comme le Vaucluse et l'Hérault.

Accélération de la BDTopo

Le service de la recherche a proposé de faire la carte par corrélation automatique à partir de photos aériennes, mais les résultats n'étaient pas probants. La chef de service du SIT a fait une contre-proposition : elle s'est engagée à terminer la France en cinq ans et a tenu parole, car en 2006, c'était fait.

Seulement, il a fallu se contenter de restituer les réseaux et le bâti pour gagner du temps. Les thèmes abandonnés ont été l'orographie surfacique (rochers, éboulis, moraines...), la végétation, les courbes de niveau, l'information touristique.

Comme le terrain a été abandonné, il a été créé un service de Mise à jour en continu, la Majec, délocalisée dans chaque département, pour vérifier le réseau routier et en faire la mise à jour. C'est le thème prépondérant pour les administrations territoriales.

Quand on a décidé de faire une carte topographique avec cette nouvelle base de données incomplète, il a fallu se soucier des thèmes abandonnés lors de la restitution.

Création du Type 2010

Le Type 2010 est né après avoir créé la base de données complémentaire faisant appel aux données de l'Inventaire forestier national pour la végétation, au programme de calcul automatique des points cotés (autre catastrophe que n'a pas encore relevée Paul !), à la base de données toponymique, la BDNyme. Cette BDComplémentaire comprend aussi le thème touristique, les sentiers balisés dont la mise à jour est obtenue grâce à la livraison de la base numérique de la FFRP et les ponctuels touristiques (points d'intérêt, monuments historiques, tous les pictogrammes touristiques) ont été numérisés à partir des cartes existantes.

Cas particulier de la représentation du rocher et des courbes de niveau

Pour ces thèmes, c'est le pragmatisme qui s'est imposé et le dogme du tout numérique a volé en éclat. Le Type 93 est fondé sur le principe d'une base entièrement numérique, la carte étant l'image des données numériques. Seule exception à cette règle, la planche raster de l'estompage qui se combinait avec les données numériques en toute fin du processus cartographique.

Concernant le Type 2010, la décision a donc été prise de représenter le thème orographique surfacique ainsi que les courbes de niveau à partir des planches raster de l'ancienne carte topographique traditionnelle.

En effet, les courbes de niveau calculées automatiquement à partir du Modèle numérique de terrain, le MNT, étaient trop imprécises. On a repris les anciennes planches de courbes, mais en passant beaucoup de temps à faire les raccords de courbes entre les différentes cartes, soit automatiquement après vectorisation des courbes raster, soit manuellement sur écran.

Concernant le rocher, la décision a été prise de récupérer le rocher sur les anciennes cartes, car son rendu était optimum et qu'il serait dommage de laisser tomber ce patrimoine.

Or, le problème était complexe. Je reprends ici les informations que m'a fournies Christophe Pécot, cheville ouvrière de la cartographie et seul véritable expert dans le domaine de la carte d'aujourd'hui :

"Toutes les planches du 25k analogique ont été scannées, à assez haute résolution : 800 dpi. Et notamment les planches du noir plani (où figuraient le rocher). Elles ont été, dans un premier temps, utilisées pour la révision cartographique avec le processus Ocad dans les années 2000.

L'essentiel du rocher à l'effet Type 72 (concernant essentiellement les Alpes, la Corse et l'est des Pyrénées) a donc pu être préservé dans l'état où on l'a trouvé.

Malheureusement les "anciens" n'ont pas pris soin de conserver ces planches correctement :

- *Les planches du noir sans toponymes ont été détruites, entraînant la disparition du rocher à l'effet sous les toponymes ;*
- *La constitution des fonds TOP25 (assemblage de films) et le passage en quadri ont détérioré le rocher notamment dans les Pyrénées (rocher Type 22) : le rocher imprimé en gris dans les années 50 a été tramé (avec les courbes qui étaient représentées dans cette même couleur) rendant illisible le résultat.*

Les travaux effectués ces dernières années sur le sujet nous ont pris du temps pour mixer le rocher avec les données vecteurs BDUni et BDAIti (courbes) :

- *dans un premier temps, nous avons dû nous contenter d'éliminer ce qui n'était pas du rocher des planches du noir plani sans effacer les toponymes et cotes situés à l'intérieur ;*
- *dans un deuxième temps, nous avons "désincrusté" les toponymes et cotes des images précédentes pour pouvoir représenter en vecteur toponymes et cotes.*

Cela dit, nous n'avons pas fait ces travaux sur les planches où n'existaient que peu de rocher à l'effet (Massif central, en particulier).

Les zones telles que les lapiaz n'ont pas toutes été récupérées.

À l'heure actuelle :

- *toujours pas de méthode pour représenter le rocher à l'effet ;*
- *pas d'identification des zones rocheuses, notamment dans l'OCS GE (Occupation du sol grande échelle) :*
 - *les courbes de niveau très détériorées dans les Pyrénées pourraient être dans certaines zones (dépourvues de végétation haute) recalculées à l'aide du MNS ;*
 - *l'arrivée des MNT LiDAR HD dans les prochaines années (à partir de 2023) permettra de calculer des courbes vecteur de bonne qualité dans toutes les zones montagneuses.*
- *le sujet du rocher (et de la carto en général) ne mobilise pas les foules, notamment à la DP ;*
- *nous sommes 15 dans l'unité carte de base et nous ne pouvons plus répondre à la commande DP."*

Concernant la représentation du rocher sur le Type 93 dont Paul a pointé le mauvais rendu cartographique, c'est la trame appliquée sur les zones rocheuses qui donne cet aspect confus. La BDTopo faite dans les Alpes de Savoie pour les JO d'Alberville en 92 ainsi que les départements de l'Hérault et du Vaucluse, entre autres, a été traduite par des cartes dont la représentation du rocher est entachée de cette mauvaise représentation.

En attendant le LiDAR, la solution pourrait être de reprendre la bonne représentation du rocher sur la carte antérieure, mais comme le dit si bien Christophe Pécot, ce problème n'est pas la priorité de la Direction de la Production. ●

Contact

Dominique FOUBERT

Ancien topographe du service de la cartographie à l'IGN,
foubert.dominique@orange.fr

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the quality of the mapping of rocky areas on the 1:25,000 scale maps produced by the IGN according to the date of production. It is shown the differences between the various versions and the causes of the graphic restitution choices.

Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : utilisation concrète et simulations de levés bathymétriques au sonar multifaisceaux

■ Thomas TOUZÉ

Cet article prolonge le précédent [Touzé, 2022] sur la proposition d'une nouvelle modélisation de la réfraction basée sur le rapprochement des méthodes employées en topométrie et en hydrographie. Dans ce nouvel opus, nous mettons en avant les limites des hypothèses du dernier modèle que nous avons pu corriger. Ainsi, nous fournissons les formules de cette nouvelle proposition qui sont exploitables du fait que les profils de célérité qu'elle requière sont mesurables sur le terrain à l'aide d'une sonde SVP en bathymétrie, ou de profils de température en terrestre. Ces nouvelles formules ne sont pas démontrées dans cet article, toutefois une publication finale, synthétisant tous ces travaux, est en cours de rédaction. Dans cet article nous présentons, ensuite, des résultats de simulations bathymétriques basées sur deux vrais profils de célérité et qui montrent une correspondance avec du lancer de rayons qui est centimétrique, pour des mesures jusqu'à 60 m, ou décimétrique, pour des bathymétries à très grandes profondeurs (2 250 m). Enfin, nous discutons de la mise en œuvre de ce modèle en topométrie ou pour des levés aéroportés et estimons les performances qu'il pourrait atteindre dans ce contexte.

MOTS-CLÉS

Réfraction terrestre, réfraction acoustique, loi de Snell-Descartes, équation eikonale

Version finale du modèle

■ Résumé des travaux précédents

Dans notre précédent article [Touzé, 2022], publié dans cette revue, nous avons :

1. Démontré que la loi de Snell-Descartes impliquait l'équation eikonale ;
2. Exprimé l'équation eikonale de manière tensorielle ;
3. En partant de cette dernière, sous les hypothèses d'une Terre localement sphérique et de la verticalité du gradient de célérité, obtenu l'équation différentielle de degré 2 (voir éq. 53 p. 33) régissant la dénivelée le long du chemin ;
4. Résolu cette équation en approchant les intégrales par des sommes.

Pour cette dernière étape, nous avons supposé connaître, tout le long de la trajectoire de notre onde, les valeurs v_i et v'_i de la célérité et de son gradient selon n couches isochrones, c'est-à-dire des couches que l'onde traverse selon une durée constante. Ce prérequis ne nous satisfaisait pas du fait que ces couches ne peuvent pas être connues a priori. Par conséquent, de tels profils de célérité et de gradient sont impossibles à mesurer.

Nous avons donc entrepris de repartir de l'équation différentielle. Nous sommes parvenus à la résoudre d'une manière plus rigoureuse et élégante. Nous n'allons pas présenter ici la démonstration, mais simplement les résultats. Présentement, nous préparons un article qui fera la synthèse de tous ces travaux et inclura cette résolution.

Nous sommes donc toujours dans le cadre de la *figure 1* dans laquelle, connaissant l'angle d'émission, la durée

Notre précédent article sur la réfraction partait du constat qu'en topométrie et en hydrographie, le même phénomène physique était traité selon deux approches très différentes, à savoir :

- du lancer de rayons en bathymétrie en s'appuyant sur la mesure régulière de profils de célérité ;
- en topométrie, une dissociation de l'échelle et de la rotation, avec, pour cette dernière, l'introduction du coefficient de réfraction que les topographes peinent à lier à des mesures météorologiques.

Dans cet article, nous avons pu démontrer que les réfractions topométriques et bathymétriques étaient équivalentes en termes de modélisation. Nous avons également proposé une modélisation qui, malheureusement, reposait sur des profils de célérité impossibles à mesurer.

Dans ce nouvel article sur la réfraction, nous présentons les résultats de notre modèle corrigé. En effet, la modélisation des effets de la réfraction sur la longueur et la déviation angulaire se fonde désormais sur des profils de célérité mesurables sur le terrain. La démonstration de ce modèle ne sera pas présentée ici. Nous préparons actuellement une publication finale et anglophone qui contiendra l'intégralité de ce travail. Ainsi, nous nous concentrons ici sur le résultat de notre proposition de modélisation de la réfraction sur des levés bathymétriques simulés, mais reposant sur de réelles mesures de célérité gracieusement mises à notre disposition par les sociétés GEOxyz et iXBlue. L'analyse de ces résultats bathymétriques nous permet enfin d'estimer ce qui pourrait être obtenu en topométrie ou lors de levés aéroportés.

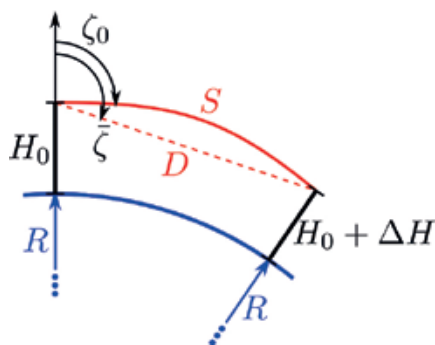


Figure 1. Soit une visée émise selon un angle zénithal ζ_0 et une durée de trajet Δt . Nous cherchons à résoudre la longueur S et l'angle ζ corrigé de la réfraction.

du trajet et le champ de célérité, nous cherchons à déterminer la position de la sonde mesurée.

■ Profil de célérité

De l'émetteur à la sonde mesurée, nous mesurons, à pas spatial constant, p valeurs v_i de la célérité et de son gradient v'_i . Le long du trajet, nous disposons donc des profils de la célérité et du gradient de célérité.

Soit l'altitude H . Pour exprimer le gradient, nous introduisons h que nous définissons ainsi :

- pour des mesures immergées,
 $h = H - H_{SL}$ avec H_{SL} l'altitude de la surface libre, ainsi, h est l'opposé de la profondeur ;
- pour des mesures émergées,
 $h = H - H_{sol}$ avec H_{sol} l'altitude du sol.

Nous définissons ainsi le gradient v' de la manière suivante.

$$v' = \frac{dv}{dh}$$

■ Résolution de la longueur S du trajet

Nous connaissons la durée du trajet Δt . Cette durée correspond ici à la moitié de celle du trajet aller-retour. Nous cherchons la célérité moyenne vraie¹ \hat{v} telle qu'il soit possible d'écrire :

$$S = \hat{v} \Delta t$$

Cette célérité moyenne peut se déduire de la moyenne arithmétique des inverses de la célérité le long du trajet selon l'expression suivante [Touzé, 2023] :

$$\frac{1}{\hat{v}} = \frac{1}{S} \int_0^S \frac{1}{v} ds \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{1}{v_i}$$

¹ En hydrographie, on parle de célérité harmonique.

$\hat{w} = \frac{1}{S} \int_0^S v ds \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p v_i$	$\rho = \frac{\int_0^S s v ds}{S \int_0^S v ds} \approx \frac{\sum s_i v_i}{S \sum v_i}$
$\hat{w}' = \frac{1}{S} \int_0^S v' ds \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p v'_i$	$\rho' = \frac{\int_0^S s v' ds}{S \int_0^S v' ds} \approx \frac{\sum s_i v'_i}{S \sum v'_i}$
$\sigma_w^2 = \frac{1}{S} \int_0^S \Delta v^2 ds \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \Delta v_i^2$	$\rho_{ww} = \frac{\int_0^S s \Delta v^2 ds}{S \int_0^S \Delta v^2 ds} \approx \frac{\sum s_i \Delta v_i^2}{S \sum \Delta v_i^2}$
$\sigma_{ww'} = \frac{1}{S} \int_0^S \Delta v \Delta v' ds \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \Delta v_i \Delta v'_i$	$\rho_{ww'} = \frac{\int_0^S s \Delta v \Delta v' ds}{S \int_0^S \Delta v \Delta v' ds} \approx \frac{\sum s_i \Delta v_i \Delta v'_i}{S \sum \Delta v_i \Delta v'_i}$

Tableau 1. Pour la détermination de la dénivelée vraie et de la correction angulaire, il est nécessaire de déduire des profils de célérité et du gradient les moyennes, moyennes pondérées, variances et covariances suivantes.

■ Expressions de la dénivelée vraie et de la correction angulaire

Avec ce nouveau modèle, dans sa version corrigée, nous pouvons exprimer exactement la dénivelée vraie ΔH entre l'émetteur et la sonde mesurée en fonction des huit paramètres dans le tableau 1 (avec $\Delta v = v - \hat{w}$ et $\Delta v' = v' - \hat{w}'$). Si ces profils sont bien mesurés à pas spatial constant le long du trajet, alors ces huit paramètres s'obtiennent par des moyennes arithmétiques, des moyennes pondérées, des variances empiriques ou des covariances empiriques [Touzé, 2023].

Dans la première ligne de ce tableau, nous trouvons la célérité moyenne spatiale \hat{w} et le coefficient ρ . Le couple formé par \hat{w} et la longueur ρS peut être interprété comme le barycentre du profil de célérité le long du trajet. Pour la deuxième ligne, de la même façon, le couple $(\hat{w}' \rho' S)$ correspond au barycentre du profil du gradient.

Les quatre autres termes, en lien avec la variance de la célérité (troisième ligne) et la covariance célérité-gradient (dernière ligne), ont une influence bien plus faible dans le résultat final, mais permettent d'obtenir une expression exacte de la dénivelée.

Nous pouvons alors introduire les coefficients suivants :

- la correction de variance
 $\mu = (1 - \rho_{ww}) \frac{\sigma_w^2}{\hat{w}^2}$

- la correction de covariance

$$\mu' = (1 - \rho_{ww'}) \frac{\sigma_{ww'}}{\hat{w} \hat{w}'}$$

- le coefficient de réfraction $k = \frac{R \hat{w}'}{\hat{w}}$

Exprimons maintenant la dénivelée vraie ΔH et la correction angulaire $\Delta \zeta$. Nous obtenons :

$$\Delta H = S \cos \zeta_0 + K \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{2R}$$

$$\Delta \zeta = \bar{\zeta} - \zeta_0 = \frac{S \sin \zeta_0}{2R} (1 - K)$$

Avec v_0 la célérité à l'émission et K défini par

$$K = \frac{\hat{w}^2}{v_0^2} ((3 - 4\rho + 2\mu) - k(3 - 2\rho - 2\rho' + 2\mu'))$$

Simplification

Lorsque les variations relatives de la célérité et du gradient sont faibles, nous avons :

- $\mu \approx \mu' \approx 0$
- $\rho \approx \rho' \approx 1/2$

Ce qui donne

$$K \approx \frac{\hat{w}^2}{v_0^2} (1 - k)$$

Si de surcroît les visées sont proches de l'horizontale (ce qui implique $\hat{w} \approx v_0$), nous retombons sur le modèle standard, en topométrie, du nivellement trigonométrique.

Simulations en bathymétrie

■ Profils de célérité en fonction de la profondeur

Lors de levés bathymétriques, des profils de célérité selon la profondeur

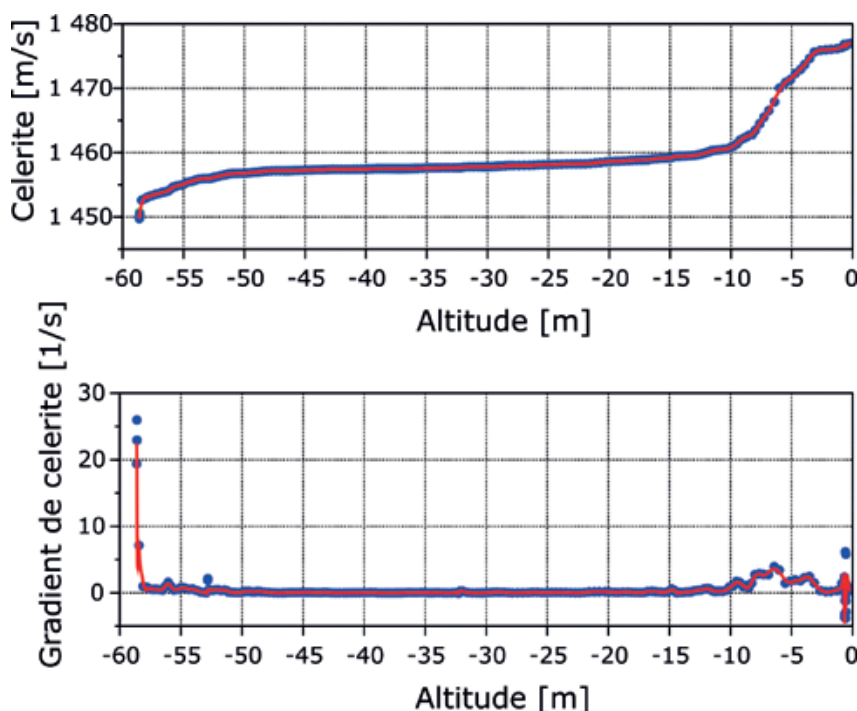


Figure 2. Profil de célérité mesuré en juin 2019 sur le lac de Monteynard par la société GEOxyz. Le gradient est déduit du profil. En bleu les mesures, en rouge les courbes extrapolées.

sont régulièrement mesurés à l'aide de systèmes de mesures idoines (SVP pour *Sound Velocity Profiler*). Il est également fréquent qu'un célérimètre de coque (SVS) soit présent à proximité immédiate du sonar. Lorsque la célérité mesurée par ce dernier diffère trop du dernier profil de

célérité mesuré, l'hydrographe reçoit une alerte, signe qu'il est temps de mesurer un nouveau profil. En figure 2 et en figure 3, nous présentons deux profils réels de célérité mesurés, respectivement, en eau douce lacustre par GEOxyz et en Méditerranée par iXBlue.

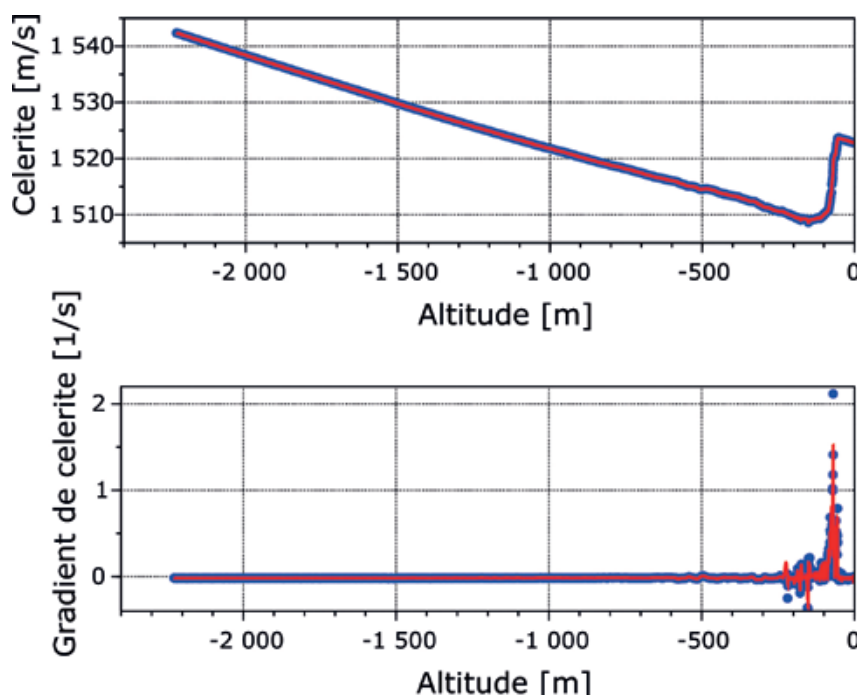


Figure 3. Profil de célérité au large de Toulon en grande profondeur mesuré par la société iXBlue.

Pour appliquer notre modèle, il est nécessaire de connaître la célérité et son gradient le long de la visée. Or, en bathymétrie, le profil est mesuré à peu près verticalement. S'il s'agit d'un levé au sonar monofaisceau, notre modèle peut être appliqué tel quel. Cependant, dans le cas d'un levé au sonar multifaisceaux, une correction doit être apportée du fait de la non-verticalité des mesures.

■ Méthodologie en bathymétrie

Avant tout nous remarquons que

$$\frac{dH}{ds} = \cos \zeta$$

C'est-à-dire

$$\delta s = \frac{\delta H}{\cos \zeta}$$

De plus, le cosinus peut se déduire de deux manières différentes en fonction de la célérité et de l'angle d'émission. La première est exacte, mais perd le signe tandis que la seconde conserve le signe, mais est approximative.

$$|\cos \zeta| = \sqrt{1 - \frac{v^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2}}$$

$$\cos \zeta \approx \left(1 - \frac{v - v_0}{v_0} \tan^2 \zeta_0\right) \cos \zeta_0$$

Nous pouvons donc déduire le signe de la seconde expression et l'appliquer à la première pour obtenir le cosinus. Ainsi, dans nos intégrales définissant tous les paramètres utiles de notre modèle, nous pouvons remplacer ds par $dH / \cos \zeta$. Et si les profils de célérité et du gradient sont définis selon un pas constant en profondeur, alors les intégrales se simplifient très bien en sommes.

Par exemple, pour la célérité moyenne isométrique, nous obtenons :

$$\bar{w} \approx \frac{\sum \frac{v_i}{\cos \zeta_i}}{\sum \frac{1}{\cos \zeta_i}}$$

Pour le calcul des coefficients ρ , ρ' , ρ_{ww} et $\rho_{ww'}$, nous pouvons employer une astuce reposant sur une matrice triangulaire inférieure contenant les inverses des cosinus.

La résolution se fait de manière itérative en estimant grossièrement la dénivelée à partir de la célérité de coque et l'angle d'émission. Cela permet de sélectionner l'intervalle du profil de célérité à partir

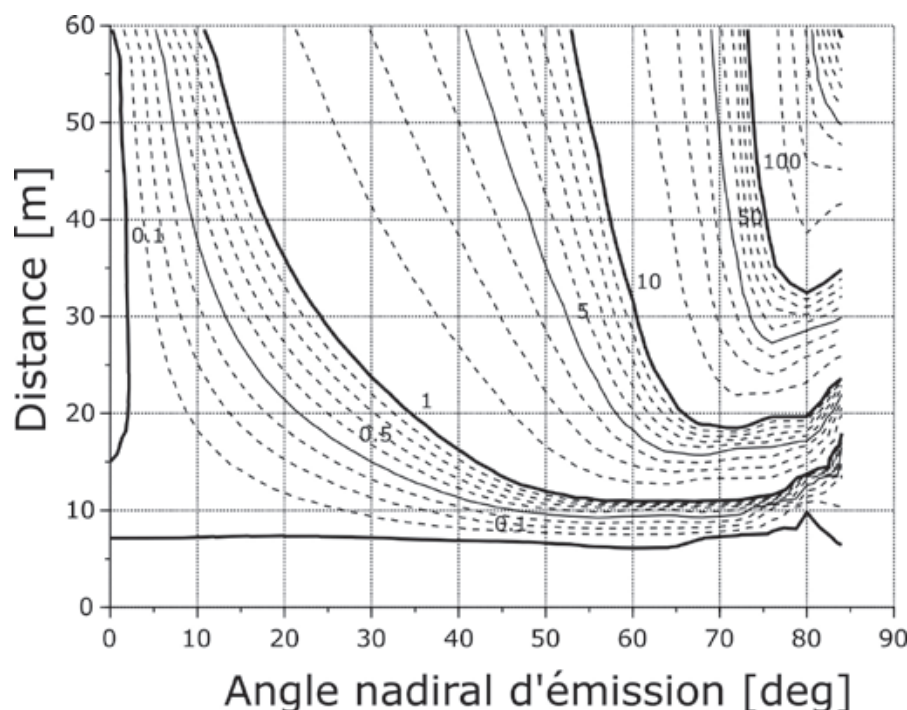


Figure 4. Écarts 3D en mm entre le lancer de rayon au pas de 2 cm et le nouveau modèle sur la simulation d'un levé bathymétrique sur le lac de Monteynard.

duquel nous calculons nos paramètres. À chaque itération, nous améliorons l'estimation de la longueur du trajet et de la correction angulaire.

■ Comparaison en milieu lacustre, sur 60 m, avec du lancer de rayons

À partir du profil de célérité mesuré sur le lac de Monteynard, nous avons effectué 440 simulations de lancer de rayon, avec un angle nadiral allant de 0 à 84° tous les 4° et des distances allant de 1 m à 60 m. Le pas du lancer de rayon était de 2 cm. Nous avons alors comparé les coordonnées issues de notre modèle avec celles issues du lancer de rayon. Les écarts en mm sont représentés en figure 4.

Nous constatons des écarts qui se dégradent pour les visées les plus longues et les plus horizontales. Toutefois, les résultats sont prometteurs. En effet, pour des angles nadiraux d'émission inférieurs à 55°, les écarts sont inférieurs au centimètre. Au plus près du nadir, jusqu'à 12°, les écarts sont inférieurs au millimètre.

Nous supposons que la dégradation en s'approchant de l'horizontale vient du terme correctif de la célérité en $1/\cos \zeta$ qui, pour ces visées, devient crucial tout autant que délicat à estimer exactement. À notre décharge, il est logique

que l'estimation de la trajectoire depuis un profil de célérité vertical perde en précision pour des visées horizontales.

■ Comparaison sur 2 300 m en mer Méditerranée

La même comparaison a été faite à partir du profil de célérité en grande profondeur en figure 3, jusqu'à près de 2 250 m. Le pas du lancer de rayon était

cette fois-ci de 50 cm. Nous obtenons les écarts, exprimés en millimètres, en figure 5. Les résultats sont globalement supérieurs d'un ordre de grandeur à ceux du lac de Monteynard. Ils sont également plus bruités.

En général, sur de telles profondeurs, l'ouverture des sonars multifaisceaux ne dépasse pas 40°. Les écarts que nous obtenons à une telle ouverture angulaire sont inférieurs à 5 cm pour les distances inférieures à 1 500 m et atteignent 10 cm au-delà de 2 200 m.

Le bruit pourrait être réduit en diminuant le pas du lancer de rayon, cependant le temps de calcul s'en trouverait augmenté.

Nous supposons, par rapport au résultat obtenu sur Monteynard, que cet exemple est plus difficile du fait de la rupture de célérité à 80 m jusqu'à la thermocline vers 100 m. De telles variations requièrent, notamment pour le calcul du gradient, un meilleur traitement de la célérité que celui que nous avons mis en œuvre.

Utilisation potentielle en topométrie

■ Lien entre le modèle et les mesures physiques

Le modèle proposé repose sur la mesure de profils de célérité desquels

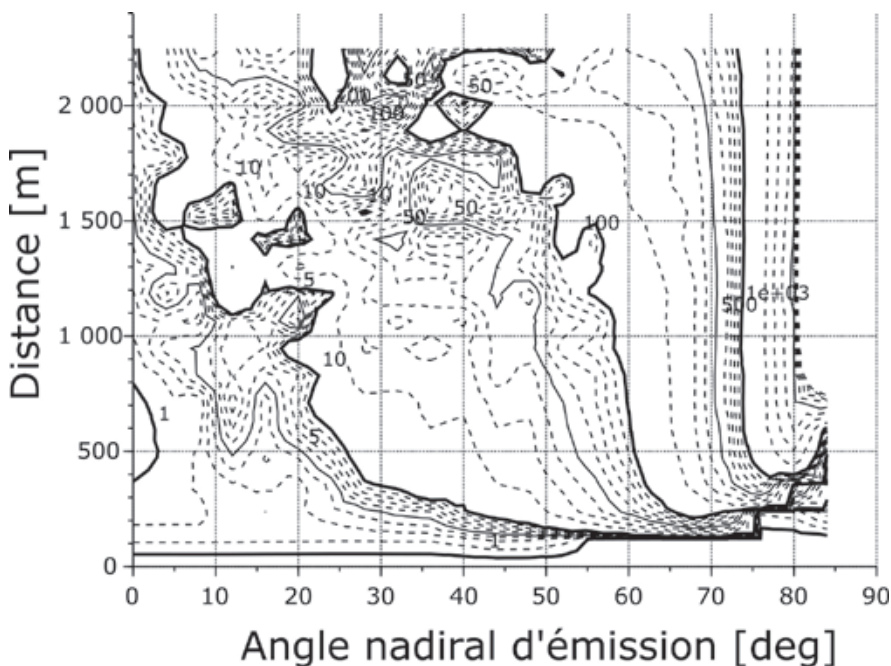


Figure 5. Écarts 3D en mm entre le lancer de rayon au pas de 50 cm et le nouveau modèle sur la simulation d'un levé bathymétrique en mer Méditerranée.



découlent les profils du gradient, puis les paramètres nécessaires aux formules présentées. Si nous mesurons des profils de température, complétés par quelques mesures de pression et d'humidité relative, et connaissant la longueur d'onde du signal à traiter, alors, en appliquant et en dérivant les formules de Ciddor² [Ciddor, 1996], il est possible d'en déduire le profil de célérité ainsi que son gradient.

■ En auscultation

Imaginons un drone équipé d'une sonde de température capable de mesurer à une fréquence de l'ordre du Hertz et d'éviter les biais thermiques potentiellement engendrés par le vol et le Soleil. Une mesure de profils de température le long de quelques visées bien choisies serait possible et permettrait de calculer les paramètres de réfraction nécessaires à l'exacte correction des angles zénithaux. Dans le cadre du monitoring, nous pourrions même appliquer une tactique inspirée de la bathymétrie en comparant la température au niveau de la station par un thermomètre fixe et celle déduite du profil : un écart trop grand déclenchant automatiquement un nouveau profil.

■ En LiDAR et en photogrammétrie

Le modèle proposé permet, *in fine*, d'exprimer tous les effets de la réfraction sous la forme d'une rotation et d'un facteur d'échelle. En effet, pour la rotation, nous avons pu déterminer la correction angulaire $\Delta\zeta$ à apporter à l'angle zénithal d'émission. Ainsi, si nous prenons le vecteur tangent à l'émission, la direction vers le point mesuré s'obtient en appliquant la rotation d'angle $\Delta\zeta$ autour du vecteur normal au plan vertical de l'émission.

De cette manière, tant en LiDAR qu'en photogrammétrie, la réfraction pourrait s'insérer sans aucune difficulté dans leurs équations de géolocalisation respectives, car dans les deux cas, celles-ci sont matricielles.

De plus, pour les levés photogrammétriques et LiDAR aéroportés, les profils

de célérité pourraient, *a minima*, être mesurés au décollage et à l'atterrissage.

Conclusion

Ces premiers résultats sont encourageants pour plusieurs raisons. Tout d'abord, en dehors des émissions proches de l'horizontale, les comparaisons en bathymétrie avec le lancer de rayons donnent des écarts tout à fait satisfaisants par rapport à la norme S44 de l'OHI (Organisation hydrographique internationale) sur les levés hydrographiques. Nous obtenons ainsi des écarts de l'ordre du centimètre pour des sondes à moins de 60 m et de l'ordre du décimètre jusqu'à 2 000 m.

Notre approche présente également un avantage en termes de temps de calcul. En effet, sur de telles longueurs, les lancers de rayon que nous avons effectués se faisaient pour Monteynard et Toulon, respectivement, en 3 000 et 4 500 pas pour les faisceaux les plus longs. Le modèle proposé, quant à lui, nécessitait en moyenne six itérations. Certes, nous n'avons pas encore effectué de mesures ni de simulations en optique ni en LiDAR. Cependant, des résultats obtenus en bathymétrie, nous pouvons extrapoler ceux que nous pourrions avoir en mesures optique ou laser. En effet, l'ordre de grandeur des variations relatives maximales des célérités testées était de 0.02 (environ 30 m/s pour une vitesse de 1 500 m/s). Or, dans le domaine visible ou proche infrarouge, les variations relatives de la célérité du fait des variations météorologiques sont considérablement plus faibles : de l'ordre de 1 ppm par degré Celsius. Prenons 20 °C de variations dans un cas très défavorable, ce qui correspond à une variation relative maximale de la célérité de la lumière de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$; mille fois plus faible qu'en bathymétrie ! Nous nous attendons donc à des résultats mille fois meilleurs en topométrie. Nous sommes évidemment preneurs de données pour mettre à l'épreuve tout cela dans les contextes de levés topométriques, LiDAR et photogrammétriques.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement les sociétés GEOxyz et iXBlue pour la mise

à disposition de données nécessaires à nos simulations, ainsi que pour leur intérêt dans nos développements. ●

Bibliographie

[Touzé, 2022] *Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : nouveau modèle dans le cas d'une stratification verticale de la célérité en Terre localement sphérique*, T. Touzé, 2022, XYZ n° 170, pp. 28 à 35.

[Touzé, 2023] *Generalization of terrestrial and bathymetric refractions: New model in the case of a vertically stratified propagation velocity on a locally spherical Earth*, T. Touzé, en cours de rédaction, à publier dans une revue à définir.

[Ciddor, 1996] *Refractive Index of Air : new equations for the visible and near infrared*, Philip E. Ciddor, Applied Optics, volume 35 n° 9, 1566-1573 (1996).

Contact

Thomas TOUZÉ
thomas.touze@edf.fr

ABSTRACT

This article extends the previous one [Touzé, 2022] on the proposal of a new modeling of refraction based on bringing together the methods used in surveying and hydrography. In this new opus, we highlight the limits of the hypothesis of the last model that we were able to correct. Thus, we provide the formulas of this new proposal which are exploitable because the celerity profiles it requires are measurable on the ground using an SVP probe in bathymetry, or temperature profiles on land. These new formulas are not demonstrated in this article, however a final publication, summarizing all this work, is currently being written. In this article, then, we present the results of bathymetric simulations based on two real celerity profiles and which show an adequation with ray tracing which is centimetric, for measurements up to 60 m, or decimetric, for bathymetries at very great depths (2,250 m). Finally we discuss the implementation of this model in land-surveying or for airborne surveys and estimate the performance it could achieve in this context.

² Les formules proposées par Ciddor permettent, connaissant la température, la pression atmosphérique, la pression de vapeur d'eau saturante et la teneur en CO₂, de calculer l'indice de réfraction. Ce modèle est recommandé par l'association internationale de géodésie (IAG).

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)**



L'orthogonalisation généralisée une solution algorithmique au problème des moindres carrés

■ Joël VAN CRANENBROECK

La méthode des moindres carrés a été conçue par Legendre et devait servir à la détermination des paramètres orbitaux des planètes. C'est un peu plus tard que Gauss a donné à cette méthode les bases et les formulations mathématiques rigoureuses. Depuis, de nombreux mathématiciens ont apporté leurs contributions au développement et aux applications de cette méthode. Citons Laplace, Tchebychev, Kalman et Markov. Des travaux importants ont été réalisés également par des géodésiens comme Doolittle, Helmert, Tienstra, Meissl et Moritz. En Belgique, nous devons faire référence aux travaux de Marchant, Baetslé et Van Den Herrewegen. On a aussi associé à certains algorithmes le nom de ceux qui ont proposé des méthodes originales permettant la résolution numérique associées à cette méthode, comme en France Cholesky et Levallois. Les autres Banachiewicz, Gauss et Jordan sont bien connus.

■ MOTS-CLÉS

Moindres carrés, calcul matriciel, ajustement, orthogonalisation, réseaux de nivellement, algorithme, programmation

Professeur Baarda [15] de Delft pour la détection des erreurs grossières, mais également pour produire les indicateurs de fiabilité interne et externe et l'ajustement de réseaux libres qui font appel à l'inversion généralisée.

L'orthogonalisation généralisée a été systématiquement utilisée dans nos logiciels à cette époque, mais également pour tous les logiciels que nous avons développés après et notamment, par exemple, pour le logiciel StarTopoTX de la société Star Informatic (qui devint Star Apic et fut rachetée par 1Spatial) [16].

Il y avait une autre demande pour permettre la conception d'un réseau géodésique de second ordre, où la position des points est imposée et où l'on souhaite, pour atteindre une précision donnée en termes d'écart-type, calculer la précision à obtenir pour chaque observation. La conception du réseau de second ordre est particulièrement importante pour celle d'un réseau géodésique. Dans la conception de cet ordre, les poids optimaux des observations sont recherchés. Cela fait appel également à un produit matriciel très particulier, inventé par Khatri et Rao [4] et utilisé dans un développement de Gunther Schmitt [5].

À cette époque, il y avait des développements et des contributions internationales très importants liés à la résolution numérique du problème des moindres carrés. Avec des moyens de traitement limités, l'imagination était très sollicitée. Aujourd'hui, le traitement de millions de points issus des fameux nuages de points engendrés par les scanners et autres capteurs, ne surprend plus grand monde. D'autre part, les étudiants, mais également les professionnels, en géodésie et topographie, ne paraissent plus motivés pour

Aujourd'hui, les outils informatiques dont nous disposons exigent des méthodes numériques adaptées. On s'accorde à dire qu'elles doivent répondre à un certain nombre de critères dont la stabilité numérique, la facilité de programmation, la portabilité du logiciel, c'est-à-dire son indépendance vis-à-vis d'un type bien précis de système d'exploitation, etc.

L'objet de cet article est de présenter une méthode de résolution peu connue des utilisateurs de la méthode des moindres carrés en géodésie et en topographie et qui présente pourtant des avantages considérables. Cette méthode dite "orthogonalisation généralisée" se base sur une version modifiée de la méthode d'orthogonalisation de Gram-Schmidt. Elle est très concise, numériquement stable et permet la résolution de systèmes d'équations linéaires simples ou surdéterminés. Elle ne fait appel à aucun algorithme d'inversion matricielle ni à la technique d'éliminations successives. Il n'y a pas de formation d'équations normales. Les pionniers de

cette méthode sont F. Charamza [1] et J. Gazdzicki [2].

Nous avons déjà publié un article sur cette méthode en 1986 dans le Bulletin trimestriel de la Société belge de photogrammétrie-télétection et cartographie [3] quand nous travaillions à l'Institut géographique national de Belgique au département de la Géodésie de 1983 à 1989. À l'époque, les premiers mini-ordinateurs faisaient leur apparition et le département de la Géodésie souhaitait s'affranchir des services du Centre de traitement informatique (CTI) qui travaillait en temps partagé sur des serveurs IBM à des prix élevés facturés à la milliseconde de CPU. Pour donner un exemple, le traitement de l'aérotrianulation du Rwanda a pris 20 minutes et a épuisé le budget annuel du CTI. C'est dire qu'une certaine indépendance vis-à-vis de ces outils était la bienvenue. Notre mission était de développer un logiciel d'ajustement par les moindres carrés, incluant tous les raffinements numériques de l'époque, à savoir la méthode B de test imaginée par le



plonger dans ces algorithmes, avec le risque de perdre progressivement leur maîtrise et donc, de devenir tributaires des sociétés de production de logiciel.

Pour ma part, à cette époque, en tant que jeune diplômé géomètre-expert avec un bagage en math sup, je me suis fixé comme règle de vie professionnelle de n'utiliser aucune méthode de traitement que je ne pouvais à la fois démontrer et donc programmer. Cela m'a permis de comprendre exactement comment les résultats des observations étaient délivrés et également d'optimiser les opérations topographiques et d'innover par le choix des modèles mathématiques. À cet égard, l'arrivée du GPS, puis du GNSS, a été une aubaine pour beaucoup de nouveaux développements, qui tous, pourtant, reposent sur cette base de connaissance de la méthode des moindres carrés couplée aux filtrages numériques et de l'inférence statistique.

L'enseignement des mathématiques, actuellement en mauvaise posture, vise entre autres à découvrir une certaine beauté. Bruno Hourst écrit [6] : Les mathématiques peuvent être source de beauté. On peut parler d'une "belle formule" ou d'une "belle démonstration géométrique". Et, effectivement, lorsque l'on a ressenti cette beauté, elle semble évidente. Des démonstrations géométriques sont "belles" par l'élégance du raisonnement et l'articulation de la démonstration. Des formules sont "belles" par leur simplicité ou leur équilibre.

Semir Zeki [6] a expliqué : *"La beauté d'une formule peut résulter de la simplicité, de la symétrie, de l'élégance ou de l'expression d'une vérité immuable. Pour Platon, la qualité abstraite des mathématiques exprimait le summum de la beauté"*.

Citons encore Carl Friedrich Gauss, à propos des mathématiques : *"Les charmes enchanteurs de cette sublime science ne se décèlent dans toute leur beauté qu'à ceux qui ont le courage de l'approfondir [17]."*

Cet article est donc également une invitation à la découverte de l'élégance d'un algorithme qui prend une autre voie pour résoudre le problème des moindres carrés. Et, effectivement, dans

la question de trouver la distance minimale entre un point et une droite, on peut soit minimiser la fonction distance à cette droite ou bien construire la perpendiculaire de ce point abaissée sur la droite. L'orthogonalisation généralisée est bien une autre façon de résoudre le problème des moindres carrés en produisant des estimateurs linéaires non biaisés dans des systèmes d'équations surdéterminés.

Orthogonalisation

■ Indications

Nous présenterons, dans ce paragraphe, un rappel des notions mathématiques utilisées dans cet article. Sauf mention contraire, tous les vecteurs seront dorénavant des vecteurs colonnes.

Lorsque les composantes seront explicitées, nous écrirons $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$. Le symbole $[]^T$ indique que les éléments doivent être écrits en colonne.

Un ensemble de tels vecteurs à n composantes sur l'ensemble F est stable pour l'addition, si la somme de deux quelconques d'entre eux est encore un vecteur de l'ensemble. De même, l'ensemble est stable pour la multiplication par les scalaires si un vecteur quelconque de l'ensemble multiplié par un scalaire est encore un vecteur de l'ensemble.

■ Espaces vectoriels

Tout ensemble de vecteurs à n composantes sur F stable pour la multiplication par les scalaires et pour l'addition est appelé espace vectoriel.

Ainsi, si x_1, x_2, \dots, x_m sont des vecteurs à n composantes sur F , l'ensemble des combinaisons linéaires

$k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots, k_m x_m$ avec k_i dans F est un espace vectoriel sur F .

L'espace $V_n(F)$ de tous les vecteurs à n composantes sur F est appelé espace vectoriel à n dimensions sur F .

$V_n(R)$ sera l'espace vectoriel à n dimensions sur R , R étant l'ensemble des réels.

■ Sous-espaces

Un ensemble V de vecteurs de $V_n(F)$ est un sous-espace de $V_n(F)$ si V est stable pour l'addition et la multiplication par les scalaires. Ainsi l'espace vectoriel nul à n dimensions est un sous-espace de $V_n(F)$. Il en est de même de $V_n(F)$ lui-même.

■ Base et dimension

La dimension d'un espace vectoriel V est le nombre minimum de vecteurs linéairement indépendants pour engendrer V . L'ensemble de ces vecteurs est appelé une base de V . Si ceux-ci sont orthogonaux deux à deux, la base est dite orthogonale. Si leur norme est égale à l'unité, la base sera dite orthonormée. En géométrie élémentaire, l'espace usuel est considéré comme un ensemble à trois dimensions.

Les vecteurs dits élémentaires seront :

$$E_1 = [1, 0, 0]^T$$

$$E_2 = [0, 1, 0]^T$$

$$E_3 = [0, 0, 1]^T$$

Ceux-ci constituent une base importante de $V_3(F)$ que l'on appelle base canonique de $V_3(F)$.

■ Orthogonalisation de Gram-Schmidt

En algèbre linéaire, dans un espace préhilbertien (c'est-à-dire un espace vectoriel sur le corps des réels ou celui des complexes, muni d'un produit scalaire), le procédé de Gram-Schmidt est un algorithme pour construire, à partir d'une famille libre finie, une base orthonormée du sous-espace qu'elle engendre. Cette méthode a été publiée par Jørgen Pedersen Gram en 1883 et reformulée par Erhard Schmidt en 1907, mais on la trouve déjà dans des travaux de 1816 de Laplace et de Cauchy en 1836 [7].

Soit X_1, X_2, \dots, X_m une base donnée de $V_n^m(R)$. On désigne par Y_1, Y_2, \dots, Y_m l'ensemble des vecteurs deux à deux orthogonaux à déterminer.

Étape 1 : On prend $Y_1 = X_1$

Étape 2 : Puis, on prend $Y_2 = X_2 + aY_1$

Puisque Y_1 et Y_2 sont orthogonaux,

$$\text{on a } Y_1 * Y_2 = Y_1 * X_2 + aY_1 * Y_1 = 0$$

$$\text{et } a = -\frac{Y_1 * X_2}{Y_1 * Y_1}$$

$$\text{ainsi } Y_2 = X_2 - \frac{Y_1 * X_2}{Y_1 * Y_1} * Y_1$$

Étape 3 : On prend $Y_3 = X_3 + aY_2 + bY_1$

Puisque Y_1, Y_2 et Y_3 sont orthogonaux deux à deux

$$\begin{aligned} Y_1 * Y_3 &= Y_1 * X_3 + aY_1 * Y_2 + bY_1 * Y_1 \\ &= Y_1 * X_3 + bY_1 * Y_1 = 0 \end{aligned}$$



$$Y_2 * Y_3 = Y_2 * X_3 + aY_2 * Y_2 + bY_2 * Y_1$$

$$= Y_2 * X_3 + aY_2 * Y_2 = 0$$

$$a = -\frac{Y_2 * X_3}{Y_2 * Y_2} \text{ et } b = -\frac{Y_1 * X_3}{Y_1 * Y_1}$$

$$\text{et } Y_3 = X_3 - \frac{Y_2 * X_3}{Y_2 * Y_2} * Y_2 - \frac{Y_1 * X_3}{Y_1 * Y_1} * Y_1$$

on poursuit cette méthode jusqu'à l'obtention de Y_m

$$Y_m = X_m - \frac{Y_{m-1} * X_m}{Y_{m-1} * Y_{m-1}} * Y_{m-1} - \dots$$

$$\dots - \frac{Y_1 * X_m}{Y_1 * Y_1} * Y_1$$

Alors les vecteurs unitaires

$G_i = \frac{Y_i}{\|Y_i\|}$, ($i = 1, 2, \dots, m$) sont deux à deux orthogonaux et forment une base orthonormée de $V_n^m(R)$.

Remarque : le symbole $*$ est le produit scalaire entre deux vecteurs. Exemple : Construisons en utilisant le procédé d'orthogonalisation de Gram-Schmidt une base orthogonale de $V_3(R)$ étant donné la base dans les équations suivantes :

$$X_1 = [1, 1, 1]^T$$

$$X_2 = [1, -2, 1]^T$$

$$X_3 = [1, 2, 3]^T$$

$$\text{Étape 1 : } Y_1 = X_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Étape 2 : } Y_2 = X_2 - \frac{Y_1 * X_2}{Y_1 * Y_1} * Y_1$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{0}{3} * Y_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Étape 3 :

$$Y_3 = X_3 - \frac{Y_2 * X_3}{Y_2 * Y_2} * Y_2 - \frac{Y_1 * X_3}{Y_1 * Y_1} * Y_1$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} - \frac{0}{6} * Y_2 - \frac{6}{3} * Y_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Alors les vecteurs

$$G_1 = \frac{Y_1}{\|Y_1\|} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$G_2 = \frac{Y_2}{\|Y_2\|} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$G_3 = \frac{Y_3}{\|Y_3\|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

forment une base orthonormée de $V_3(R)$. Tout vecteur G sera vecteur unitaire et tout produit scalaire $G_i * G_j = 0$

■ Matrice orthogonale

Une matrice carrée A est orthogonale si :

$$A^T A = A A^T = I$$

C'est-à-dire si : $A^T = A^{-1}$

Il est clair que les vecteurs colonnes (respectivement lignes) d'une matrice orthogonale A sont des vecteurs unitaires deux à deux orthogonaux.

Soit $Y = AX$ une application linéaire de $V_n(R)$. S'il s'agit d'une transformation de coordonnées d'une base E à une autre base Z , la base sera orthogonale si A est orthogonale.

La matrice A formée par les vecteurs G_1 , G_2 et G_3 de notre exemple précédent est orthogonale.

■ Orthogonalisation et méthode des moindres carrés

Considérons le problème de trouver un vecteur appartenant à $V_m(R)$ tel que $AX = B$ où A appartient à $V_n^m(R)$ et B appartient à $V_n(R)$ avec $n \geq m$.

Quand il y a plus d'équations que d'inconnues, on dit du système d'équations qu'il est surdéterminé. Le problème des moindres carrés consiste à rendre minimale la norme euclidienne : $\min_x \|AX - B\|$ A appartenant à $V_n^m(R)$ et B appartenant à $V_n(R)$.

On demande un estimateur optimal pour le vecteur X appartenant à $V_m(R)$.

La norme euclidienne étant invariante par rapport aux transformations orthogonales, la méthode des moindres carrés bénéficie de la propriété intéressante d'être équivalente au problème suivant :

$$\min_x \|(Q^T A)X - (Q^T B)\|$$

en multipliant A et B par une matrice orthogonale Q^T . Supposons que la matrice orthogonale Q^T ait été calculée de telle façon à ce que :

$$Q^T A = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}_{n-m}^m \text{ et } Q^T B = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}_{n-m}^m$$

La solution du problème des moindres carrés est alors obtenue en résolvant le système triangulaire supérieur :

$$RX = C$$

Le vecteur des résidus :

$$V = AX - B$$

sera égal à la norme du vecteur D .

En effet

$$\|AX - B\|^2 = \|Q^T AX - Q^T B\|^2$$

$$= \|RX - C\|^2 + D^2$$

Trois méthodes sont généralement proposées pour calculer cette factorisation orthogonale. Il s'agit de l'orthogonalisation de Gram-Schmidt, des réflecteurs de Householder et des rotations de Givens.

La méthode exposée ici se base sur l'orthogonalisation de Gram-Schmidt. Malheureusement, celle-ci a une stabilité numérique assez faible. Pour y pallier, il a été proposé une version équivalente dénommée "Gram-Schmidt modifiée" où la normalisation des vecteurs se fait à chaque pas de la transformation [8] et [9].

Orthogonalisation généralisée

■ Indications

L'algorithme d'orthogonalisation généralisée est basé sur la transformation d'une matrice A en une matrice W de même structure.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} m & r \end{matrix} \\ \begin{matrix} n \\ p \end{matrix} & \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} m & r \end{matrix} \\ \begin{matrix} n \\ p \end{matrix} & \begin{bmatrix} W_1 & W_2 \\ W_3 & W_4 \end{bmatrix} \end{matrix} = W$$

respectant les règles suivantes :

Règle 1 : Orthogonalisation dans la sous-matrice $[A_1 \ A_3]^T$

Cette sous-matrice est transformée en $[W_1 \ W_3]^T$ à l'aide de l'orthogonalisation de Gram-Schmidt modifiée. La normalisation, c'est-à-dire la division par la norme du vecteur, ne porte cependant que sur la matrice A_1 . Celle-ci a ses colonnes linéairement indépendantes.

Règle 2 : Orthogonalisation dans la sous-matrice $[A_2 \ A_4]^T$

Cette sous-matrice est transformée en $[W_2 \ W_4]^T$ en appliquant la suite des transformations déjà appliquées pour la sous-matrice $[A_1 \ A_3]^T$ mais sans normalisation. La procédure peut se décrire comme suit : soit h , le nombre de transformations.





Pour $h = 1, 2, \dots, m$
 $j = 1, 2, \dots, n, n+1, \dots, n+p$
 $i = h+1, h+2, \dots, m+r$

Faire

$$W_{hj}^h = \frac{W_{hj}^{h-1}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n W_{hk}^{h-1}{}^2}}$$

$$W_{ij}^h = W_{ij}^{h-1} - W_{hj}^h * \sum_{k=1}^n W_{hk}^h * W_{ik}^{h-1}$$

W_{hk}^h est noté comme étant l'élément W_{hj} obtenu après h transformations. La transformation $h = 1$ étant le pas initial,

$$W_{hj}^0 = A_{hj}$$

Ainsi devient la transformation orthogonale de A_1 . On peut vérifier que $W_1^T W_1 = I$. Les sous-matrices A_1 et W_1 étant fonction d'une matrice triangulaire droite non singulière R telle que

$$A_1 = W_1 R$$

En appliquant la procédure décrite, nous obtenons les relations fondamentales suivantes de l'orthogonalisation généralisée :

$$W_1 = A_1 R^{-1} \quad (1)$$

$$W_3 = A_3 R^{-1} \quad (2)$$

$$W_2 = A_2 - W_1 W_1^T A_2 \quad (3)$$

$$W_4 = A_4 - W_3 W_1^T A_2 \quad (4)$$

Nous allons montrer, dans la suite de cet article, comment définir les matrices A_1, A_2, A_3 et A_4 , pour obtenir dans une variété de cas la solution aux problèmes posés par la résolution d'un système d'équations linéaires simplement déterminé ou surdéterminé.

■ Système d'équations linéaires simplement déterminé

Soit à déterminer le vecteur X dans l'équation $AX = B$

La solution s'obtient en multipliant les deux membres de l'équation par la matrice inverse A^{-1} .

$$\text{Soit } A^{-1}AX = A^{-1}B$$

$$\text{et donc } X = A^{-1}B$$

	m	1
m	A	B
m	I	0

 \rightarrow

	m	1
m	W_1	W_2
m	W_3	W_4

En appliquant les relations fondamentales (1), (2), (3) et (4), nous obtenons :

$$W_1 = AR^{-1}$$

$$W_3 = R^{-1}$$

$$W_2 = B - W_1 W_1^T B$$

$$W_4 = 0 - W_3 W_1^T B$$

comme $W_1 W_1^T = I$; la matrice W_1 étant carrée, nous pouvons déduire que $W_1^T = W_1^{-1}$ et, dès lors :

$$W_2 = 0$$

$$W_4 = 0 - R^{-1} W_1^T B$$

$$W_4 = -R^{-1} (R A^{-1}) B$$

$$W_4 = -A^{-1} B = -X$$

	m	1
n	AR^{-1}	$-V$
m	R^{-1}	$-X$

Il est donc possible de calculer l'inverse d'une matrice régulière à l'aide de cet algorithme.

■ Système d'équations linéaires surdéterminé

Selon que l'on exprime les observations en fonction de certains paramètres (coordonnées) ou que l'on impose certaines conditions sur celle-ci, nous aurons des modèles d'équations différents, conduisant cependant à des résultats identiques. Il s'agit du modèle des équations d'observation (Gauss-Markov) et du modèle des équations conditionnées (Gauss-Helmert).

L'un peut se ramener à l'autre par élimination algébrique des relations entre grandeurs non mesurées, mais il s'agit là d'un problème ne représentant qu'un intérêt sur le plan théorique [10] et [11]. Il existe évidemment bien d'autres modèles adaptés à des situations plus complexes, mais qui ne sont qu'une catégorie se rattachant à l'un ou l'autre des modèles cités.

Notons également que de par la nature des observations que l'on traite en topographie et en géodésie, certaines fonctions établies ne sont pas linéaires (directions/angles et distances). La mise en œuvre de la méthode des moindres carrés exige que ces équations soient rendues linéaires par approximation en les remplaçant par un développement en série limité aux termes linéaires.

Équations d'observation

Nous allons rappeler brièvement les équations générales :

Soit le modèle fonctionnel linéaire suivant :

$$L + V = AX + A_0 \quad (5)$$

Où

L est le vecteur des observations (n)

V est le vecteur des résidus (n)

A est la matrice des coefficients des équations d'observation ($n \times m$)

X est le vecteur des paramètres à estimer (m)

A_0 est le vecteur des termes constants (n) intégré en pratique dans le vecteur L

Le modèle stochastique contenant l'information probabiliste des observations est défini comme suit :

σ^2 grandeur scalaire, dénommée variance de l'unité de poids

Q_{LL} est la matrice des cofacteurs des observations ($n \times n$)

$C_{LL} = \sigma^2 Q_{LL}$ est la matrice de variance-covariance des observations

$P_{LL} = C_{LL}^{-1}$ est la matrice ($n \times n$) des poids

Nous obtenons les estimateurs suivants :

$$\text{Pour les paramètres } \hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (6)$$

$$\text{ou en posant } N = A^T P A \text{ nous avons : } \hat{X} = N^{-1} (A^T P L)$$

$$\text{Pour les observations : } \hat{L} = A \hat{X} = A N^{-1} A^T P L \quad (7)$$

$$\text{Pour les résidus : } \hat{V} = \hat{L} - L = A \hat{X} - L$$

Pour les matrices de variance-covariance *a posteriori* :

$$\text{Pour les paramètres : } C_{\hat{X}\hat{X}} = \sigma^2 N^{-1} \quad (8)$$

$$\text{Pour les observations : } \hat{L} = A \hat{X} = A N^{-1} A^T P L \quad (9)$$

$$\text{Pour les résidus : } \hat{V} = \hat{L} - L = A \hat{X} - L$$

Le facteur de variance *a posteriori* de l'unité de poids estimé : $\hat{\sigma}^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{n-m} \quad (10)$

Définissons la matrice opérateur suivante :

	m	1
n	A	L
m	I	0

Après transformation, nous obtenons en appliquant (1), (2), (3) et (4) :



$$\begin{aligned} W_1 &= AR^{-1} \\ W_3 &= IR^{-1} = R^{-1} \\ W_2 &= L - W_1 W_1^T L \\ W_4 &= -R^{-1} W_1^T L \end{aligned}$$

En explicitant ces relations, nous obtenons les résultats suivants :

$$\begin{aligned} W_4 &= -R^{-1} W_1^T L \\ W_4 &= -R^{-1} R^T R^{-1} R^T W_1^T L \\ W_4 &= -(R^T W_1^T W_1 R)^{-1} R^T W_1^T L \end{aligned}$$

avec $W_1^T W_1 = I$ et $W_1 R = A$

$$W_4 = -(A^T A)^{-1} A^T L$$

$$W_4 = -\tilde{X}$$

le vecteur des paramètres solution

$$\begin{aligned} W_2 &= L - W_1 W_1^T L \\ W_2 &= L - W_1 R R^{-1} W_1^T L \end{aligned}$$

avec $RR^{-1} = I$

$$W_2 = L - A(R^{-1} W_1^T L)$$

$$W_2 = L - A\tilde{X}$$

$$W_2 = -\tilde{V}$$

le vecteur des résidus

$$W_1 W_1^T = A(A^T A)^{-1} A^T$$

$$W_1 W_1^T = Q_{LL}$$

la matrice cofacteurs des observations ajustées

$$\begin{aligned} W_3 W_3^T &= R^{-1} R^{-1^T} = (R^T R)^{-1} \\ W_3 W_3^T &= (A^T W_1^{-1^T} W_1^{-1} A)^{-1} \\ W_3 W_3^T &= (A^T A)^{-1} \\ W_3 W_3^T &= Q_{XX} \end{aligned}$$

la matrice cofacteurs des paramètres solution

Nous retrouvons, donc après transformation dans la matrice opérateur, les informations suivantes :

	m	1
n	AR^{-1}	$-V$
m	R^{-1}	$-X$

Pour obtenir les éléments diagonaux des matrices de cofacteurs Q_{LL} et Q_{XX} il suffit de faire la somme des éléments élevés au carré par ligne.

Pour introduire, le cas échéant, une estimation de la matrice de variance-covariance *a priori*, on peut montrer qu'il suffit de diviser chaque ligne des coefficients de la matrice et du vecteur par la racine carrée de la variance de l'observation correspondante. Dans le cas de matrice de variance-covariance *a priori*

corrélée, il faudra factoriser la matrice inverse, dite matrice des poids en deux matrices triangulaires (par les procédés Choleski [18] ou de Givens [19] par exemple) et de multiplier la matrice de configuration et le vecteur des observations par l'une d'elles. En effet, la matrice des poids est généralement définie positive et peut-être décomposée en une matrice triangulaire gauche (G) et droite (D).

On obtient donc :

$$P = GD = GG^T = D^T D$$

L'expression :

$$(A^T P A) X = A^T P L$$

$$\text{Devient : } (A^T D^T D A) X = A^T D^T D L$$

Où nous posons $A^* = DA$ et $L^* = DL$

$$\text{Et l'on obtient : } (A^{*T} A^*) X = A^{*T} L^*$$

La matrice opérateur se présentant dès lors comme suit :

	m	1
n	A^*	L^*
m	I	0

Équations conditionnées

Soit le modèle fonctionnel linéaire suivant :

$$UL + U_0 = F \quad (11)$$

Avec :

U matrice de configuration (m, n)

L vecteur des observations (n)

U_0 vecteur des termes constants (m)

F vecteur des fermures (m)

Le modèle stochastique portant sur les mêmes observations, celui-ci sera identique à celui exposé au paragraphe 3.3.1 Nous obtenons les estimateurs suivants :

$$\text{Corrélatifs : } K = (U Q_{LL} U^T)^{-1} F \quad (12)$$

$$\text{Observations : } \tilde{L} = L + \tilde{V} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{Résidus } \tilde{V} &= -Q_{LL} U^T (U Q_{LL} U^T)^{-1} F \\ &= -Q_{LL} U^T K \end{aligned} \quad (14)$$

Et pour les matrices de variance-covariance *a posteriori* :

$$\text{Corrélatifs : } C_{KK} = \sigma^2 (U Q_{LL} U^T)^{-1} \quad (15)$$

$$\text{Observations : } C_{LL} = \sigma^2 (Q_{LL} - Q_{VV}) \quad (16)$$

Résidus :

$$C_{VV} = \sigma^2 Q_{LL} U^T (U Q_{LL} U^T)^{-1} U Q_{LL} \quad (17)$$

Le facteur de variance *a posteriori*

de l'unité de poids estimé :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\tilde{V}^T P \tilde{V}}{m} \quad (18)$$

Définissons la matrice opérateur suivante :

	m	n
n	U^T	I
1	F	L

Après transformation, nous obtenons en appliquant (1), (2), (3) et (4) :

$$\begin{aligned} W_1 &= U^T R^{-1} \\ W_2 &= I - U^T R^{-1} (U^T R^{-1})^T I \\ W_3 &= F R^{-1} \\ W_4 &= L - F R^{-1} (U^T R^{-1})^T I \end{aligned}$$

En explicitant ces relations, nous obtenons les résultats suivants :

$$\begin{aligned} W_2 &= I - U^T R^{-1} R^{-1^T} U \quad \text{avec } R^{-1^T} = R^{T^{-1}} \\ W_2 &= I - U^T (R^T R)^{-1} U \\ W_2 &= I - U^T (U W_1 W_1^T U^T) U \\ W_2 &= I - U^T (U U^T)^{-1} U \end{aligned}$$

$W_2 = Q_{LL}$ la matrice des cofacteurs *a posteriori* des observations

$$W_4 = L - F R^{-1} (R^{-1^T} U)$$

$$\begin{aligned} W_4 &= L - F (R^T R)^{-1} U \\ W_4 &= L - F (U W_1 W_1^T U^T)^{-1} U \\ W_4 &= L - F (U U^T)^{-1} U \end{aligned}$$

$W_4 = \tilde{L}$ le vecteur des observations ajustées. Nous avons une relation supplémentaire : $W_1 W_3^T = \tilde{L} = W_4$

Nous retrouvons, après transformation, la matrice suivante :

	m	n
n	W_1	Q_{LL}
1	W_3	L

Si l'on veut tenir compte de la matrice de variance-covariance des observations *a priori*, il faudra appliquer la même remarque qu'en 3.3.1 en factorisant la matrice de variance-covariance et en disposant la matrice opérateur comme suit :

	m	n
n	U^{T*}	Q_{LL}
1	F	L

Q_{LL} pouvant être factorisée en une matrice triangulaire gauche (G) et droite





$$(D) : Q_{LL} = GD = GG^T = D^T D$$

Nous poserons comme précédemment : $U^T = D^T U^T$

Déficience de rang, inverse généralisée et réseau libre

Jusqu'ici, nous avons admis que les systèmes d'équations linéaires étaient composés de vecteurs colonnes indépendants, sans combinaisons linéaires. Pourtant, dans le cas des réseaux libres où aucun point n'est fixé, la solution $X = (A^T P A)^{-1} (A^T P L)$ n'existe plus, car le déterminant $|A^T P A|$ sera proche de zéro. La solution consiste à calculer une pseudo-inverse ou inverse généralisée. L'orthogonalisation généralisée apporte une solution élégante.

Supposons donc que la matrice des coefficients des équations d'observation A contienne r colonnes linéairement indépendantes et le reste d de colonnes linéairement dépendantes.

Sans perdre la généralité, nous pouvons assumer que les colonnes linéairement dépendantes se trouvent localisées dans la partie droite de la matrice A . Nous notons la partie de A qui contient des colonnes linéairement indépendantes A_1 et celle contenant des colonnes linéairement dépendantes A_2 et la matrice de leur combinaison linéaire α .

$$A = (A_1, A_2) \text{ et } A_2 = A_1 \alpha$$

$$\text{avec } X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Nous pouvons réécrire maintenant la solution comme :

$$V = A_1 X_1 + A_2 X_2 - L = A_1 (X_1 + \alpha X_2) - L$$

$$= A_1 \tilde{X} - L \quad (19)$$

Comme la matrice A_1 ne contient pas de colonnes linéairement dépendantes, une solution unique pour \tilde{X} existe qui minimise la norme euclidienne de V . Si nous connaissons la matrice α et le vecteur \tilde{X} alors n'importe quelle solution X de $\tilde{X} = X_1 + \alpha X_2 = (1, \alpha) X$ (20)

sera également la solution au sens des moindres carrés de (20) avec le même vecteur des résidus. Regardons comment l'algorithme d'orthogonalisation généralisée traite ce cas.

	$m-rd$	rd	1
n	A_1	A_2	$-L$
$m-rd$	I	0	0
rd	0	I	0

	$m-rd$	rd	1
n	Q	0	V
$m-rd$	R_1^{-1}	$-\alpha$	X
rd	0	I	0

Avec rd (déficience de rang) qui peut être calculée en utilisant les rotations de Givens.

La première orthogonalisation se réalise sur la matrice A_1 . Si nous souhaitons n'obtenir que l'ensemble des solutions pour les paramètres X une deuxième orthogonalisation sera menée sur :

	rd	1
$m-rd$	$-\alpha$	X_1
rd	I	0

Pour résoudre :

$$\begin{bmatrix} -\alpha \\ I \end{bmatrix} X_2 = \begin{bmatrix} X_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Si au contraire, nous souhaitons obtenir l'ensemble des solutions pour les paramètres X mais également la matrice de cofacteurs Q_{XX} la deuxième orthogonalisation sera menée sur la matrice opératrice suivante avec permutation des sous-matrices $-\alpha$ et R_1^{-1} et de leur correspondantes inférieures.

	$m-rd$	rd	1
$m-rd$	$-\alpha$	R_1^{-1}	X_1
rd	I	0	0

Les développements que nous avons présentés en 3.3.1 et 3.3.2 s'appliquent également ici et nous renvoyons le lecteur aux références [12] et [13] et à l'exemple numérique.

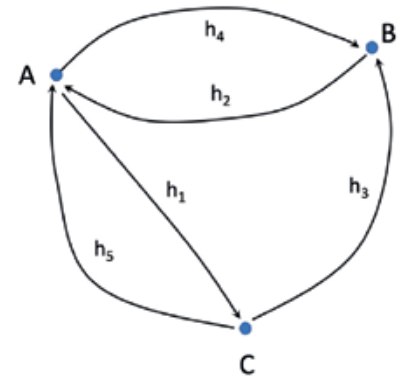
Exemple numérique

Nous proposons, dans ce paragraphe, un exemple numérique, à la fois pour illustrer notre exposé et offrir, aux lecteurs désireux de tester leur propre logiciel, une base de comparaison numérique.

Réseau de nivellement

Pour illustrer la complémentarité entre les deux modèles (Gauss-Markov et Gauss Helmert), nous traiterons l'exemple par les équations d'observation et les équations conditionnées.

Soit le réseau de nivellement figuré par le schéma suivant :



Seul le point A est connu en altitude et $Z_A = 124.18$ m

Nous avons pour les dénivelées h_i les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} h_1 &= 6.14 \text{ m} \\ h_2 &= 8.34 \text{ m} \\ h_3 &= -14.48 \text{ m} \\ h_4 &= -8.35 \text{ m} \\ h_5 &= -6.16 \text{ m} \end{aligned}$$

La distance entre les points A, B et C sera égale à l'unité pour simplifier le modèle stochastique et nous ne traitons que deux décimales pour les observations.

Équation d'observation

Nous pouvons exprimer les relations fonctionnelles qui existent entre l'altitude des points A, B et C et la valeur des dénivelées h_i :

$$\begin{aligned} Z_B &= Z_A + h_1 \\ Z_A &= Z_C + h_2 \\ Z_C &= Z_B + h_3 \\ Z_C &= Z_A + h_4 \\ Z_A &= Z_B + h_5 \end{aligned}$$

Le modèle fonctionnel linéaire s'écrit :

$$\begin{aligned} V_1 + h_1 &= Z_B - Z_A \\ V_2 + h_2 &= -Z_C + Z_A \\ V_3 + h_3 &= Z_C - Z_B \\ V_4 + h_4 &= Z_C - Z_A \\ V_5 + h_5 &= -Z_B + Z_A \end{aligned} \quad (22)$$

Ce qui, sous forme matricielle, s'écrit $L + V = AX + A_0$:

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_A \\ Z_A \\ 0 \\ -Z_A \\ Z_A \end{bmatrix}$$

La matrice opérateur se présente comme suit, avec la matrice résultat après orthogonalisation :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -130.32 \\ 0 & -1 & 115.84 \\ -1 & 1 & 14.48 \\ 0 & 1 & -115.83 \\ -1 & 0 & 130.34 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.577 & 0.204 & 0.006 \\ 0.000 & -0.612 & 0.001 \\ -0.577 & 0.408 & -0.007 \\ 0.000 & 0.612 & 0.009 \\ -0.577 & -0.204 & 0.014 \\ 0.577 & 0.204 & 130.326 \\ 0.000 & 0.612 & 115.839 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Avec les différentes sous-matrices de W :

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.577 & 0.204 \\ 0.000 & -0.612 \\ -0.577 & 0.408 \\ 0.000 & 0.612 \\ -0.577 & -0.204 \end{bmatrix} \quad W_2 = \begin{bmatrix} 0.006 \\ 0.001 \\ -0.007 \\ 0.009 \\ 0.014 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0.577 & 0.204 \\ 0.000 & 0.612 \end{bmatrix} \quad W_4 = \begin{bmatrix} 130.326 \\ 115.839 \end{bmatrix}$$

Les paramètres étant les altitudes des points B et C, nous obtenons :

$$Z_B = 130.326 \text{ m}$$

$$Z_C = 115.839 \text{ m}$$

La matrice des cofacteurs des observations ajustées sera :

$$Q_{LL} = W_1 W_1^T$$

$$Q_{LL} = \begin{bmatrix} 0.375 & -0.125 & -0.250 & 0.125 & -0.375 \\ -0.125 & 0.375 & -0.250 & -0.375 & 0.125 \\ -0.250 & -0.250 & 0.500 & 0.250 & 0.250 \\ 0.125 & -0.375 & 0.250 & 0.375 & -0.125 \\ -0.375 & 0.125 & 0.250 & -0.125 & 0.375 \end{bmatrix}$$

La matrice des variances-covariances des observations ajustées sera :

$$C_{LL} = \sigma^2 Q_{LL} \quad \text{avec } \sigma^2 = \frac{W_2^T W_2}{n-m}$$

La matrice des variances-covariances des paramètres ajustés sera obtenue de façon suivante :

$$C_{\hat{X}\hat{X}} = \sigma^2 (W_3^T W_3)$$

Nous obtenons les écarts-standards a *posteriori* en prenant la racine carrée des éléments diagonaux de la matrice $C_{\hat{X}\hat{X}}$:

$$\sigma_{Z_B} = \sqrt{C_{\hat{X}\hat{X}(1,1)}} = \pm 0.006 \text{ m}$$

$$\sigma_{Z_C} = \sqrt{C_{\hat{X}\hat{X}(2,2)}} = \pm 0.007 \text{ m}$$

Équations conditionnées

Nous pouvons écrire les relations linéaires suivantes pour exprimer les conditions imposées aux observations h_i :

$$\begin{aligned} h_1 + h_2 + h_3 &= 0 \\ h_1 + h_5 &= 0 \\ h_2 + h_4 &= 0 \end{aligned}$$

Ce qui, sous forme matricielle, s'écrit $UL + U_0 = F$:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 6.140 \\ 8.340 \\ -14.480 \\ -8.350 \\ -6.160 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000 \\ -0.020 \\ -0.010 \end{bmatrix}$$

Avec $U_0^T = [0 \ 0 \ 0]$

Les matrices opérateur et résultat se présentent comme suit :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00 & -0.02 & -0.01 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.577 & 0.516 & -0.158 & 0.375 & -0.125 & -0.250 & -0.125 & -0.375 \\ 0.577 & -0.258 & 0.474 & -0.125 & 0.375 & -0.250 & -0.375 & 0.125 \\ 0.577 & -0.258 & -0.316 & -0.250 & -0.250 & 0.500 & 0.250 & 0.250 \\ 0.000 & 0.000 & 0.791 & 0.125 & -0.375 & 0.250 & 0.375 & -0.125 \\ 0.000 & 0.775 & 0.158 & -0.375 & 0.125 & 0.250 & -0.125 & 0.375 \\ 0.000 & -0.015 & -0.011 & 0.006 & 0.001 & -0.007 & 0.009 & 0.014 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

On constate la similitude parfaite entre le modèle des équations d'observation et le modèle des équations conditionnées en regard aux résultats numériques obtenus pour L et Q_{LL} .

■ Déficience de rang, inverse généralisée et réseau libre

Dans l'exemple du réseau de nivellement, ignorons la cote du point A. Il s'agit d'un ajustement en réseau libre (sans contrainte) dont l'intérêt est de focaliser sur les observations. On pourrait dire que le modèle aux équations conditionnées remplissent également ce rôle, si ce n'est que l'automatisation des fermetures n'est pas aisée. À ce titre, le modèle aux équations d'observation est plus simple à programmer puisqu'à chaque observation, nous avons une équation.

Dans notre exemple de réseau de nivellement, nous n'avons qu'un point connu en altitude et nous pouvons dénommer cet ajustement comme un ajustement en contrainte minimale. Le modèle fonctionnel s'écrit comme suit en considérant l'altitude du point A comme paramètre à estimer :

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix}$$

La déficience de rang peut se calculer à l'aide des rotations de Givens et, dans

notre exemple, il sera de 1. La matrice opérateur s'écrit :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} m-rd=2 & rd=1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 6.14 \\ 1 & 0 & -1 & 8.34 \\ 0 & -1 & 1 & -14.48 \\ -1 & 0 & 1 & -8.35 \\ 1 & -1 & 0 & -6.16 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Avec la matrice résultat :

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} m-rd=2 & rd=1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0.500 & 0.354 & 0.000 & 0.006 \\ 0.500 & 0.354 & 0.000 & 0.001 \\ 0.000 & -0.707 & 0.000 & -0.008 \\ -0.500 & -0.354 & 0.000 & 0.009 \\ 0.500 & -0.354 & 0.000 & 0.014 \\ 0.500 & 0.354 & 1.000 & 8.341 \\ 0.000 & 0.707 & 1.000 & 14.488 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

On constate que le vecteur des résidus est identique à celui obtenu par les autres modèles (équations d'observation et équations conditionnées).

De plus, et comme mentionné auparavant, la colonne singulière porte sur le dernier paramètre qui est l'altitude du point C. Nous pouvons bien sûr intervertir les paramètres et faire porter cette singularité sur le paramètre de notre choix. Nous allons procéder à la deuxième orthogonalisation qui portera sur la partie inférieure de la matrice opérateur soit :

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} m-rd & rd & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} m-rd \\ rd \end{matrix} & \begin{bmatrix} -\alpha & R_1^{-1} & X_1 \\ I & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Soit en considérant les résultats de la première orthogonalisation :

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} m-rd=2 & rd=1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.500 & 0.354 & 1.000 & 8.341 \\ 0.000 & 0.707 & 1.000 & 14.488 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix} \\ & \begin{matrix} R_1^{-1} & -\alpha \end{matrix} \end{matrix}$$

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} m-rd=2 & rd=1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1.000 & 0.500 & 0.354 & 8.341 \\ 1.000 & 0.000 & 0.707 & 14.488 \\ 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix} \\ & \begin{matrix} -\alpha & R_1^{-1} \end{matrix} \end{matrix}$$

Après avoir permuté les sous-matrices $-\alpha$ et R_1^{-1} , nous procédons à la seconde orthogonalisation pour obtenir :



$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} m-rd=2 & rd=1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.577 & 0.333 & 0.000 & 0.732 \\ 0.577 & -0.167 & 0.354 & 6.878 \\ 0.577 & -0.167 & -0.354 & -7.610 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

X

Nous avons maintenant des solutions pour les points A, B et C qui correspondent à un plan moyen qui s'est substitué à l'altitude du point A comme dans l'exemple précédent. C'est le résultat typique d'une inverse généralisée et qui illustre la résolution d'un réseau libre. On peut vérifier les résultats obtenus en considérant à nouveau l'altitude du point A pour déduire l'altitude des points B et C.

$$Z_B = Z_A + 6.878 - 0.732 = 130.326 \text{ m}$$

$$Z_C = Z_A - 7.610 - 0.732 = 115.838 \text{ m}$$

La matrice des cofacteurs des paramètres s'écrivant $Q_{\bar{X}\bar{X}} = WW^T$:

$$Q_{\bar{X}\bar{X}} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.167 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.250 \end{bmatrix}$$

Ce résultat illustre encore l'un des attraits de l'ajustement en réseau libre, puisque la matrice des cofacteurs des paramètres est dénuée de corrélation.

$$C_{\bar{X}\bar{X}} = \sigma^2 Q_{\bar{X}\bar{X}}$$

Et nous obtenons pour les paramètres les écarts-standards *a posteriori* suivants :

$$\sigma_{Z_A} = \sqrt{C_{\bar{X}\bar{X}}(1,1)} = \pm 0.016 \text{ m}$$

$$\sigma_{Z_B} = \sqrt{C_{\bar{X}\bar{X}}(2,2)} = \pm 0.007 \text{ m}$$

$$\sigma_{Z_C} = \sqrt{C_{\bar{X}\bar{X}}(3,3)} = \pm 0.008 \text{ m}$$

L'ajustement en réseau libre permet de conduire les tests de détection d'erreur, comme ceux que nous utilisons et qui sont basés sur la méthode B du Professeur Baarda [36], et de tester également la congruence des points de contrôle.

C'est l'approche typique que l'on utilise pour les réseaux de déformation en surveillance numérique (*monitoring*) où il faut également tester la stabilité des points de contrôle avant de procéder à un ajustement sous contrainte.

Algorithme

La programmation de l'algorithme d'orthogonalisation généralisée n'offre aucune difficulté particulière et nous en donnons un exemple écrit en langage

ANSI C. En entrée, il faut une matrice dont les dimensions sont les suivantes :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} m & r \end{matrix} \\ \begin{matrix} n \\ p \end{matrix} & \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} m & r \end{matrix} \\ \begin{matrix} n \\ p \end{matrix} & \begin{bmatrix} W_1 & W_2 \\ W_3 & W_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

et dont le résultat remplacera son contenu initial.

```
gso(c, m, r, n, p)
double c[N+1][N+1];
int m, r, n, p;
{
    int x, i, j, h;
    double s, prd;
    for(h=1; h<=m; h++)
        nombre de transformations
    {
        s=0.0;
        for(x=1; x<=n; x++)
            produit scalaire
            s = s + c[x][h] * c[x][h];
        for(j=1; j<=n+p; j++)
            normalisation
            c[j][h] = c[j][h] / sqrt(s);
        for(i=h+1; i<=m+r; i++)
        {
            prd=0.0;
            for(x=1; x<=n; x++)
                transformation
                prd = prd + c[x][h] * c[x][i];
            for(j=1; j<=n+p; j++)
                c[j][i] = c[j][i] - c[j][h] * prd;
        }
    }
}
```

Conclusion

Au terme de cet article, nous souhaitons que le lecteur ait pu prendre en considération la beauté et l'élégance de cet algorithme. La concision de celui-ci et le fait que les transformations se réalisent dans la matrice opérateur initiale, nous permettent de l'utiliser abondamment dans toutes les applications logicielles que nous développons où nous devons faire appel à la méthode des moindres carrés et à la méthode B de test imaginée par le Professeur Baarda de Delft [15].

L'orthogonalisation généralisée ne nécessite pas la formation des équations normales et est donc numériquement plus stable que la méthode conventionnelle [14]. De plus, elle permet de traiter tous les modèles d'équation ainsi que l'ajustement de réseaux libres qui sont courants dans les projets d'auscultation et d'étude de déformation.

Le géomètre et le topographe devront devenir non seulement les spécialistes de la géométrie, mais également de l'algèbre linéaire et arpenter les espaces vectoriels. ●

Contact

Prof. Joël van Cranenbroeck,
Managing Director,
cgeos2014@gmail.com

Références

- [1] F. Charamza, *Orthogonalization Algorithm for solving the fundamental problems of the calculus of observations*. Geofysikali Sbornik XIX 1971 n° 346. Academia Praha.
- [2] J. Gazdzicki, *Nowe algorytmy metoda najmniejszych kwadratow (New Algorithms of Adjustment by the Method of Least Squares)*, in Prace instytutu Geodezji i Kartografii, Tom XIII Zestyt 2(29) Warszawa 1966.
- [3] Joël van Cranenbroeck, 1986, *L'orthogonalisation Généralisée, Une solution Algorithmique au Problème des Moindres Carrés*, Bulletin trimestriel de la Société belge de photogrammétrie-télédétection et cartographie N° 163-164, septembre-décembre 1986
- [4] C. G. Khatri and C. Radhakrisna Rao, *Solutions to some Functional Equations and their applications to characterization of Probability Distributions dans Sankhya: The Indian Journal of Statistics* 1968, Volume 30, Series A, Pt. 2, pp. 167-180
- [5] Schmitt, G., 1985. *Second order design*, In: Grafarend, E.W., Sanso, F. (editors) *Optimization and design of geodetic networks*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- [6] Bruno Hourst sur <https://www.mieux-apprendre.com/blog/2018/04/02/mathematiques-art-et-beaute/>
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Gram-Schmidt_process?oldid=14454636
- [8] A. Björk, *Solving Linear Least Squares*

problems by Gram-Schmidt orthogonalization. BIT 7 (1967), 1-21

[9] G.H. Golub & C.F. Van Loan, *Matrix Computations*. (1983) John Hopkins University Press, Baltimore

[10] J. Adam, *A detailed Study of the duality Relation for Least-Squares Adjustment in Euclidean Spaces*. Bulletin Géodésique, Vol. 56, n° 3, pp. 180-195.

[11] J.A.R. Blais, *Duality Considerations in Linear Least Squares*. Manuscripta Geodætica, Vol. 8, (1983), pp. 199-213.

[12] F. Charamza, 1978. *An Algorithm for the Minimum-Length Least Squares Solution of a Set of Observation Equations*, Presented at the I.A.G. International Symposium of Optimization of Design and Computation of Control Network, Sopron, Hungary 1977.

[13] Aleš Cepek, J. Pytel, 2005. *A Progress Report on Numerical Solutions of Least Squares Adjustment in GNU Project Gama*. Acta Polytechnica Vol. 45 N01/2005 by Czech Technical University in Prague.

[14] T. Krarup - *The Theory of Rounding Errors in the Adjustment by Elements of Geodetic Networks* in 2nd International Symposium on Geodetic Calculations - June 1966

[15] W. Baarda - *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks* 1968

[16] <https://www.rtb.be/article/le-groupe-anglais-1spatial-rachete-la-societe-liegeoise-star-apic-8020816>

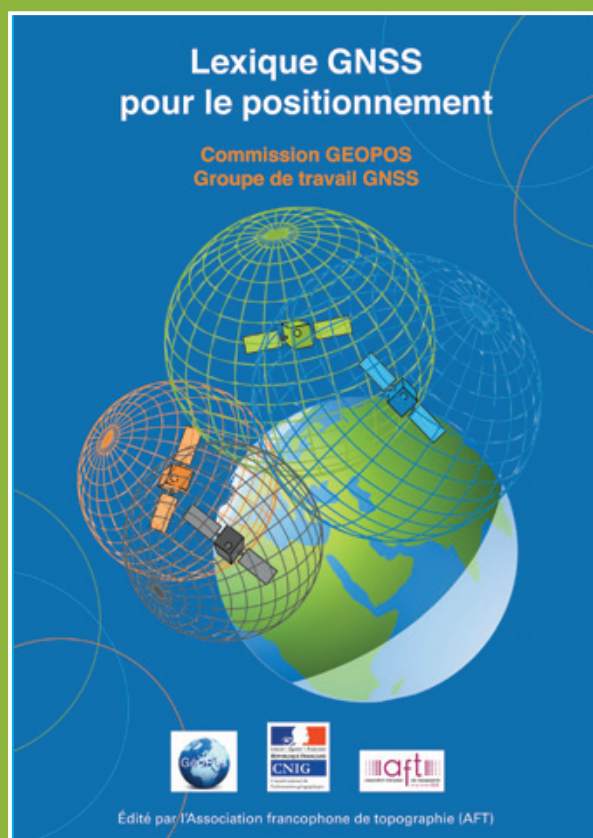
[17] <http://images.math.cnrs.fr/Du-cote-des-lettres-une-lettre-de-Sophie-Germain-a-Carl-Friedrich-Gauss-20.html>

[18] https://fr.wikipedia.org/wiki/Factorisation_de_Cholesky

[19] https://en.wikipedia.org/wiki/Givens_rotation

ABSTRACT

The purpose of this article is to present a resolution method to the users of the least squares method in geodesy and topography and which has considerable advantages. This so-called "Generalized Orthogonalization" method is based on a modified version of the Gram-Schmidt orthogonalization method. It is very concise, numerically stable and allows the solution of simply or overdetermined systems of linear equations. It does not use any matrix inversion algorithm or the successive elimination technique. There is no formation of normal equations.



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. :

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.

L'expédition scientifique de Jean Richer dans l'île de Cayenne

■ Laurent POLIDORI

Dès la création de l'Académie royale des sciences par Colbert en 1666, l'astronomie et la géodésie sont au cœur de son programme et l'Observatoire de Paris est fondé l'année suivante pour permettre leur développement. L'astronomie connaît alors une profonde mutation. Les modèles conceptuels renouvelés par Copernic et Tycho Brahé au siècle précédent ont encouragé de nouvelles observations et les conditions intellectuelles de l'astronomie moderne commencent à apparaître, à savoir le développement de l'approche expérimentale, favorisée par l'utilisation d'instruments d'observation (par opposition à l'enseignement des livres), et le développement de nouveaux outils mathématiques tels que les logarithmes, la géométrie analytique et le calcul différentiel. Par ailleurs on commence à envisager des expéditions dans des pays lointains. C'est dans ce contexte que l'astronome Jean Richer (v. 1630-1696) va être envoyé en Guyane française en 1672 pour mesurer la parallaxe de Mars afin de déterminer les dimensions du système solaire. Il est aussi chargé d'un certain nombre d'observations astronomiques et physiques, et en constatant que le pendule bat plus lentement à Cayenne qu'à Paris, il donnera, sans l'avoir voulu, des arguments à la nouvelle théorie newtonienne et à l'hypothèse d'une terre aplatie.

Les raisons d'une expédition lointaine

La première proposition d'une expédition vers des terres lointaines pour des observations astronomiques, présentée aux membres de l'Académie par Auzout dès janvier 1667 (quelques jours seulement après la première session), avait pour destination Madagascar. De multiples motivations, tant scientifiques que politiques, justifiaient la décision d'une expédition lointaine.

- D'un point de vue scientifique, les astronomes attachaient une grande importance au problème de la réfraction, qui déforme les hauteurs de tous les astres proches de l'horizon, comme cela devait être le cas pour les hauteurs mesurées par Tycho au Danemark. Ainsi, pour tous les phénomènes se produisant dans le plan de l'écliptique où se situe l'ensemble du système solaire, l'élimination de la réfraction nécessitait des observations proches de l'équateur. De plus, pour estimer la distance d'une planète, il fallait l'observer depuis deux points très éloignés. Enfin, un observatoire ne voit qu'une

partie du ciel, d'autant plus restreinte qu'il est éloigné de l'équateur.

- D'un point de vue technologique, un voyage était l'occasion de tester des méthodes ou des instruments, par exemple pour améliorer la connaissance de la localisation en mer. C'est dans cet esprit qu'en 1670, Jean Richer est envoyé par Colbert en Acadie pour tester outre-Atlantique les horloges à pendule mises au point par Huygens.

- Les astronomes ont toujours cherché à comparer leurs observations avec celles de leurs prédécesseurs, notamment Hipparque et Ptolémée qui avaient observé à Alexandrie (Égypte) et Tycho à Uraniburg (Danemark), ce qui les obligeait à vérifier la position de ces anciens observatoires. Bien que Tycho n'ait pas utilisé de télescope, ses données étaient considérées comme les plus fiables et le Danemark n'était pas loin de la France. L'Académie a donc décidé d'envoyer une mission à Uraniburg, qui a été confiée à Picard.

- Quelques décennies plus tard, lorsque des astronomes ont été chargés de construire des triangulations pour déterminer la forme de la Terre, il a

fallu comparer la courbure du méridien en des points très éloignés, c'est-à-dire près de l'équateur et près du pôle, ce qui a conduit l'Académie à programmer des expéditions au Pérou et en Laponie.

- Des raisons plus politiques peuvent être ajoutées aux précédentes, puisqu'un monarque pouvait envoyer des scientifiques dans le monde entier pour démontrer sa magnificence. À ce titre, la mission de Richer était l'un des éléments de la politique scientifique de Louis XIV.

À cette époque, des voyages à finalité militaire, religieuse ou commerciale permettaient de faire des découvertes scientifiques fortuites, les voyageurs rapportant des échantillons de roches, de plantes et d'animaux ainsi que des croquis, des cartes et des hypothèses sur les origines de la Terre et de la vie. Hormis l'exception notable du naturaliste Marcgraff qui explora le Brésil en 1638-43, la mission de Jean Richer semble être la première grande mission à finalité purement scientifique vers des terres lointaines. Mais à la différence de Marcgraff, qui découvrait et collectait tout ce qui se présentait à lui, Richer partait vers un lieu clairement identifié, avec des objectifs très précis, des instructions pratiques pour l'installation d'un observatoire et des méthodes d'observation explicitement établies. S'il est difficile d'insérer un programme d'observations astronomiques dans une expédition naturaliste, itinérante par nature, l'inverse est plus classique. Ainsi, Richer décrit dans son rapport quatre animaux rencontrés sur place (le marsouin, le caïman, l'anguille électrique et le pécaré), qu'il avait sans doute observés pour occuper son temps lorsque la pluie empêchait les mesures astronomiques.

Dans sa première proposition, Auzot envisageait d'envoyer une expédition à

Madagascar, colonie française et siège de la Compagnie des Indes orientales qui pouvait assurer la logistique de l'expédition. Cependant, le choix de Cayenne s'imposa rapidement. Malgré un équilibre géopolitique instable, la position de Cayenne en Amérique tropicale présentait en effet plusieurs avantages. Par rapport aux attentes scientifiques de la mission, la possibilité de voir les étoiles dans le ciel austral était le seul avantage de Madagascar, car pour toutes les observations faites dans le plan de l'écliptique, la position équatoriale était préférable, principalement pour éliminer la réfraction. En outre, l'accès à Cayenne était plus rapide ce qui permettrait de correspondre avec Paris pendant la mission. Enfin, les préparatifs de l'expédition ayant pris du retard, Richer serait arrivé trop tard à Madagascar pour observer la parallaxe de Mars prévue en octobre 1672.

Les préparatifs de la mission

L'Académie décida de confier la mission à Jean Richer, assisté de Meurisse. Richer avait rejoint l'Académie dès sa création comme élève astronome. Il assistait régulièrement Auzout, Picard et plus tard Cassini, dans leurs observations et le développement de nouveaux instruments. Il participa aux travaux de repérage et d'orientation préalables à la construction de l'Observatoire de Paris. À plusieurs reprises, il fut chargé de reconnaître et de préparer les lieux où les astronomes devaient faire des observations d'éclipses et d'autres phénomènes, et il participa à l'élaboration de la triangulation de la nouvelle carte des environs de Paris. Il devait avoir des compétences en calcul, à en croire un procès-verbal de 1667 indiquant que l'Académie l'avait chargé de "faire des logarithmes". Il semble qu'il ait été un technicien autonome, parfaitement conscient des enjeux scientifiques auxquels ses mesures étaient destinées, et capable de prendre des initiatives comme il allait le prouver lors de son séjour à Cayenne. En 1670, Richer, déjà accompagné de Meurisse, fut choisi pour effectuer un voyage trans-

atlantique en Acadie (Canada) afin de tester trois modèles d'horloge à pendule conçus par Huygens, cette destination permettant une grande différence de longitude en un court laps de temps. Au printemps 1670, alors qu'ils avaient déjà été choisis pour partir à Cayenne l'année suivante, Richer et Meurisse s'embarquèrent donc à La Rochelle avec des horloges et des instruments astronomiques et firent route vers la côte canadienne. Ils étaient de retour en septembre de la même année mais leur mission avait échoué, les horloges n'ayant pas résisté au voyage en mer. Huygens accusa Richer d'incompétence, mais il semble que l'Académie ne l'ait pas suivi dans ses reproches, car elle maintint sa confiance en Richer en confirmant sa mission à Cayenne, qu'il passa les mois suivants à préparer.

Les préparatifs techniques de la mission furent effectués à l'Observatoire de Paris au cours de l'année 1671. Picard, véritable concepteur des méthodes d'observation que Richer devait utiliser, fut sans doute responsable du choix des instruments à utiliser. Cependant, il n'était probablement pas très disponible car il préparait son propre voyage à Uraniburg, prévu en juillet de la même année. Richer devait prendre un octant de six pieds et un quart de cercle de deux pieds et demi. Il s'agissait des instruments les plus puissants de l'époque. *Ces instruments étaient de fer bien battu, et le limbe de l'un et de l'autre, sur lequel on avait tracé la division, était de cuivre, chaque degré étant divisé en minutes par des lignes transversales, de telle manière que sur chaque minute de l'octant je pouvais aisément estimer la grandeur de huit ou dix secondes*, note Richer dans son rapport ¹, figure 1. Pour l'observation des éclipses des satellites de Jupiter, nécessaire au calcul des longitudes, le but n'était pas de localiser l'étoile, mais de la voir suffisamment clairement pour déterminer l'instant exact où elle entrait dans l'ombre de la planète (ou en sortait). Pour ce faire, Richer devait prendre deux lunettes de cinq

¹ Sauf mention contraire, toutes les citations en italique sont extraites de Richer J. (1679) *Observations astronomiques et physiques faites en l'Isle de Caienne*, Imprimerie Royale, Paris.



Figure 1. Le rapport de mission de Jean Richer, publié en 1679.

et vingt pieds de long. La mesure du temps devait se faire à l'aide de deux horloges à pendule, dont l'une battait la seconde et l'autre la demi-seconde. Richer vérifia tous ces instruments et fit de nombreuses mesures avec Cassini en préparation des observations qu'ils allaient devoir faire simultanément à Paris et à Cayenne. Enfin, les objectifs de la mission furent arrêtés par l'Académie. Richer devait déterminer l'obliquité de l'écliptique, l'instant des équinoxes, les mouvements et la parallaxe de la Lune, les mouvements de Mercure, les parallaxes du Soleil, de Vénus et de Mars, les longitudes et latitudes de quelques étoiles fixes de l'hémisphère sud. Il devait également étudier divers phénomènes physiques : la durée du crépuscule, la différence de réfraction entre Cayenne et Paris, la hauteur du baromètre, la longueur du pendule des secondes et les marées. Notons qu'à côté des parallaxes qui étaient l'objectif principal et le plus noble de la mission, la longueur du pendule était un point de détail. Cependant, c'est ce que la postérité allait retenir en priorité.

Les aspects administratifs de la mission furent réglés en septembre 1671. Colbert donna des ordres à la Compagnie des Indes occidentales, qui avait le monopole du commerce sur les côtes atlantiques d'Afrique et d'Amérique, concernant le voyage et l'hébergement de Richer et Meurisse. Ayant reçu son budget le 27 septembre et son passeport le 29 septembre, Richer quitta Paris et s'embarqua en octobre 1671 pour La Rochelle où il séjourna trois mois.



Il consacra cette période à la préparation matérielle de sa mission, et à la réalisation de nouvelles mesures astronomiques destinées à tester et étalonner ses instruments. Il savait qu'il devrait construire un observatoire à Cayenne avec les moyens du bord, mais certains éléments essentiels devaient être préparés avant son départ :

Mon but étant, auparavant que je partisse de France, de placer dans le méridien, avec toute l'exactitude qui me serait possible, l'octant dont j'ai parlé ailleurs, pour faire les observations suivantes ; et ayant prévu que je pourrais ne pas trouver dans le pays où j'allais, une pierre assez polie, pour tracer dessus une ligne méridienne, j'en fis tailler une à La Rochelle, de deux pieds de long sur l'épaisseur de cinq pouces, et large d'un pied et demi, laquelle je fis embarquer dans le vaisseau avec de la chaux et du ciment, pour la maçonner où besoin serait.

Richer s'embarqua pour Cayenne le 8 février 1672. On sait peu de choses sur son voyage, si ce n'est qu'il observa une comète pendant plusieurs nuits et demanda, sans succès, à débarquer aux Canaries. Il accosta dans le port de Cayenne le 22 avril, en pleine saison des pluies.

Le séjour de Richer à Cayenne

Régulièrement explorée depuis le troisième voyage de Christophe Colomb (1498), la côte de la Guyane où Richer débarqua en 1672 est une plaine marécageuse qui s'étend entre les embouchures de l'Amazone et de l'Orénoque, et ponctuée ici et là de quelques promontoires rocheux. Cayenne occupe l'un de ces promontoires, sur une presqu'île entre deux fleuves côtiers (Cayenne et Mahury). Un canal naturel, que l'on retrouve sur les cartes de l'époque sous le nom de rivière Ouzacavo, relie les deux rivières, ce qui justifie le nom usuel de l'île de Cayenne. Sur une colline, à l'extrémité nord-ouest de cette île, est construit le fort Cépérou, une forteresse autour de laquelle la ville de Cayenne s'est progressivement étendue. Les colons européens et leurs esclaves africains s'étaient installés

sur des terres occupées par les Indiens Galibis. Cette cohabitation de trois peuples donna naissance, à partir du milieu du XVII^e siècle, à l'embryon de la société guyanaise et aux premières bases d'une langue créole.

Cayenne était une destination difficile pour une mission scientifique. Les témoignages des premiers explorateurs et l'échec des premières tentatives de colonisation n'étaient pas très encourageants. La rudesse du climat, les maladies (paludisme, fièvre jaune), l'hostilité des populations locales, le manque d'infrastructures, tout cela laissait présager un séjour inconfortable et un risque élevé d'échec pour la mission. En outre, un demi-siècle avant que le traité d'Utrecht ne stabilise le partage des nouvelles terres entre les puissances coloniales européennes, la région était très instable d'un point de vue géopolitique. Malgré le partage du monde entre Espagnols et Portugais par le traité de Tordesillas en 1494, l'impossibilité jusqu'au XVIII^e siècle de mesurer les longitudes avec une précision acceptable avait créé une confusion encourageant les autres nations européennes à tenter leur chance. Entre les Caraïbes, clairement espagnoles, et la côte brésilienne, clairement portugaise, le plateau des Guyanes était ainsi convoité par les Anglais, les Hollandais et les Français. Entre le Maroni et le Cap Nord, la bande littorale était occupée par la France dans le cadre d'un projet politique appelé "France Equinoxiale". Après la première exploration des lieux par Daniel de la Touche de la Ravardière en 1604, les expéditions se succédèrent, mais c'est celle qui partit de Rouen en 1630, suivie d'une seconde en 1633, qui donna réellement naissance à la fondation de Cayenne, avec la construction du fort Cépérou et du premier village sur ses flancs. Cependant, le projet de colonisation échoua, en raison de maladies et de difficultés de toutes sortes, et la plupart des habitants partirent s'établir au Suriname où ils rejoignirent les Anglais pour faire prospérer la colonie voisine. Une autre expédition arriva à Cayenne en 1644 sous la direction de Poncet de Brétigny avec une garnison de 1 200 hommes et la forteresse de Cépérou fut agrandie et consolidée. Mais Poncet de Brétigny fut si cruel

envers les Indiens que ceux-ci le massacrèrent ainsi que de nombreux colons français, et les survivants durent s'enfuir. En 1654, les Hollandais, trouvant Cayenne sans résistance, s'y installèrent et la colonie retrouva sa prospérité. Une nouvelle expédition française, dirigée par Lefebvre de la Barre, reprit Cayenne en 1664 et les colons néerlandais retournèrent au Suriname. Mais la reprise en main de la colonie de Cayenne par la couronne française fut de courte durée, car les Anglais débarquèrent en 1667, saccagèrent et brûlèrent la ville et détruisirent les plantations. En 1668, Lefebvre de la Barre trouva les survivants en train de reconstruire péniblement la colonie. De plus, la Compagnie des Indes occidentales, créée par Louis XIV et qui devait assurer un soutien logistique à Richer, se trouva rapidement en faillite. C'est donc dans un environnement particulièrement instable que Richer débarqua à Cayenne en 1672.

La carte en *figure 2* est contemporaine de la mission de Richer. Elle localise les établissements français, anglais et hollandais, et fournit des informations d'intérêt hydrographique (noms des rivières permettant la navigation à l'intérieur du territoire), économique (carrières où l'on trouve des "pierres ressemblant à des rubis") ou ethnique (territoires des groupes indigènes avec lesquels il était possible ou non de commercer, présentant même des caractéristiques permettant de les identifier, par exemple les Nolaques "portent des plaques d'or à l'oreille"). En faisant coexister une cartographie précise de la côte avec une représentation mythique de l'intérieur du continent, cette carte de l'époque illustre les deux objectifs visés dans cette exploration de nouvelles terres : la colonisation agricole et la découverte de l'El Dorado, dont rêvaient les Européens à l'époque de Richer.

On sait très peu de choses sur le séjour de Richer à Cayenne, en dehors des observations qu'il a faites. Son rapport de mission, publié en 1679, n'évoque que ses observations, et seules les deux lettres qu'il a écrites à Cassini les 4 mai et 20 juillet 1672 nous fournissent quelques détails sur sa vie quotidienne. Il se plaignait notamment de la cherté



©Archives Territoriales de Guyane, Cayenne

Figure 2. La Guyane française en 1677.

de la vie, de la lenteur du courrier et du service déplorable de la Compagnie des Indes occidentales.

L'activité astronomique de Jean Richer ne débuta pas immédiatement. Il passa les premiers jours à reconnaître le site et à régler les détails logistiques de son installation, mais on ne sait rien des circonstances de cette première période, si ce n'est qu'elle se situait en pleine saison des pluies. Cela a sans doute limité ses mouvements et retardé le début de son travail. Il fit construire un observatoire par les Indiens, *de vingt-quatre pieds de long sur dix-huit de large, couverte de branches et de feuilles de palmier, et fermée par les côtés avec des écorces d'arbres, laquelle m'a servi d'observatoire pendant que j'ai été en cette île.*

Après avoir commencé ses mesures, il constata les limites de son matériel et demanda à Cassini dans sa lettre

du 20 juillet 1672 de lui envoyer de nouveaux instruments, plus performants, avec des consignes pour les protéger de l'eau pendant le transport. Il évoquait également une contrariété imprévue, mais récurrente, en indiquant que, lors d'une de ses observations de Mercure, l'horloge s'était arrêtée en raison des fourmis qui pénétraient dans les rouages.

Enfin, Richer déplora à plusieurs reprises le climat en Guyane. Dans sa deuxième lettre à Cassini, il se disait confiant pour les mesures prévues au voisinage de l'équinoxe d'automne et du solstice d'hiver, mais redoutait les pluies qui allaient ensuite durer de janvier à juillet. Il devait également noter, plus tard, sa difficulté à observer Mercure, seulement visible très près de l'horizon et donc souvent cachée par les nuages. Quant à la parallaxe de Mars qui était l'objectif principal de la

mission, il déplorait que les conditions météorologiques ne lui eussent pas permis de commencer ses observations, mais cette partie du programme était prévue pendant la saison sèche, une chance qui a certainement contribué au succès de la mission.

Malgré ces multiples difficultés, Richer quitta Cayenne en mai 1673, après un séjour de plus d'un an, dont il rapportait des données d'une valeur scientifique exceptionnelle. Il aurait dû rester plus longtemps, mais la maladie l'obligea à interrompre son séjour. Le rapport contenant ses mesures indiquait sur un ton laconique qu'elles avaient cessé le 25 mai 1673 et expliquait modestement : *J'ai demeuré jusqu'à ce jour à Cayenne, les incommodités de ce climat m'ont obligé à rentrer en France.* Quant à son compagnon Meurisse, il ne résista pas à la maladie et mourut avant d'avoir pu rentrer en France.

Retombées scientifiques

Nous attendions le retour de M. Richer comme nous aurions attendu le verdict d'un juge, témoigna Fontenelle. L'attente ne fut pas déçue. Grâce aux observations que Richer rapportait de Cayenne, on découvrait que le système solaire était vingt fois plus grand que ce que l'on avait toujours cru. Et même Newton devait appuyer ses nouvelles idées sur les observations de Richer. La mission fut donc un véritable succès scientifique, malgré des risques d'échec considérables.

Nous pouvons être surpris de la qualité des observations de Richer à son époque et dans les conditions dans lesquelles son expédition s'est déroulée. Qu'il s'agisse des dimensions du système solaire ou du retard du pendule, la précision des résultats est étonnante. Mais Richer, conscient des attentes très élevées générées par sa mission, semble avoir effectué ses mesures avec un soin extrême, dont il témoignait dans son rapport. Il utilisa également les instruments les plus performants de son temps, et les méthodes d'observation astronomique développées par l'Académie, sous l'influence de Picard, accordaient une place importante à l'étalonnage des instruments. Les erreurs de mesure étant inévitables, comme la réfraction atmosphérique, les défauts de montage des lentilles ou la dilatation thermique des pièces mécaniques, il s'agissait de comprendre leurs causes afin de les corriger, c'est-à-dire d'estimer par le calcul les mesures qui seraient obtenues dans des conditions idéales, sans atmosphère et avec des instruments parfaits. Bien que Richer ne disposât pas des outils statistiques pour développer un modèle d'erreur, c'est bien un nouvel état d'esprit qui apparaissait dans la science, et il joua un rôle essentiel dans le succès de la mission. Enfin, malgré un climat généralement défavorable, la mesure de la parallaxe de Mars eut lieu en octobre 1672, c'est-à-dire exactement pendant la courte saison sèche.

Les résultats scientifiques de la mission de Richer dépendaient des calculs qui restaient à faire à partir des mesures effectuées simultanément à Paris par Cassini. Le principal résultat, déduit de

la parallaxe de Mars, était la distance Terre-Soleil, estimée à 33 millions de lieues, soit une erreur d'environ 2 % par rapport à la valeur moderne de 149,6 millions de km. Malgré le soin apporté par Richer à ses observations, les conditions expérimentales et la faible parallaxe ne permettaient pas de garantir une telle précision, en grande partie fortuite. Cassini notait d'ailleurs qu'une erreur d'un ou deux millions de lieues ne pouvait être exclue, une incertitude largement sous-estimée. La proximité entre le résultat de Richer et la valeur moderne est donc un coup de chance, que nous analysons plus loin. De cette distance fut déduit que le diamètre du Soleil était 100 fois supérieur à celui de la Terre, résultat proche de la valeur moderne de 109. Avec Kepler, la description du système solaire était une carte bien proportionnée, mais sans échelle. Après la mission de Richer, la carte avait enfin une échelle. Tous les résultats déduits de la mission de Richer concernant la parallaxe de Mars ont été essentiels pour le progrès de l'astronomie : la géométrie du système solaire était mieux connue, et les techniques de mesure et de calcul, mieux maîtrisées. Mais c'est une autre contribution de Richer qui lui a permis de passer à la postérité. Outre les observations astronomiques, qui formaient un ensemble cohérent, Richer était chargé de quelques observations secondaires de divers phénomènes physiques. Dans son rapport, après 65 pages consacrées aux mesures astronomiques, le chapitre sur "la longueur du pendule des secondes" est si bref que nous pouvons le citer intégralement. *L'une des plus considérables observations que j'ai faites, est celle de la longueur du pendule à secondes de temps, laquelle s'est trouvée plus courte en Cayenne qu'à Paris : car la même mesure qui avait été marquée en ce lieu-là sur une verge de fer, suivant la longueur qui s'était trouvée nécessaire pour faire un pendule à secondes de temps, ayant été apportée en France et comparée avec celle de Paris, leur différence a été trouvée d'une ligne et un quart, dont celle de Cayenne est moindre que celle de Paris, laquelle est de 3 pieds 8 lignes 3/5. Cette observation a été réitérée pendant dix mois entiers, où il ne s'est pas passé de*

semaine qu'elle n'ait été faite plusieurs fois avec beaucoup de soin. Les vibrations du pendule simple dont on se servait, étaient fort petites, et duraient fort sensibles jusqu'à cinquante-deux minutes de temps, et ont été comparées à celles d'une horloge très excellente, dont les vibrations marquaient les secondes de temps.

Il semble que Richer ait réalisé l'importance de cette observation, et le soin avec lequel il l'a obtenue lui a permis de l'affirmer avec certitude. Cependant, il n'avança aucune explication, même dans la publication de ses mémoires plusieurs années après son retour. Certains contemporains mentionnèrent l'expansion du métal sous l'effet de la chaleur. Il fallut attendre encore plusieurs années pour que la forme aplatie de la Terre soit reconnue comme la véritable explication. Cette observation fortuite, faite par Richer dans une cabane recouverte de feuilles de palmier, allait servir d'argument à Newton et aux partisans de l'hypothèse d'une Terre aplatie aux pôles. Dans ses *Principia* qui posent les bases de la physique moderne en 1687, Newton cite l'observation de Richer : *Or, plusieurs astronomes, envoyés dans des pays lointains pour y effectuer des observations astronomiques, ont constaté que les horloges à pendule se déplacent plus lentement près de l'équateur que sous nos climats. Et tout d'abord, en l'an 1672, M. Richer s'en rendit compte dans l'île de Cayenne ; car au mois d'août, observant les transits des étoiles fixes sur le méridien, il constata que son horloge était plus lente qu'elle ne devait l'être par rapport au mouvement moyen du soleil à raison de 2m 28s par jour. [...] M. Richer a répété ses observations, faites dans l'île de Cayenne, toutes les semaines pendant dix mois, et a comparé les longueurs du pendule qu'il avait notées sur les barres de fer avec les longueurs qu'il avait observées en France. Cette diligence et ce soin semblent avoir fait défaut aux autres observateurs. Si l'on se réfère aux observations de ce monsieur, la Terre est plus haute sous l'équateur qu'aux pôles, et cela par un excès d'environ 17 miles, comme l'a montré ci-dessus la théorie.*

Il faut noter que Newton rapporte non seulement le résultat de l'observation,



mais aussi, pour convaincre ses lecteurs, l'extrême soin avec lequel Richer l'a réalisée, en faisant allusion à d'autres missions dont les mesures sont moins conformes à la théorie, et qui ont justement été faites avec moins de soin.

Une mission presque impossible

Bien que l'Académie ait eu la maturité intellectuelle de concevoir cette mission et de la planifier de manière à assurer les meilleurs résultats, le succès de la mission était hautement improbable en raison d'une conjonction de facteurs.

- Richer était inexpérimenté. Les explorateurs tels que Bougainville et La Pérouse, qui se sont vus confier d'importantes expéditions au siècle suivant, étaient des marins expérimentés. En revanche, Richer n'avait aucune expérience des longs voyages ou des séjours dans les pays tropicaux.
- Comme nous l'avons noté plus haut, il s'agissait de la première mission d'un astronome vers des terres lointaines. On apprend toujours de l'expérience des prédécesseurs, mais Richer n'avait aucun exemple à suivre et devait tout inventer.
- Le climat de la Guyane est très peu propice aux observations astronomiques. Outre l'obstacle que constituaient les nuages pour l'observation du ciel, les pluies fréquentes ont dû rendre la vie quotidienne très difficile, détériorer les équipements et favoriser la prolifération des moustiques, vecteurs de maladies comme celle qui a causé la mort de Meurisse et le retour prématuré de Richer malade.
- La situation économique désastreuse de la Guyane française, le coût exorbitant des produits de première nécessité, le manque d'infrastructures et la faillite de la Compagnie des Indes occidentales compliquèrent considérablement le quotidien de Richer.

Il s'agissait donc d'une mission presque impossible. Si l'Académie était consciente de ces difficultés, c'était une conscience très théorique, car aucun des astronomes ne s'était jamais rendu dans les terres équatoriales. Concentrés sur un programme d'observations astronomiques, ils ont considéré Cayenne

comme un point sur la carte, sans contingences géographiques. La décision d'envoyer une expédition à Cayenne, encouragée par le soutien politique de l'État à une époque où la Compagnie des Indes occidentales était encore digne de confiance, était un pari risqué.

En accomplissant sa mission au-delà des attentes, Richer a permis à l'Académie de gagner ce pari. D'une part, outre l'important travail préparatoire préalable, le succès de l'expédition est dû à des qualités personnelles indispensables (compétences scientifiques et techniques, persévérance, autonomie, soin et probablement une constitution physique robuste), mais il faut aussi considérer que Richer a eu beaucoup de chance. Tout d'abord, étant donné la fréquence des guerres et des épidémies en Guyane, il a eu de la chance de revenir vivant. Quant aux conditions météorologiques, généralement défavorables tout au long de l'année, il est heureux que l'opposition de Mars, qui permet la mesure la plus précise de la parallaxe, se soit produite en octobre, c'est-à-dire pendant la courte saison sèche. On peut également supposer, au vu de l'abondance et la qualité des mesures qui ont fait le succès de sa mission, qu'il n'a subi aucune agression ou acte de vol ou de vandalisme sur ses instruments, ce qui aurait annihilé ses efforts, contrairement à l'expédition de Godin au Pérou au siècle suivant, dont les installations étaient régulièrement saccagées sur les stations de la triangulation. La chance de Richer n'a pas diminué son mérite personnel, mais a joué un rôle important dans le succès de sa mission, largement sous-estimé dans la littérature scientifique. Seul Olmsted (1942) qualifie Richer de *"rather lucky"*, mais sous-estime le fait que le succès de la mission a été un énorme coup de chance.

Bien que la mission ait été presque impossible, son succès en a fait un standard, suggérant que ses résultats représentaient ce que l'astronomie française était capable de produire en 1672. Cette restitution trompeuse peut être liée au fameux biais de survie, c'est-à-dire une erreur d'échantillonnage qui consiste à baser l'analyse statistique sur les cas de réussite, en ignorant les

échecs parce qu'ils sont moins visibles, ce qui conduit à surestimer les chances de réussite. Le biais de survie, qui consiste par exemple à affirmer que les bâtiments anciens étaient très solides puisqu'ils sont encore debout (en ignorant la grande majorité qui se sont effondrés), conduit à des interprétations erronées dans de nombreux domaines scientifiques. S'il avait échoué, si Richer avait succombé à une agression ou à une maladie, ou si la pluie avait compromis les mesures, il n'aurait pas obtenu de résultats : c'était le scénario le plus probable. Dans ce cas, l'histoire n'aurait aucune raison de parler de cette mission ratée, contrairement aux missions qui ont échoué de façon beaucoup plus spectaculaire, comme celles de Le Gentil ou de La Pérouse au XVIII^e siècle, ou qui ont atteint un objectif différent de celui qui était prévu à l'origine, comme les voyages de Colomb ou de Cartier qui cherchaient à atteindre l'Asie en naviguant vers l'ouest et qui ont finalement découvert un nouveau continent.

On peut tout au plus atténuer cette hypothèse en rappelant que la mission de Richer s'est déroulée sous l'égide de l'Académie des sciences. Cette institution aurait gardé le souvenir de l'échec dans ses archives et en aurait probablement tiré des leçons, tant sur le plan scientifique que logistique, et aurait organisé une autre expédition, dans de meilleures conditions, pour plaire à Colbert et au roi, pour résister à la concurrence britannique, et pour l'avancement de la science, d'autant que l'Académie a souvent été chargée d'organiser des expéditions scientifiques lointaines jusqu'au XIX^e siècle. Puis, un autre astronome, ailleurs, quelques décennies plus tard, aurait mesuré la parallaxe de Mars et noté le retard du pendule, et le nom de Richer n'aurait jamais été entendu en dehors du cercle étroit des historiens de l'astronomie.

Ainsi le succès inattendu de Richer a partiellement occulté les difficultés qui auraient pu compromettre sa mission, et a conduit à un discours biaisé sur le rôle de cet astronome dans l'histoire des sciences. Par ailleurs, l'observation du retard du pendule, secondaire au moment de la mission, est curieusement passée au premier plan.

Un rôle exagéré dans l'interprétation du retard du pendule

Malgré l'abondance et la qualité des mesures astronomiques effectuées par Richer, malgré les retombées spectaculaires des mesures de parallaxe, la postérité a essentiellement retenu de la mission de Richer l'observation du retard du pendule (figure 3), qui était au départ une question secondaire et que Richer et ses contemporains n'ont pas su expliquer. Ce souvenir biaisé est basé sur une double erreur. En effet, on aurait pu croire que (1) le retard du pendule était la principale, voire la seule, observation faite par Richer à Cayenne, et (2) qu'il avait effectué cette mesure dans le cadre d'une recherche sur la forme de la Terre.

Il est un fait que la longueur du pendule était un point de détail du programme que l'Académie avait confié à Richer. Il est vrai qu'il a fait cette observation avec beaucoup de soin, avec le souci d'établissement que nous avons rappelé. Son objectif premier était de pouvoir mesurer le temps afin de dater ses observations astronomiques, mais il est probable que le soin apporté à cette observation soit également lié à une demande de Picard qui, avant 1672, envisageait d'utiliser le pendule à secondes comme étalon pour mesurer les distances. Il cherchait à estimer avec plus de précision le diamètre de la Terre, dont la forme supposée sphérique ne faisait pas encore débat. La découverte de Richer permettrait, au mieux, de mettre en doute le caractère universel de la longueur du pendule à secondes. Si elle variait avec la latitude, le modèle de longueur défini par Picard ne pouvait pas être universel et perdait tout intérêt, à moins d'identifier une variation systématique, par exemple en fonction de la latitude, qui pourrait être corrigée. La naissance d'une théorie n'attend généralement pas la fin des expériences, et Newton n'a probablement pas eu besoin des résultats de Richer pour élaborer sa théorie, qui établit notamment une relation entre la forme de la Terre et les variations du champ gravitationnel. Cependant, lorsqu'il rassemble ses arguments pour la publier, il a la chance de trouver le résultat de Richer, obtenu 15 ans plus

CHAPITRE X. OBSERVATIONS PHYSIQUES. ARTICLE I.

De la longueur du pendule à secondes de temps.

L'UNE des plus considérables Observations que j'ay faites, est celle de la longueur du pendule à secondes de temps, laquelle s'est trouvée plus courte en Cayenne qu'à Paris : car la même mesure qui avoit esté marquée en ce lieu-là sur une verge de fer, suivant la longueur qui s'estoit trouvée nécessaire pour faire un pendule à secondes de temps, ayant esté apportée en France, & comparée avec celle de Paris, leur différence a esté trouvée d'une ligne & un quart, dont celle de Cayenne est moindre que celle de Paris, laquelle est de 3. pieds 8. lignes $\frac{1}{2}$. Cette Observation a esté répétée pendant dix mois entiers, où il ne s'est point passé de semaine qu'elle n'ait esté faite plusieurs fois avec beaucoup de soin. Les vibrations du pendule simple, dont on se servoit, estoient fort petites, & duroient fort sensibles jusques à cinquante-deux minutes de temps, & ont esté comparées à celles d'une horloge très-excellente, dont les vibrations marquoient les secondes de temps.

Figure 3. Le court rapport de Richer sur le retard du pendule.

tôt, qui s'accorde parfaitement avec la nouvelle théorie. Afin d'étayer la théorie newtonienne par des données supplémentaires, d'autres missions de mesure de la longueur du pendule à secondes furent envoyées dans l'Atlantique tropical par l'Académie, pour lesquelles les résultats de Richer servaient de référence. Lors de la controverse sur la forme de la Terre au début du XVIII^e siècle, le nom de Richer fut donc largement cité par les partisans de la théorie newtonienne et de l'hypothèse d'une Terre aplatie aux pôles, y compris par Voltaire, et cette gloire posthume donna l'impression anachronique que Richer avait été l'un des artisans des recherches sur la forme de la Terre. De nombreuses publications modernes ont ensuite alimenté ce malentendu, donnant l'impression que Richer avait découvert la forme aplatie de la Terre à l'occasion d'une expérience menée dans ce but.

Ainsi, l'histoire de la mission de Richer a été largement écrite au XVIII^e siècle à la lumière des nouvelles connaissances, un phénomène classique décrit ainsi par Bachelard : *Toutes les formes nouvelles de la pensée scientifique viennent après coup projeter une lumière récurrente sur les obscurités des connaissances incomplètes.*

Conclusion

Ainsi, pendant 350 ans, la postérité a entretenu un discours biaisé sur la mission de Jean Richer, considérée comme un standard en 1672 alors qu'elle bénéficia d'un énorme coup de chance, et dans laquelle l'importance

du retard du pendule a été largement surestimée.

Ce discours trompeur a involontairement été permis par Richer lui-même, qui, au-delà d'une description factuelle de ses observations, n'a publié aucun commentaire personnel, aucun doute, aucun état d'âme. Le fait qu'il n'ait été qu'un subalterne alors que ses travaux concouraient au prestige de Cassini, l'a sans doute dissuadé de livrer ses pensées. Fontenelle, l'historien des débuts de l'Académie, n'entre pas dans les détails et son histoire, pas toujours objective, vise surtout à exalter la grandeur de la France et de son roi. Quant aux rares auteurs qui ont tenté d'identifier la contribution de Richer, comme Delambre, ils ont été limités par le manque de documentation, un facteur aggravant étant que les archives de l'Académie des Sciences correspondant à la période 1670-74 ont été perdues, si tant est qu'elles aient jamais existé. Dans ces conditions, le rôle de Richer est resté mal compris et nous avons tenté ici de clarifier les circonstances de sa mission afin d'alimenter le débat sur sa place dans la communauté scientifique et sa contribution réelle aux progrès de l'astronomie et de la géodésie. ●

Contact

Laurent POLIDORI
laurent.polidori@ird.fr

Référence

OLMSTED, J. W. *The Scientific Expedition of Jean Richer to Cayenne (1672-1673)*. Isis, v. 34, p. 117-128, 1942-43.

Le cheminement du douzième parallèle (deuxième partie)

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

■ Jean-Claude LEBLANC

Deuxième mission janvier à mai 1968

Plus courte et plus animée, cette deuxième mission se composait de 14 personnes de l'IGN, de deux Américains et des personnels locaux. Le chef de la mission était Hervé Guichard qui était en séjour au Centre de Brazzaville ; collègue "fabuleux" (c'était son adjectif favori). Nous sommes arrivés à Fort-Lamy (N'Djamena) le 5 janvier 1968. Le travail reprenait au dernier point observé l'année précédente. Il restait environ 200 km pour rejoindre la frontière Cameroun-Nigéria. Le cheminement passe entre le lac Tchad et Fort-Lamy, zone plus boisée que le trajet précédent. Cette deuxième mission était donc plus légère ; nous étions répartis en deux groupes : la reconnaissance-construction et les autres équipes qui partageaient le même campement. Les nuits sans observation étaient assez festives compte tenu du dynamisme d'Hervé, avec sa guitare. La plus mémorable des soirées fut lors d'un bref séjour d'un officiel américain d'origine allemande.

MOTS-CLÉS

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

Le Nord Cameroun (le pays Kirdi) représente environ 50 km ; deux points y sont observés, ce qui explique la faible distance de 22 km qui apparaît dans le rapport mis à la fin (il faut y ajouter le côté avec le Tchad et celui de la jonction avec l'équipe du Nigéria).

Ensuite, c'est la traversée du Nigéria, en groupe. Dans ce pays, le cheminement mesure 1 255 km. Au Nigéria, c'est connu, les véhicules roulent à gauche. À l'entrée du pays, la piste était très large sur près de 5 km. Certains roulaient à gauche et d'autres à droite ! Au bout des 5 km, apparaît le premier rond-point que nous prenions... à droite.

Le Lac Tchad

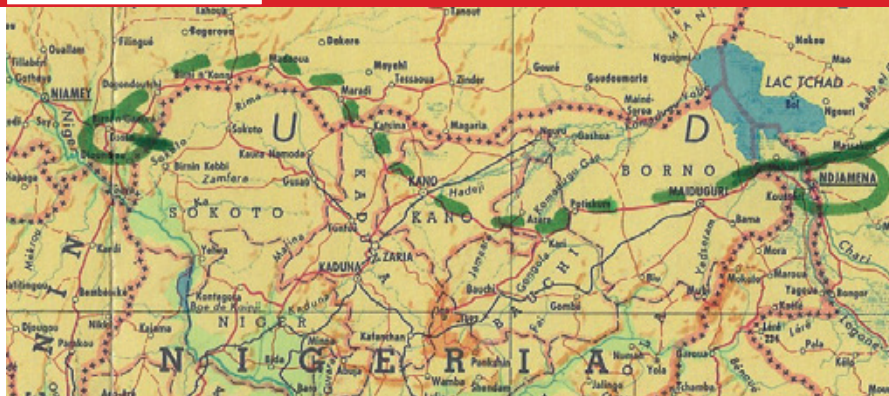
Le Lac Tchad sert de frontière entre quatre pays : Tchad, Cameroun, Nigéria, Niger. Je vous laisse deviner le rôle capital que peut avoir cette richesse dans les relations entre ces pays.

Comme le montre la photo, la traversée du Chari se fait par bac, avec la douane de chaque côté. Cela a compliqué la tâche des équipes de reconnaissance et de construction des signaux et du démontage du dernier Bilby. Il fallait une autorisation à chaque fois.



Traversée du fleuve Chari, frontière Tchad-Cameroun, à gauche l'un des rochers au lac Tchad, en haut vue depuis le rocher : le Chari arrive dans le lac (en bas, on devine la Land Rover, février 1968), à droite le bras secondaire du Chari depuis un signal au nord de Fort-Lamy (février 1968).





Nord Cameroun : passage piétons et véhicule IGN.

Troisième mission est de mi-octobre 1968 à avril 1969

Résumé en quelques chiffres.

Cette troisième mission suivait la précédente et partait de Dosso, de fin octobre 1968 à mi-mai 1969.

Composée de 23 personnes, dont deux pour le nivellement de précision.

Robert Gély en était le responsable.

Travaux techniques

Nombre de stations : estimé à 45 ;
23 stations astronomiques ; 32 signaux construits, hauteur moyenne de 14 m ;
Les distances mesurées sont : au géodimètre : 714 km et au telluromètre : 797 km ; en nivellement de précision : 212 km de 2^e ordre et 42 km de 4^e ordre.

Plusieurs stations ont ainsi pu être rattachées directement au nouveau réseau de nivellement.

L'équipe de reconnaissance a poursuivi ses travaux sur 240 km jusqu'à la frontière avec le Mali, soit 16 points nouveaux.

Le rapport de mission signale quelques difficultés. Le premier géodimètre est tombé en panne au bout d'un mois, le second était peu performant et a obligé à réduire les distances entre points.

La déviation moyenne du cheminement est un peu supérieure aux spécifications techniques : 11,17 grades pour 11,11 grades.

Les mesures au géodimètre furent perturbées d'abord par une période de brume du 26 janvier au 11 février, puis par des feux de brousse ; en tout, 32 soirées furent défavorables. En astronomie, à partir de mars en raison de passages nuageux, 34 nuits furent inexploitable (pour les 23 points).

Le superviseur américain, H. Caddess qui parlait le Français et qui participait à sa 3^e mission, en acceptant quelques modifications techniques, a facilité les résultats finaux, des observations.

La mission a aussi perdu quelque cinq jours pour le passage des douanes Niger-Haute-Volta (Burkina Faso maintenant) et Haute-Volta-Mali.



Là, des policiers nigériens nous ont fait comprendre qu'il fallait tourner à gauche. Cet incident ne s'est plus reproduit : il suffisait de penser qu'il fallait tourner dans le sens horaire !

Un soir, nous avons monté un camp léger à la belle étoile au sud de Kano et... à deux heures du matin, des militaires nigériens intrigués et armés nous ont réveillés ! (*Ce camping se passe en 1968 et ne serait évidemment plus possible, à cause du terrorisme actuel*).

Le lendemain matin, c'est le départ de Kano, direction nord-ouest pour rejoindre le Niger. Selon mon autre passeport, nous sommes sortis du Cameroun le 4 avril 1968 et entrés au Niger au poste de Dan Issa, près de Maradi, le 8 avril. Il restait à rejoindre Niamey par la piste en latérite Zinder-Niamey. Et sur les pistes, il fallait rouler au minimum à 70 km/h pour éviter la "tôle ondulée". Après une journée et une nuit à Niamey, au mess des officiers, nous avons passé quelques jours (et quelques nuits) à l'est de Dosso pour assurer la seconde liaison avec l'équipe du Nigéria, à la frontière Nigéria-Niger, en observant trois sommets : le départ de la mission EST suivante.

Le retour en France était prévu le 25 avril. Anecdote : la veille du retour, Hervé me demande si je veux bien être de ceux qui reconduisent tous les matériels et véhicules vers la base de

Bangui. J'ai hésité, mais comme tout était programmé, j'ai refusé. Je ne l'ai pas regretté, car j'ai connu Bangui en 1983 et en septembre 1991 (pour la fermeture de la base) et surtout les copains sont restés bloqués à Bangui pendant un mois : c'était "mai 68" !

Et peut-être aussi...

... et peut-être aussi que l'événement prévu en septembre trottait dans ma tête. En effet, mi-septembre 1968, j'ai "perdu la moitié de ma valeur". Cela mérite une explication, fournie par les anciens de la génération 1950. Dans ce temps-là, les opérateurs de terrain pouvaient passer cinq à six mois "aux Colonies" (c'était le vocable à ce moment), puis cinq ou six mois en France. À cette époque, l'IGN avait la charge de la cartographie au 1:200 000 dans les "Colonies" et de la carte au 1:20 000 (ou 1:25 000) en France. Alors, une fois mariés et pères de famille, les gens de terrain n'étaient plus toujours disposés à l'éloignement, d'où l'expression employée par leurs supérieurs, souvent anciens militaires du Service géographique de l'armée (SGA).

Je place ici encore un détail personnel. Trois semaines avant notre mariage, j'ai déclaré une belle crise de "palu" qui a duré deux semaines, à l'eau et sans pouvoir beaucoup manger. Aussi suis-je plutôt maigrelet sur les photos !

Troisième mission ouest de mi-octobre 1968 au 24 avril 1969

Dakar-Kayes. Le chef de mission était Jacques Leménestrel que Jacques Grégoire, comme prévu au départ, a remplacé mi-janvier ; et j'étais devenu chef d'équipe de la géodésie. Le parcours était relativement aisé puisque le cheminement suivait la ligne de voie ferrée (un mètre de large) : "Océan-Niger" qui relie Dakar à Koulikoro (environ 40 km au nord-est de Bamako), soit 1 288 km en tout.

Nombre de stations : 53 ;

Les distances mesurées sont : au géodimètre : 682 km ; au telluromètre : 782 km ; en nivellement de précision : 52 km, le cheminement existant suivait la voie ferrée déjà nivelée.

Les signaux furent bien utiles pour équiper 41 points, hauteur moyenne de 22 m donc quelques-uns étaient encore plus hauts.

Au début, l'un des géodimètres était inutilisable. Il n'a pas été renvoyé à l'AMS ; il a servi de pièces détachées pour le second qui a tenu jusqu'à la fin de la mission en changeant la lampe à mercure, la cellule de Kerr, la cellule photo-électrique et quelques autres pièces.

Les deux équipes d'astronomie ont observé 25 points et l'équipe de géodésie, 28. En fin de mission, une brume épaisse a gêné les astronomes et empêché la mesure des deux derniers côtés au géodimètre.

Quelques souvenirs personnels

Fin janvier, les calculs étaient hors des tolérances. Au bout de trois jours, le nouveau chef de mission a réuni les trois chefs d'équipe d'observation pour se déplacer sur les sommets incriminés. Le défaut venait du point géodésique : j'en suis encore vexé, car j'étais responsable et (un peu) coupable ! J'ai eu quelques explications avec le copain fautif (la faute est humaine et l'erreur instrumentale) : il avait grossièrement placé le projecteur, puis rangé et descendu le matériel du signal, puis oublié de placer et d'orienter le projecteur (ce qui était vrai puisque les astronomes le voyaient très faiblement). Le projecteur était donc mal orienté, mais, en plus, décalé de 2,6 cm. Je raconte quand même cet évènement pour montrer les conséquences d'un défaut de 2,6 cm vu à 15 km...

Notre camp était près de Tambacounda, au Sénégal. Je suis convoqué par le commissaire de police pour "insulte" ; c'était l'un des secrétaires qui conduisait la Land Rover et, à un piéton qui rouspétait, il a lancé "et ta sœur" et lui a compris "ta gueule" ; c'était le commissaire ! Il a fallu lui expliquer l'interjection employée, idiote mais assez courante à l'époque, "et ta sœur, elle bat le beurre, si c'était..." ; il a accepté les explications et nos excuses, mais pas de venir nous rendre visite à notre camp.

En mars, ma jeune épouse est venue pendant environ deux mois (elle n'était pas la seule, trois épouses sont venues,

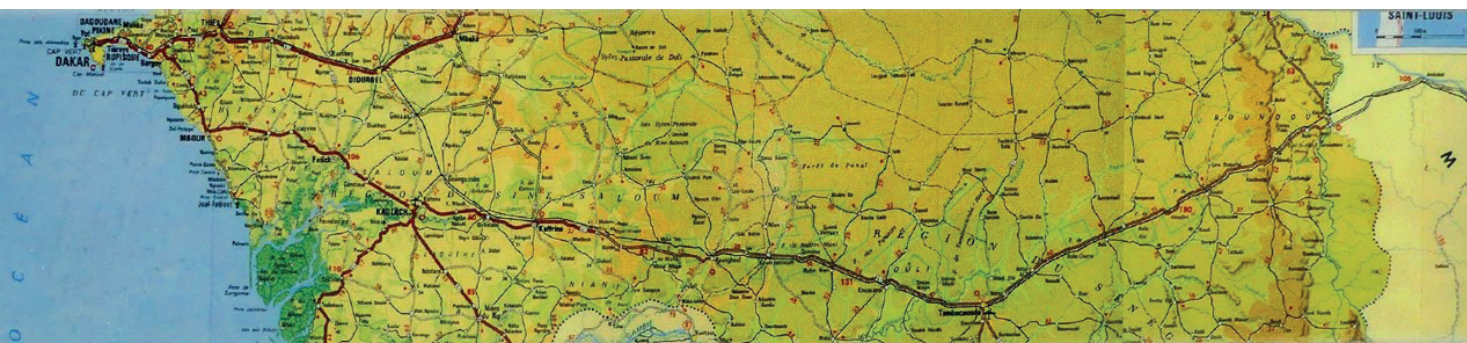
dont l'épouse du jeune responsable américain présente quelques mois). Nous étions un peu avant la frontière Sénégal-Mali lorsque le chef de mission a reçu une note de service du chef de Centre IGN de Dakar. Dans l'un des paragraphes, la note demandait de renvoyer sur Dakar "le matériel inutilement dispendieux (campement, épouses, matelas, etc.)". J'ai pu rappeler à l'auteur ce passage quelques mois après !

Encore une anecdote, pour le séjour à Dakar, j'avais emporté mon fusil de chasse (celui de la première mission). Comme j'avais le permis de chasser au Sénégal, le fusil m'a suivi pendant la mission. Nous étions un peu avant la frontière avec le Mali. En rentrant dans la nuit (je n'étais pas seul), je tue un jeune phacochère. Arrivé au camp, j'aide les Africains à vider l'animal. Je sentais tellement fort que je fus interdit de guitoune ; j'ai passé le reste de la courte nuit sur un matelas kapok, sous la tente hexa, avec le frigo à pétrole !

Passage de la frontière entre le Sénégal et le Mali

La rivière Falémé, affluent du fleuve Sénégal, est ici la frontière entre le Sénégal et le Mali.

Sur les images, en haut de la page suivante, mi-mars 1969, on entre au Mali ; sur celle de dessous un mois après, retour au Sénégal, la rivière est à sec. Avant mi-mars, le niveau de l'eau ne permettait pas le passage des véhicules. La solution consistait à prendre le pont de la voie ferrée, à quelques kilomètres au nord, sans difficulté pour les véhicules puisque les rails sont à voie métrique.



Le trajet qui suit la voie ferrée : Dakar, Kaolack, Tambacounda, Ambidédi (il manque Kayes, à l'est).



Cette histoire, un peu longue, commence à Ambidédi, au Mali, le long du fleuve Sénégal, à mi-chemin entre la frontière Sénégal-Mali et Kayes. Une mère malienne vient au camp avec son fils de 8 ou 10 ans qui a une jambe bien enflée et entourée de feuilles. Mon épouse, jeune infirmière, enlève les feuilles et nettoie la grande plaie (avec du daquin ou de l'eau de javel diluée ?).

Trois jours après, mère et fils reviennent : la plaie bourgeonnait. La décision de sagesse fut prise : le gamin fut conduit à l'hôpital de Kayes par l'un des secrétaires accompagné de la jeune infirmière (je ne pouvais pas y aller, le travail...). Là, un médecin d'Allemagne de l'Est les reçoit, garde le malade et demande de revenir dans une semaine. J'ai fait la connaissance du médecin la semaine suivante ; il nous dit qu'il fallait soigner d'abord la syphilis, ce qui fut rapide puisque le gamin n'avait jamais reçu d'antibiotique, puis de revenir dans une semaine.

Nous retournons à l'hôpital : la plaie étant presque refermée, le médecin donne un peu de médicaments et autorise le retour. J'en profite pour donner mon sang, comme je le fais deux ou trois fois par an selon l'endroit où je me trouve.

Fin du premier épisode : le gamin est venu nous rendre visite deux ou trois semaines après ; la maman a remis quelques petits cadeaux ; nous avions bien sûr changé de camp, mais toujours le long de la voie ferrée et de la piste, donc facile à retrouver.

Deuxième épisode : en 1976, j'étais alors enseignant à l'École d'Arzew, près d'Oran (je ne transcris pas les trois sigles successifs de l'École). Donc au printemps 1976, je vais donner mon sang à l'hôpital d'Oran ; qui est le médecin qui me reçoit ? Si, si, celui de Kayes ! Nous avons mis quelques secondes avant de

nous reconnaître ! Les fois suivantes, il m'accueillait avec un accent aussi chaleureux que germanique par *"et cette santé, comment ça va ?"*. Il avait quitté Oran en 1978.

Vers le milieu de cette 3^e mission, les propositions de postes pour les Centres IGN à l'étranger nous sont communiquées ; je postule pour deux endroits. À la fin de la mission, j'apprends que je suis retenu pour un poste de deux ans au Centre de Dakar. Je ne partici-



perai donc pas à la dernière mission du "Douzième Parallèle". Et puis...



"Faire les foins", fin janvier 1969, près de Tambacounda, emplacement de notre camp.



Notre charmant camp à Ambidédi, nous pouvions nous baigner dans le fleuve Sénégal.

Quatrième mission ouest Kayes -Bamako novembre 1969 - avril 1970

Nous sommes arrivés pour le séjour à Dakar fin juin 1969. Courant septembre, Michel Louis, toujours chef des Travaux spéciaux de la 2^e Direction, me contacte par téléphone pour me proposer la responsabilité de la mission ouest (Kayes-Bamako). Un autre ingénieur des travaux accepte de prendre la responsabilité de la mission est (Ouagadougou-Bamako), mais il n'a plus, entre les refus et les affectations dans l'hémisphère sud, de candidat. Donc, il a pensé à moi : je ne peux pas refuser ! Et le directeur général de l'IGN, Georges Laclavère, "ordonne" au chef du Centre de Dakar, Pierre Traizet, de me détacher pendant la durée de la mission. Cette mission s'est déroulée de mi-novembre 1969 à mi-avril 1970.

Début novembre, nous sommes trois sur place à Kayes pour préparer la mission. J'accueille pendant deux jours Georges Laclavère et Pierre Traizet. Entre 1932 et 1934, jeune lieutenant d'artillerie, Georges Laclavère fut responsable de la construction, entre Kayes et Diamou (environ 60 km), de la voie ferrée Dakar-Koulikoro. Devant la gare de Diamou, un Malien de près de 50 ans s'est présenté : c'était le fils du chef des travailleurs maliens, il avait reconnu Georges Laclavère, venu en souvenir en ce lieu avant de prendre sa retraite.

Au retour de Diamou, j'avais prévu une petite halte en fin de la chaude journée : déguster un whisky sur le bord de la piste (photo de droite). L'hôtel de Kayes était tenu par le même propriétaire que pendant les années 1930 et suivantes. Durant deux heures, lui et Georges

Laclavère ont raconté leurs souvenirs ; dommage, je ne les ai pas enregistrés ! Déjà à cette époque sévissait une épidémie de fièvre jaune, ils étaient les deux seuls Français survivants (sur sept je crois) ; le seul remède pour éviter les piqûres des moustiques était de passer les nuits sur les hauteurs de Kayes.

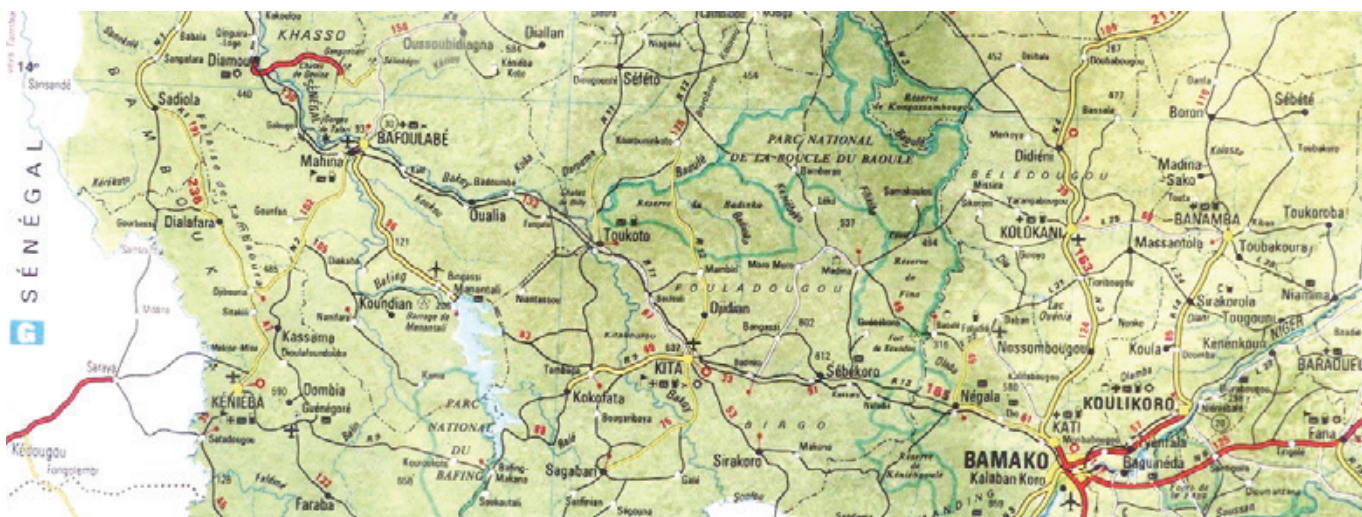
Résumé des observations, distances mesurées

35 stations : 20 au sol et "seulement" 13 signaux de 20 m en moyenne ; 17 points d'astronomie séparés de 26 km en moyenne ;

Distances mesurées : au géodimètre : 37 distances pour 472 km et au telluromètre : 37 distances + 22 rattachements pour 501 km ; en nivellement de précision : 20 km.

Déroulement

Au début de la mission, je me suis présenté aux autorités locales, comme le veut la politesse. Le commandant de la région était un jeune officier malien.



Kayes est au nord-ouest de Bafoulabé (voir le schéma à la fin de cette mission).



Il me convoque deux ou trois semaines après pour demander que tous ceux qui sont vaccinés contre la fièvre jaune depuis plus d'un an soient à nouveau vaccinés ; c'était mon cas et celui de plusieurs membres : une nouvelle épidémie de fièvre jaune circulait dans le Mali.

Peu de points après le début des observations, le chef de l'équipe de géodésie me signale une anomalie : l'angle prévu dépasse les 26 grades, la limite étant fixée à 20 degrés (22,22 grades). Après recherches sur la carte au 1:200 000 et sur les photos aériennes au 1:50 000 de 1953, nous retenons trois endroits,



petits sommets accessibles en voiture. Sur place, après vérification de la cote avec l'altimètre, le premier convient, ouf. J'ai eu l'explication un an après : le point avait été reconnu à la fin de la mission précédente et le copain avait demandé l'autorisation au contrôleur américain de dépasser exceptionnellement les 20 degrés. Six mois après, les responsables avaient changé. (Il est possible que le premier choix non retenu, celui dans les tolérances, ne convenait pas à une station astro et que, ne sachant pas s'il serait astro ou géodésie, il a retenu la station hors tolérance valable pour les deux).

Cette région est la fin du massif Fouta Djallon. Les conditions météorologiques furent acceptables sauf pendant une période de brume de chaleur entre le 18 mars et le 5 avril.

La voie ferrée et la piste passent au pied. (Sur la diapo, j'ai écrit qu'il fallait stationner ce point, je n'ai pas participé aux observations).

Dès le début, l'un des géodimètres était en panne et renvoyé aux États-Unis. Peu de temps après, il fallut changer la lampe à mercure et la cellule de Kerr du deuxième (avec des pièces de rechange en plus des appareils). En janvier, il tombe en panne : la mission "est" nous confie son second appareil qui devient notre 3^e et qui tombe en panne à trois distances de la fin.

L'équipe de géodésie a perdu deux ou trois nuits : le géodimètre donnait des résultats incohérents. Le copain m'appelle au secours ; ensemble nous trouvons la cause de la panne intermittente : un dysfonctionnement de la ligne à retard. Il a suffi de remplacer le bloc par celui du 2^e appareil et le 3^e a repris les mesures. À l'époque, j'ai supposé que les géodimètres n'avaient pas été testés et que les pièces de rechange n'étaient pas neuves. Les AGA étaient probablement en fin de vie et peut-être qu'il n'y avait plus de pièces de rechange chez le constructeur.

Comme la mission ouest n'a pas eu à construire beaucoup de signaux vers Bamako (c'est la région du Bambouk, assez accidentée), elle a pu en prêter



Les chutes de Gouina entre Diamou et Bafoulabé.



Une belle arche.



Les criquets : les Africains ont enflammé cet arbuste et nous en avons mangé ; ils contiendraient des protéines ; je n'ai pas retenu le goût !



Bière et eau dans plusieurs seaux autour du camp pour attirer les guêpes.

deux à la mission de l'est qui en avait bien besoin et aussi un ou deux à la mission de Mopti, présente en même temps au Mali, qui devait cartographier le delta intérieur du fleuve Niger.

Dans le rapport de fin de mission, j'ai écrit que les relations avec le "Contact inspector" n'étaient pas excellentes : "... n'a jamais pris de décision, toujours attendu l'avis de son homologue de la mission est ou du bureau de Washington..." (Ce fut bien le seul cas de toutes les missions). Heureusement, Hoopy Caddess était son homologue à la mission est et il participait lui aussi à sa 4^e mission (nous avions participé ensemble aux deux premières).

J'en profite aussi pour me rappeler de Steeve Vereb, contrôleur des fréquences, discret et attachant. Nous avions participé ensemble à la 2^e et à la 3^e mission ouest et il fut aussi le contrôleur de cette dernière. Il avait même appris quelques mots de français.

Cette fois, je termine par la composition de la mission : 20 personnes, sauf début décembre après le retour en France d'un secrétaire, pour raison sanitaire, remplacé mi-janvier.

L'Institut géographique du Mali a détaché deux jeunes membres pour assister

aux travaux ; l'un des deux a renforcé l'équipe de reconnaissance qui en avait bien besoin.

Les autorités militaires maliennes ont aussi affecté un opérateur radio, sous-officier malien. Elles n'ont pas donné de certificat d'opérateur radio de complaisance. Tous les midis, je le laissais lancer la procédure (... ici TSU 270...), puis je prenais le relais lorsque le contact était établi entre les équipes.

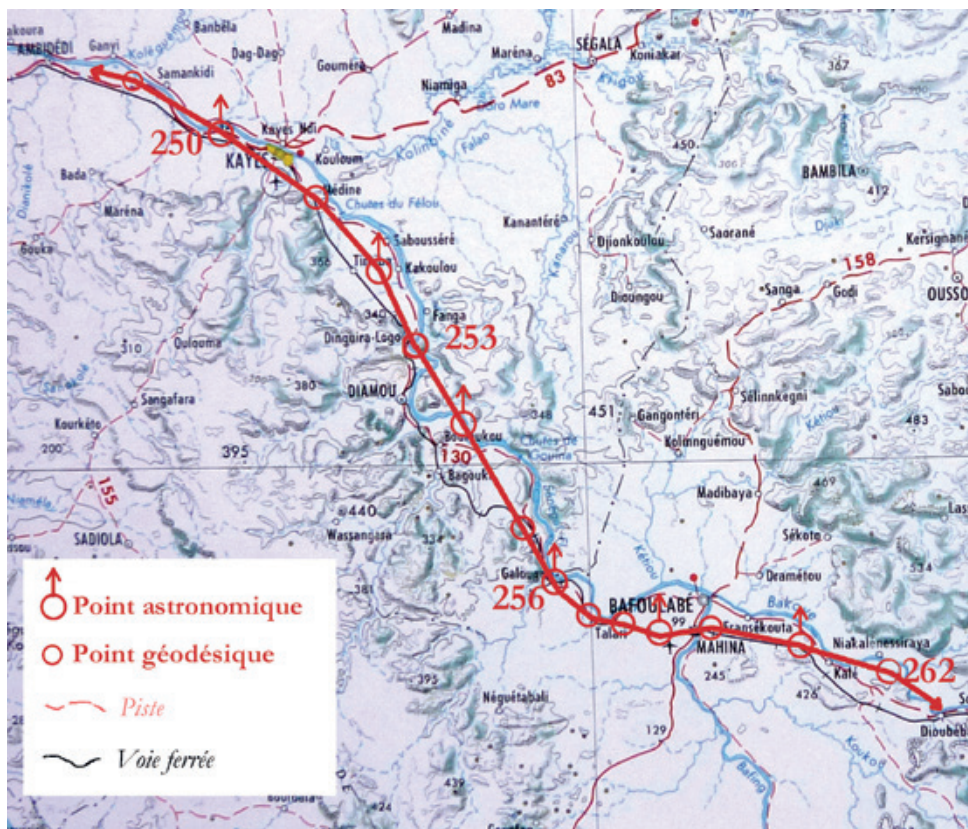
La douche écologique : l'eau dans un jerrican de 20 litres était chauffée par le soleil, elle en devenait même brûlante ! On reconnaît le seau "Manufrance". L'entourage par les sékos (paillages tressés) était rarissime : le plus souvent le seau était suspendu à une branche ou entre deux camions, tant pis pour la pudeur !

J'ai une peu honte de présenter cet incident. Ce pont, peu après Bamako, fut détruit pendant la saison des pluies. Quand les roues avant, motrices avec crabotage et réducteur, ont touché la rive, j'ai accéléré trop tôt et avec Alain, le mécanicien, nous avons mis trois heures pour sortir... puis repartir vers Kayes.

Si, à l'approche de Bamako, le cheminement nécessitait beaucoup moins



de signaux, il fallait parfois rejoindre à pied la station sur un sommet inaccessible en voiture et avoir besoin des manœuvres locaux. Le premier porte un telluromètre dans sa housse de transport. Dans le rapport de fin de mission, j'ai écrit que "la durée moyenne de marche était de 16 min avec 4 points à 45 minutes".





Exemple partiel du cheminement depuis Kayes vers Bamako. Les deux rivières : Bakoye et Bafing se rejoignent à Bafoulabé pour devenir le fleuve Sénégal. Le cheminement est en portion de lignes droites rouges.



Le fleuve, la piste tortueuse et la voie ferrée indiquent un relief mouvementé. Les points 257 et 258 sont des points de géodésie qui se suivent. La numérotation part de Dakar, points 200 et 201.



Retour à Dakar fin janvier 1970 pour... une naissance.



Arrêt du train en gare de Kayes.

Quatrième mission est octobre 1969 - avril 1970

De mi-octobre 1969 à mi-avril 1970.

La mission de l'est était sous la responsabilité de Henri Illy. Elle continuait la précédente depuis la Haute-Volta (Burkina Faso) jusqu'à la jonction avec la mission ouest à Bamako. En plus des 20 membres, elle comprenait deux niveleurs et deux secrétaires. Le point de jonction a été reconnu par l'équipe "est" et observé par l'équipe "ouest".

Travaux réalisés : Observations : 50 angles mesurés et 24 points astro.

Distances mesurées : au géodimètre : 50 distances pour un total de 641 km et au telluromètre : 685 km ; en nivellement : les opérateurs ont observé 540 km et posé 130 repères et rivets nouveaux. Ils ont pu rattacher directement tous les sommets du cheminement, sauf sept.

Difficultés rencontrées

La reconnaissance ne pouvait pas identifier les points sur les photos trop anciennes pour une région qui a connu des alternances de cultures et de jachères.

Les groupes électrogènes ne supportaient pas bien les chaleurs ; dans

l'attente de nouveaux groupes, les équipes n'avaient pas d'autre moyen que de recharger les batteries par les voitures.

Les conditions météo se sont dégradées : brume de chaleur en mars, ce qui a gêné les mesures au géodimètre, puis les nuages en avril ont empêché les observations astro.

La région a nécessité plus de côtes courts (le plus petit mesurait 5,160 km) et plus de signaux, d'où l'envoi des deux signaux de la mission ouest.

Après la jonction des deux missions, nous avions évidemment prévu d'organiser une petite fête. Elle n'a pas pu se concrétiser : il y eut neuf rapatriements sanitaires pour les deux missions et plusieurs participants sont repartis dès que possible. Alors, la fête fut remplacée par un repas... après le baptême de notre premier enfant dans la cathédrale de Bamako (maman, petite fille et grand-père étaient venus de Dakar par avion pour passer deux semaines à la Base IGN de Bamako dont Maurice Goutodier était le chef).

...fin ... du... terrain... et suite...

Michel Louis. J'ai cité plusieurs fois son nom. Je lui en ai un peu voulu vers 1985 lorsque, devenu directeur général adjoint, il m'a nommé "chef du projet La Boétie". Au 107 de la rue La Boétie, l'ensemble de la construction comprenait deux immeubles accolés, l'un côté rue et l'autre côté intérieur. Le premier cité hébergeait le magasin de vente des cartes, mais... n'était jamais déclaré comme "Établissement recevant du public" (ERP 3^e catégorie). L'unité n'était plus la minute ou le dmgr, mais "l'UP" (Unité de passage). Heureusement, nous étions plusieurs du service de la logistique dans ce "guêpier". Cela a servi à quoi ? Classé ERP le 7 janvier 1992, l'ensemble fut rendu à l'État début 2011. Donc les travaux furent utiles... pendant 19 ans. (Souvenir personnel : j'ai tenu à être le dernier client du magasin le 24 décembre 2010 et le premier client du nouveau magasin "Le Monde des Cartes", rue de La Verrerie, le 28 avril 2011).

Quelques années plus tard, j'ai retrouvé Michel comme organisateur des randonnées (sans oublier Claude) et nous sommes devenus copains, amis. Puis, encore plus tard, quand il était en maison de retraite, je lui rendais visite, si possible une fois par semaine, et nous nous promenions le long des bords de Marne, à Saint-Maur ; je le sentais heureux de marcher.



"Bulletin d'information de l'Institut géographique national, N° 25 de mars 1974" dont voici quelques extraits

Profil du terrain, page 25.

Jean-Jacques Levallois (à l'époque, chef de la 2^e direction). J'ai cité son nom au tout début. Nous nous connaissions, mais je n'étais pas dans son "cercle rapproché". Je me suis joint un jour à ce groupe, au moment du café. Dans le feu anodin de la conversation, ce n'était pas du tout préparé, je suis amené à lui dire que j'avais dû étudier son cours de géodésie et que j'avais trouvé deux ou trois anomalies. Quelle fut sa réplique ? Il faut l'imaginer répondre, avec son air un peu bougon : "*Mon pôv ami, ce bouquin est plein de conneries, d'ailleurs toute ma vie je n'ai écrit que des conneries et ça n'a servi à rien*". Quelle modestie de la part d'un monsieur qui avait une aura internationale puisqu'il fut aussi secrétaire général de l'Association internationale de géodésie et qui a laissé des ouvrages remarquables ! Voilà quelques années, Catherine m'a remis certains documents de son père, Michel. Je possède maintenant les quatre tomes de "Géodésie générale", signés et dédiés par monsieur Levallois, (en date du 06.02.70.). Quant à moi, j'espère ne pas avoir écrit trop de c... ; je sais depuis longtemps que le risque zéro n'existe pas (n'omettez pas de me les signaler) !

Et le douzième parallèle, il a servi à quoi ?

Pour étayer mes souvenirs, j'ai découvert beaucoup de précisions au Centre de documentation scientifique et technique (CDoST) de l'IGN (un grand merci à Anne).

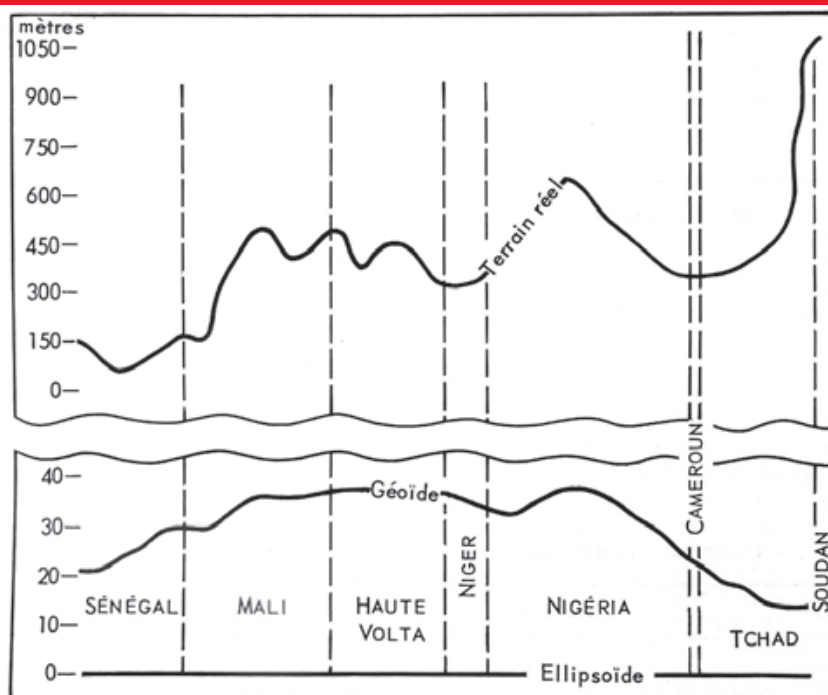


Fig. 23 - Profils du terrain réel et du géoïde par rapport à l'ellipsoïde (les dénivelées du géoïde sont exagérées 15 fois par rapport à celles du terrain réel).

Extrait du BI 25, page 56.

Tableau 5 - Comparaison entre les mesures au géodimètre et au telluromètre (en mètres).

Section	Géodimètre	Telluromètre	Différence
Soudan-Tchad	898 419,6673	898 419,4824	+ 0,3849
Nigeria	1 201 334,7720	1 201 332,3898	+ 2,3822
Niger-Sénégal	2 554 507,6161	2 554 507,2263	+ 0,3898
Total	4 654 262,2554	4 654 259,0985	+ 3,1569

Personnel IGN. Près de 80 agents de l'IGN ont participé à l'une des six missions étalées sur quatre ans. Environ dix ont participé à trois missions. De l'IGN, nous sommes deux observateurs à avoir participé aux quatre années, René et moi (nous étions séparés dans les deux dernières). Le superviseur américain H. Caddess, cité précédemment, a participé aussi à quatre missions.

En astronomie, à partir des éléments inclus dans le bulletin, j'ai calculé la moyenne des résultats pour les quatre tronçons Niger, Haute-Volta, Mali, Sénégal. Les "erreurs probables moyennes" sont résumées :

- en longitude 0,14 seconde sexagésimale ;
- en latitude 0,10 seconde sexagésimale ;
- en azimut 0,48 décimilligrade.

Les connaisseurs apprécieront !

Les remarques qui suivent, toujours extraites du BI N° 25, expriment bien autrement les résultats.

Voici le résumé d'une première compensation qui a été faite entre la Transcontinental traverse (citée en

tout début, elle s'étend sur 5 000 km), les observations par satellites avec la chambre Wild BC-4 entre Dakar et Ndjamen (Fort-Lamy) et les mesures du Douzième Parallèle : "*... ce qui correspond à une précision relative de 1:1 200 000 pour le Douzième Parallèle*". "Une autre comparaison a été faite entre la longueur du Douzième Parallèle obtenue par le cheminement, et celle, obtenue entre Dakar et Ndjamen (Fort-Lamy), par observations Doppler sur satellite, méthode actuellement susceptible d'une très bonne précision... la part de l'erreur revenant à la mesure du Douzième Parallèle est aussi de 2,1 mètres, soit 1:1 660 000".

"Les comparaisons ci-dessus montrent que la précision du cheminement est certainement meilleure que le millionième et que le but que l'on s'était fixé a été atteint" ●

Contact

Jean-Claude LEBLANC
jc.leblanc@orange.fr



Nathalie Talec : la Route de l'écho

© Thierry Rambaud/Musée de Picardie - ADAGP

■ Jean-Pierre MAILLARD

Le 4 mars 2022, la parution, aux éditions Dilecta, du livre "461 Dix ans d'art contemporain" a souligné l'action, depuis une dizaine d'années, de la commission mécénat de la Fondation des artistes qui aide grandement à la production d'œuvres jusqu'à se placer, dans le domaine, deuxième contributeur français après le Centre national des arts plastiques (CNAP), privé qui plus est.

La Fondation des artistes

Précédemment dénommée Fondation nationale des arts graphiques et plastiques (FNAGP), la Fondation des artistes, rappelons-le, est issue du regroupement en 1976 de deux legs consentis à l'État, le premier par la baronne Adèle de Rothschild d'un hôtel particulier à Paris, le second par les sœurs Jeanne Smith et Madeleine Smith-Champion d'une grande propriété à Nogent-sur-Marne. Toutes trois passionnées d'art, collectionneuses et artistes, elles ont offert à

l'État des biens à vocation de soutien aux artistes. Dans le respect des vœux des donatrices, la fondation accompagne des créateurs à toutes les étapes de leur carrière depuis leur installation, en attribuant un atelier, voire un logement, en finançant des projets d'envergure internationale, en offrant un lieu d'exposition jusqu'à permettre l'accès à une maison de retraite. L'acceptation des legs respectivement intervenus en 1922 et 1944 a, en 1976, finalement conduit à la création par l'État de cette fondation, reconnue d'utilité publique la même année. Le changement de nom est intervenu fin 2018 concomitamment à une reprise des statuts, en vigueur depuis plus de quarante ans, avec la prise en compte de préconisations du Conseil d'État et la nécessaire adaptation au cadre réglementaire actualisé. Récemment ouvert au public, l'hôtel de Rothschild présente un riche cabinet de curiosités et la rotonde Balzac, un lieu fréquenté en son temps par le romancier. De même, la propriété de Nogent accueille, entre autres, une maison de retraite et la MABA, un lieu d'exposition temporaire d'art contemporain à la programmation recherchée.

La commission mécénat

Fort de la perception de nouveaux revenus locatifs le conseil d'administration a décidé l'attribution d'aides à la production d'œuvres d'art. À cette fin, une commission mécénat a été créée en décembre 2011, composée de la directrice de la fondation, de représentants du ministère de la Culture et de quatre personnalités qualifiées. Les aides, consenties à l'appui de projets à réaliser en France, s'adressent aux artistes sans critère d'âge, confirmés ou émergents, français ou étrangers, dans tous les champs de l'art visuel, de la peinture à la vidéo, de la sculpture à la performance, du dessin à la photographie, etc. Deux fois par an, la commission mécénat retient les projets qui méritent le concours de la fondation. En dix ans, c'est plus de cinq cents artistes qui ont été aidés au travers de 461 propositions retenues, d'où le titre de l'ouvrage. Financièrement la fondation a mobilisé 5,3 M€ sur la période, soit en moyenne 11 500 € par projet. En 2022, pour marquer l'anniversaire de la commission, une dotation complémentaire et exceptionnelle de 100 k€ porte à 600 k€ l'enveloppe annuelle.



Les critères de sélection sont la qualité artistique du projet, les perspectives de diffusion, l'appréciation de la faisabilité technique du projet et l'analyse du plan de financement. Le montant de l'aide, qui ne peut pas dépasser 80 % du budget réel, est uniquement réservé à l'artiste. Si l'aide retenue est supérieure à 50 000 €, elle est alors à soumettre à la délibération du conseil d'administration.

"461 Dix ans d'art contemporain" présente une sélection de 65 œuvres qui montrent bien la diversité des réalisations, étant observé que la géométrie n'y figure apparemment pas en bonne place. Toutefois, on remarque très vite "La Route de l'écho", soutenue en 2014.

La Route de l'écho

Présentée dans le grand salon du musée de Picardie de février à mai 2016, l'installation en tube néon de 20 mm de diamètre, produisant un blanc froid, crée une sculpture lumineuse monumentale. Elle représente schématiquement, à l'échelle "1", une embarcation dont la vue et le titre évoquent le Radeau de la Méduse, le célèbre tableau de Théodore Géricault, quand bien même un décalage entre la rigueur de son plan 3D orthonormé avec ses côtés droits, ses cercles aboutis, et l'image qu'on se fait d'un radeau de fortune.

En anglais il faut lire "*In search of the Miraculous*" un deuxième titre qui renvoie à la fin tragique de Bas Jan Ader, un artiste conceptuel néerlandais disparu en mer en 1975 à l'âge de trente ans, entre le Massachusetts et l'Irlande, lors d'une performance en solitaire sur un esquif. Il n'est pas fréquent qu'une même œuvre reçoive deux noms différents, mais on comprend que Nathalie Talec en ait éprouvé le besoin puisque sa création s'inspire en même temps de la fin tragique de Bas Jan Ader et de celle des naufragés de la Méduse.

Pour Nathalie Talec, le radeau, outre qu'il permet d'abord un déplacement, est porteur d'une charge émotionnelle, politique et humaine. Il témoigne en effet d'une mise en danger, d'un possible naufrage tout en représentant le support tangible d'un sauvetage espéré.

Les six mètres de longueur et de hauteur de la Route de l'écho placent mentalement l'artiste dans des conditions comparables à celles du naufragé volontaire ou non. Ce dernier, ne sachant pas s'il trouvera un port et l'artiste redoutant son travail incompris, voire mal reçu, avancent l'un comme l'autre avec la peur du naufrage.

Nathalie Talec

Née en 1960 à Paris, Nathalie Talec a étudié les Arts plastiques à l'université Panthéon-Sorbonne de 1979 à 1984, formation prolongée par une thèse de doctorat. Sa démarche créatrice l'a notamment confrontée à l'univers scientifique des explorateurs polaires tels Paul-Émile Victor, Jean Malaurie et Jean-Louis Étienne. Dès lors, il lui est apparu une grande proximité entre la figure de l'explorateur et le personnage de l'artiste. Entre simulation et fascination, elle finit par s'identifier aux explorateurs contemporains jusqu'à réaliser des films d'expédition fictive.

Elle développe une œuvre multiple (photographies, vidéos, installations, peintures, dessins, performances...) et aborde toujours l'art comme un récit d'aventure, un scénario à adapter, une partition à écrire, une expérience radicale à partager.

Dans le cadre du 1 % artistique, Nathalie Talec a plus particulièrement dessiné la sculpture qui orne un angle du nouveau siège de l'IGN au croisement de la rue de Paris et du boulevard Pasteur à Saint-Mandé, le bâtiment qui accueille aussi le bureau de l'AFT au rez-de-sol. Nommée *Earth Drop*, l'installation, en acier inox, à la forme d'un chapelet de gouttes d'eau, la ressource indispensable à la vie. La première goutte représente la Terre et esquisse la carte de l'hémisphère sud. Les gouttes suivantes, de volume inégal, tombent depuis le dernier étage alignées sur la même verticale. L'ensemble symbolise trois éléments : la terre des continents pour l'IGN, l'eau de la mer pour le SHOM et l'air pour Météo France, les deux derniers établissements publics étant maintenant regroupés au siège de l'IGN.



© Yvette Velay

Earth Drop

S'il a été observé un possible déficit d'"Art et géométrie" dans la sélection de la commission mécénat, on remarque en revanche le nouveau logo accompagnant le changement de nom de la fondation, car il annule la critique. En effet, ce logo pourrait presque mériter une rubrique à lui tout seul. Jugez-en : dans un carré on y trouve des rectangles, des parallélogrammes à pans coupés ou ajoutés, des aplats aux couleurs surprenantes jusqu'à l'insertion des lettres "FA" du sigle ! Quoiqu'il en soit, toutes les



œuvres philanthropiques de la fondation méritent l'admiration et la reconnaissance des artistes. ●



■ La carte de France Histoire & techniques

Jean-Luc ARNAUD

Pour connaître, et selon le cas, défendre, aménager, exploiter ou soumettre un territoire, la carte constitue un outil incomparable. Œuvre de haute précision, son établissement a toujours mobilisé les techniques les plus avancées pour réunir des informations précieuses, voire confidentielles, longtemps réservées aux souverains, diplomates et officiers. Cet ouvrage, dont le point de départ est la carte du Royaume de France dressée au milieu du XVIII^e siècle par l'astronome Cassini, présente l'intégralité des différentes séries cartographiques produites depuis lors ainsi que leurs nombreuses déclinaisons thématiques. Technique après technique – de relevé, d'impression, de colorisation, de découpage, de pliage... –, contenu après contenu – topographie, fortifications, voies de communication, géologie, hydrographie, sentiers de randonnée... –, ce sont ainsi deux siècles qui défilent, animés par un souci constant d'actualisation et d'enrichissement des données. Forte d'un savoir-faire exceptionnel, la France dispose aujourd'hui d'une des plus belles collections de cartes au monde, dont certaines sont de véritables œuvres d'art appelant au voyage et à la rêverie. Cette somme historique, à l'objet inédit, révèle avant tout un ensemble patrimonial remarquable dont la carte est en elle-même le trésor.

Jean-Luc Arnaud est architecte et historien de la période contemporaine. Son travail se situe au carrefour de l'histoire et de la géographie. Après avoir dirigé les observatoires urbains du Caire et de Beyrouth, il a consacré ses premières recherches aux villes du Proche-Orient (Le Caire, Istanbul, Damas, Sanaa...). Il s'est ensuite orienté vers l'histoire de la cartographie, fondant au début des années deux mille CartoMundi, une plateforme en ligne dédiée à la valorisation du patrimoine cartographique. Auteur de plusieurs ouvrages et d'une centaine d'articles, il préside l'association Le monde à la carte.

Présentation de Bernard Bèzes
(ancien responsable de la cartothèque IGN de 2008 à 2013)

Jean-Luc Arnaud, directeur de recherche au CNRS, créateur de la plateforme en ligne CartoMundi pour la valorisation du patrimoine cartographique, a exploré pendant des années les trois sous-sols de la cartothèque de l'IGN à Saint-Mandé. Dans une course de longue haleine digne du Tour de France, il a réussi l'exploit d'en extraire la substantifique moelle et d'en éditer une synthèse magistrale avant que ces collections patrimoniales ne soient dispersées aux Archives nationales, au Service historique de la défense ou à IGN-Sologne...

Il nous livre ainsi, avec les éditions Parenthèses, un opus grand format de 444 pages (2,35 kg) magnifiquement illustré grâce aux fichiers issus de la dématérialisation IGN et à sa propre reconstitution en numérique de plus d'une centaine de tableaux d'assemblage couvrant trois siècles de séries cartographiques à toutes les échelles et sur toutes les thématiques. En bon historien, il nous raconte la passionnante histoire de la cartographie française depuis la saga des Cassini jusqu'à aujourd'hui en passant par l'état-major. Bref, tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la cartographie française sans jamais oser le demander.

► ÉDITIONS PARENTHÈSES

56 € - 448 pages, 630 reproductions, 2022
ISBN : 978-2-86364-330-3



■ Astronomie des dames

Jérôme de Lalande

Présentation par Jean-René Roy

Portrait exceptionnel de l'astronomie à la fin du XVIII^e siècle, *Astronomie des dames* de Jérôme de Lalande est un pont didactique entre le manuel d'introduction à l'astronomie et le livre de vulgarisation. C'est le regard perspicace et universel d'un scientifique du siècle des Lumières. *Astronomie des dames* est un rappel des femmes qui ont marqué l'histoire de l'astronomie. L'ouvrage présent reprend et réactualise le petit ouvrage. Avec ses 14 éditions, dont plusieurs posthumes, et des traductions en italien et en russe,

le livre s'est avéré un succès de librairie remarquable.

Par sa rigueur et par l'absence de simplification à outrance, Jérôme de Lalande se révèle un enseignant efficace et enthousiaste. On évite les hypothèses trop incertaines. Il accorde la plus grande importance à l'observation suivie d'une analyse rigoureuse ; une interprétation fiable des faits peut alors en découler. Dans cette édition critique, l'auteur présente 17 femmes astronomes ayant vécu au V^e siècle et du XVII^e au XXI^e siècle. Ces femmes sont généralement demeurées des inconnues pour le public ; certaines du passé sont d'ailleurs peu connues des scientifiques eux-mêmes. Les vies et les carrières de 17 de ces dames astronomes du V^e siècle à aujourd'hui sont mises en lumière par des portraits éclairants de leurs contributions et du contexte social où elles évoluaient.

L'auteur, Jean-René Roy est astrophysicien. Il a travaillé à l'Université Laval, à l'Observatoire international Gemini (Hawaii et Chili), à la National Science Foundation (États-Unis) et au Space Telescope Science Institute (États-Unis). Il a publié récemment *Trente images qui ont révélé l'univers* (PUL, 2019), *Georges Lemaître - La naissance du big bang* (PUL, 2020) et *La Terre dans l'espace* (PUL et Hermann, 2021).

► HERMANN - PRESSES UNIVERSITAIRES DE LAVAL / COLLECTION RÉMINISCENCES
29 € - 322 pages
ISBN : 979 1 0370 1728A

■ Votre parole vaut de l'or

Amélie Blanckaert

Un livre gourmand, instructif, distrayant et un brin décalé qui puise dans trois mille ans d'art oratoire et dans les coulisses des grands orateurs pour livrer des secrets d'éloquence comme on entrerait dans la cuisine de chefs. Un vade-mecum vif et plaisant pour être plus éloquent au quotidien.

"J'ai peur de parler en public"

Qui n'a jamais ressenti cette panique de ne pas trouver les mots ? Qui n'a jamais bafouillé lors d'un premier rendez-vous ? Qui n'a jamais perdu sa voix face à des émotions trop fortes ? Et si ce n'était plus une fatalité, mais un nouvel atout à saisir ?

Oui, notre parole vaut de l'or !

Oui, chacun d'entre nous a les moyens de trouver sa voix.

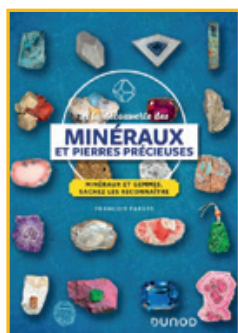
Oui, l'éloquence est accessible à tous.

Les peurs, les freins, les complexes peuvent se maîtriser et vous allez les maîtriser ! L'auteur nous initie aux 25 règles élémentaires, simples et efficaces qui transformeront notre quotidien et nous garantiront un charisme oratoire.



Amélie Blanckaert, maître de conférences en rhétorique à Sciences Po et normalienne agrégée, a enseigné l'art oratoire à Cambridge et à la Sorbonne. Présidente de l'agence Bureau 121, elle accompagne les dirigeants des plus grandes entreprises dans leur stratégie de communication.

► **PLON**
18 € - 262 pages
ISBN : 9782259 310536



■ À la découverte des minéraux et pierres précieuses

Minéraux et gemmes, sachez les reconnaître

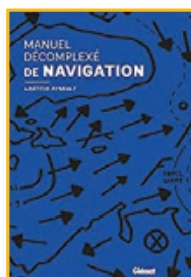
François Farges

Pourquoi l'or est-il si rare ? D'où vient la couleur des grenats ? Qu'est-ce qu'un biominéral ? Le monde des minéraux raconte une histoire passionnante, celle de la Terre, ainsi que des civilisations qui ont façonné des gemmes. Des propriétés de la turquoise à la symbolique des jades, ce guide riche de plus de six cents photos révèle pourquoi les minéraux sont si utiles et les pierres précieuses si convoitées. Il donne les clés pour identifier les espèces et débiter une collection.

Cette nouvelle édition est enrichie de nouvelles merveilles minérales comme la Brazilianite, l'Eucrase, les Impactites, la Lazulite, les Météorites, la Pétalite (et Pollucite), le Phénacite et les Septaria.

François Farges est professeur en minéralogie au Muséum national d'histoire naturelle et membre honoraire de l'Institut universitaire de France.

► **DUNOD**
18 € - 224 pages - EAN : 9782100837601



■ Manuel décomplexé de navigation

Laëtitia Ayrault

Livre de bord, carnet de voyage, recueil de "choses" vues et vécues, ce manuel de navigation est tout cela à la fois !

Voilà un manuel qui se trouve aux antipodes du guide savant ou de l'encyclopédie. Il est le fruit décomplexé d'une découverte de la navigation par une jeune femme, qui a le bon goût de savoir tout à la fois dessiner, photographier et raconter. Ce livre est une invitation à sauter sur le pont d'un bateau, hisser les voiles et lever l'ancre vers de nouveaux horizons.

Illustratrice, autrice et musicienne, Laëtitia Ayrault a publié en 2019 une BD documentaire. Sur l'autre Rive, aux éditions Des Ronds Dans l'O, sous le pseudonyme Isatis. À cette occasion, de nombreuses expositions et interventions dans des institutions culturelles ont eu lieu. Elle a fait plusieurs résidences d'artiste. En tant que musicienne, elle prépare actuellement un album et donne des concerts régulièrement.

► **GLÉNAT**
15 € - 96 pages
ISBN : 9 782344 052839

■ À la découverte du ciel

Planètes, étoiles, constellations, sachez les repérer

Emmanuel Beaudoin

Comment voir les pôles glacés de Mars ?

Où et quand observer le rayon vert ?

Qu'est-ce qu'une Lune gibbeuse ?

Ce guide de terrain s'adresse aux curieux qui, lors d'une soirée, veulent redécouvrir la magie de la voûte céleste. Illustré par de très nombreuses photos et cartes, il donne les conseils utiles pour préparer ses observations et indique où pointer son instrument pour admirer les plus beaux objets du ciel.

Dans cette nouvelle édition, les éphémérides ont été actualisées, de nouvelles images ont été ajoutées (comète Néowise, oppositions de Mars, phases de Vénus...) ainsi qu'un carnet technique pour aider à régler son télescope.



Emmanuel Beaudoin est enseignant-chercheur à l'université Paris Sud. Il observe et photographie le ciel depuis plus de trente ans. Auteur de plusieurs ouvrages de vulgarisation sur l'astronomie, il collabore régulièrement à la revue Ciel & Espace, dans laquelle il a publié plus de deux cents articles.

► **DUNOD**
18 € - 200 pages
EAN : 978210083750



■ À la découverte des sentiers de la géologie

Plus de 200 sites naturels à découvrir

Alain Foucault

Où peut-on voir les plus belles coulées de basalte ? Le cap Blanc-Nez est-il blanc ? Pourquoi parle-t-on de colorado provençal ? Au gré de nos promenades, nous découvrirons des paysages témoins d'une prodigieuse épopée, celle de la Terre. Ce guide vous emmène à la découverte de deux cents sites naturels remarquables de nos régions, tous faciles d'accès. Illustré par plus de 700 photos, il vous donne toutes les clés pour identifier les minéraux, les roches et les fossiles les plus communs que vous rencontrerez pendant vos excursions.

Dans cette nouvelle édition, des QR Codes permettent de retrouver rapidement les sites.

Alain Foucault est professeur honoraire du Muséum national d'histoire naturelle et passionné de géologie. Il est l'auteur ou le co-auteur de nombreux ouvrages pour tous les publics.

► **DUNOD**
18 € - 208 pages
EAN : 978 2 100 837496



■ Au cœur de Notre-Dame Journal d'une renaissance

Monseigneur Patrick Chauvet

Trois ans après l'incendie qui a ravagé Notre-Dame, Mgr Chauvet, recteur de la cathédrale, nous invite à partager son quotidien au cœur d'un chantier historique entre travaux, prières, relations politiques et diplomatiques. Un témoignage inédit de premier plan.

"Comme chacun d'entre vous, j'ai été profondément blessé par l'incendie de Notre-Dame et il faut du temps pour que la plaie cicatrise. Je vous avoue qu'il m'est toujours difficile de parler de l'incendie et je ne regarde pas les films sur la cathédrale pour éviter des larmes. Si j'ai accepté de tourner des reportages, c'est bien pour Notre-Dame. D'ailleurs, ma mission n'est-elle pas de devenir un des nombreux messagers de ce haut lieu ? Par la force des choses, je suis en contact avec de très nombreux journalistes français et étrangers. Quel message essentiel dois-je faire passer ? L'espérance ! C'est d'ailleurs ce qui me fait vivre. Je suis touché par toutes les marques de reconnaissance. La cathédrale a marqué les Français ; que de fois ai-je entendu : "Comment va Notre-Dame ?"... Elle va bien, je vous remercie ! J'ajoute qu'il faut de la patience, mais le temps passe vite. Déjà plus de trois ans ! Ce livre veut retracer ces trois années à partir de différents thèmes comme l'Académie, la Vierge, le parvis, la pandémie, l'avancement des travaux, les relations politiques et diplomatiques. Chaque chapitre traitera d'une question de fond sans oublier les anecdotes qui sont mon quotidien".

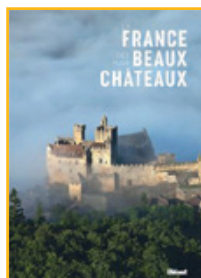
Mgr Patrick Chauvet, recteur-archiprêtre de la cathédrale Notre-Dame de Paris, est l'auteur de nombreux livres. Il est expert auprès du Saint-Siège à l'UNESCO pour les questions éducatives.

► **PLON**

18 € - 160 pages - ISBN : 2259311407

Répertoire des annonceurs - n° 172

CERCLE GÉO	11
ESRI [LIVE+] SIG	26
FIG SAINT-DIÉ	2° de couv.
LEICA GEOSYSTEMS	2
REIS STOLZEL	10
RIEGL	3° de couv.



■ La France des plus beaux châteaux - Collectif Les châteaux de France, un patrimoine d'exception

Les châteaux de France, symboles de richesse et de pouvoir, jalonnent notre Histoire et représentent un patrimoine architectural unique. La France compte plusieurs dizaines de milliers de châteaux ; cet ouvrage superbement illustré propose de partir à la découverte de monuments représentatifs de la diversité des régions, comme Versailles, Chambord, Chenonceau, Haut-Koenigsbourg, Peyreperouse, Beynac, Château-Gaillard, Vaux-le-Vicomte, Montségur, Cormatin, Brissac, Castelnaud, Cheverny, Fontainebleau, ou encore Quiribus. Châteaux royaux, forteresses perchées, châteaux d'artistes et de personnages illustres, somptueuses demeures familiales, ces 50 sites d'exception s'offrent à vous et promettent des moments riches en émotions ! Pour chaque château, présentation historique et patrimoine architectural revisité. Châteaux royaux, forteresses médiévales, châteaux d'artistes et de personnages illustres...

► **GLÉNAT**

35 € - 208 pages

ISBN : 97 82344 052846

■ Infrastructures de données spatiales

Évaluations économiques : concepts, méthodes et retours d'expérience

**Hélène Rey-Valette - Chadoy Jabbour
Pierre Maurel - Jean-Michel Salles**

Les concepts et méthodes opérationnelles pour évaluer les effets et la valeur des infrastructures des données spatiales (IDS) d'un point de vue socio-économique

Les demandes et les usages des données spatiales satellitaires se développent et se diversifient de façon importante, en lien avec la précision, la fréquence des prises de vue et la taille des images. Ainsi, il convient de comprendre et de rendre compte des impacts de cette production croissante sur l'organisation et la rationalisation des



structures qui les utilisent, mais aussi sur l'efficacité et la transparence des politiques publiques mobilisant ces informations. Les infrastructures de données spatiales (IDS) représentent des dispositifs essentiels : elles facilitent l'accès aux images (acquisition, traitement, archivage), ainsi que les processus de mutualisation et d'innovations méthodologiques. Elles constituent des biens publics informationnels et mobilisent des moyens croissants qui nécessitent de questionner les types de "modèles économiques" dont elles relèvent. Ce guide pédagogique et opérationnel s'adresse à l'ensemble des acteurs liés à la production ou à usage des informations spatiales. Il permet une lecture à la carte en fonction des centres d'intérêt et des disciplines, à travers de multiples encadrés et exemples. Il présente les concepts et les méthodes d'évaluation économique appliqués à l'information spatiale, en détaillant trois types d'approches selon que l'on veut estimer la valeur de l'information spatiale, mesurer les retombées économiques d'une IDS ou caractériser ses impacts par des approches multicritères.

Hélène Rey-Valette est maître de conférences en Économie à l'université de Montpellier, spécialisée dans les problématiques du gouvernement et d'évaluation des politiques publiques. Elle travaille avec Géosud depuis 2015.

Chadoy Jabbour est docteur en sciences économiques et chercheur au CNRS. Ses recherches portent sur les nouveaux modèles économiques de la donnée et des plateformes numériques.

Pierre Maurel est ingénieur des Ponts, des Eaux et Forêts à INRAE, directeur de l'UMR TETIS à Montpellier et coordinateur du projet Géosud. Ses recherches portent sur les usages et impacts de l'information géospatiale.

Jean-Michel Salles est directeur de recherche CNRS au Centre d'économie de l'environnement de Montpellier. Ses recherches portent principalement sur l'évaluation et la gestion des écosystèmes et de la biodiversité.

► **ÉDITIONS QUAE**

25 € - 120 pages - EAN : 9782759235155

Une problématique émergente dans celle de la formalisation du foncier : l'agriculture urbaine

■ Claire GALPIN

Selon la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), le rendement de l'agriculture urbaine est potentiellement 15 fois supérieur à celui des zones rurales. Une surface de culture d'un mètre carré permet de produire 20 kg de nourriture par an. C'est donc un secteur qui intéresse beaucoup les projets de développement urbain dans les villes africaines, en particulier dans les villes secondaires.



Vue de Kinshasa depuis Brazzaville

Depuis longtemps la mise en valeur des bas-fonds, petites vallées à fond plat que l'on rencontre fréquemment en région intertropicale, représente un enjeu considérable pour le développement de l'agriculture en Afrique. Les bas-fonds peuvent accueillir différents types de culture et se prêter à des aménagements. Leur utilisation a jusque maintenant soulevé de nombreuses questions qui relèvent des disciplines en relation avec le développement rural : sociologie, économie, agronomie dans son sens le plus large, hydrologie, écologie, mais également en gestion foncière. Dans de nombreuses villes africaines situées au bord d'un fleuve ou d'un cours d'eau, la question est au cœur du développement urbain. L'agriculture urbaine désigne les activités de production agricole et d'élevage dans les villes ou à proximité de celles-ci. Mais comment fonctionne ce type d'agriculture ? Quels sont ses avantages, ses inconvénients, son rendement ? Voici quelques pistes de réponses.

L'agriculture urbaine se présente sous la forme de zones de maraîchage et d'élevage dans les villes et en périphérie des villes. Les espaces agricoles peuvent être aménagés directement sur le sol, dans les jardins résidentiels et communautaires et, maintenant, sur les toits des bâtiments. Les fruits et légumes sont cultivés en plein air ou sous serre. L'agriculture urbaine utilise différentes méthodes de production. La culture en pleine terre et l'aquaponie (culture en radeaux et bassins) un peu partout dans le monde, mais également des méthodes innovantes comme l'hydroponie (les

végétaux baignent dans un liquide nutritif), la culture intérieure à la lumière artificielle dans les fermes urbaines ou en bacs pour partager la récolte.

L'agriculture urbaine offre de nombreux avantages dont le principal est la production en cycle court. Après avoir été récoltés, les fruits et légumes sont vendus sur des marchés à proximité ou directement au consommateur. Cela permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées au transport, mais aussi d'économiser l'énergie nécessaire au stockage. L'agriculture urbaine permet en outre de valoriser les déchets organiques produits dans les villes tout en favorisant la biodiversité. Dans les grandes villes du Nord, les serres situées sur les toits aident à lutter contre les îlots de chaleur et optimisent le confort thermique des bâtiments. Les fermes urbaines jouent un rôle social important en créant des emplois locaux et en tissant des liens entre les citoyens et le monde rural. Elles contribuent à améliorer la santé des habitants via la consommation de produits durables.

Cependant, de nombreux projets de développement urbain dans les grandes villes africaines situées le long de fleuves et rivières prennent en compte cette problématique pour favoriser la production maraîchère de proximité et protéger les milieux humides au cœur de la ville. C'est le cas de la commune de N'Djili, située dans la ville province Kinshasa. Elle est l'objet d'une intervention au sein du projet Kin Elenda (Kinshasa résiliente en Lingala). Le projet est mis en œuvre dans une zone

de forte densité de population et avec un faible niveau d'aménagement sur divers types d'occupation spatiale : des terres marécageuses destinées à l'agriculture et au maraîchage urbain, mais envahies par des constructions spontanées, des pentes à propension érosives déjà occupées par des habitations, des espaces aménagés depuis l'époque coloniale, mais dont les infrastructures sont fortement dégradées.

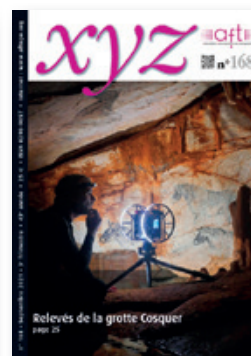
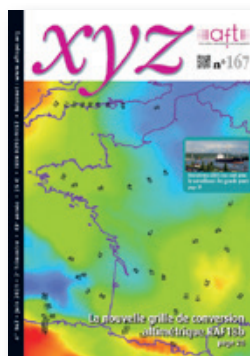
Avec un périmètre affecté au maraîchage depuis 1953, l'agriculture urbaine est une catégorie spécifique de la commune. À l'origine, les zones humides en milieu urbain, comme en milieu rural, étaient réservées à l'agriculture, avec un droit d'usage collectif. Dans la ville de Kinshasa, des associations de maraîchers urbains ont progressivement vu le jour en vue, d'une part, d'organiser l'exploitation de ces tourbières et autres espaces agricoles urbains et périurbains, et, d'autre part, de défendre ces espaces contre un éventuel envahissement sans entamer une démarche de sécurisation de leurs droits d'usage. Encore aujourd'hui, la culture maraîchère urbaine et périurbaine crée des opportunités économiques pour des familles en insécurité alimentaire, tout en fournissant une partie des produits du maraîchage à la ville de Kinshasa. Le volet foncier a pour objectif de sécuriser l'occupation foncière. Il appuiera l'expérimentation de la généralisation de la fiche parcellaire pour délivrer rapidement et économiquement un document de formalisation des droits fonciers en milieu urbain. ●



Bulletin d'adhésion 2022

à retourner à l'AFT par courrier ou courriel sauf inscription par Internet

*Les adhésions s'entendent par année civile entière et donnent droit au service de la revue XYZ (4 numéros par an).
Les démissions sont à adresser à l'AFT et prennent effet en fin de l'année en cours.*



☐ Je souhaite adhérer à l'Association francophone de topographie.

- ☐ technicien ou enseignant, si règlement sur compte personnel,
ou étudiant, ou chômeur, ou retraité **55 €**
- ☐ cadre ou personne morale, et pour tout règlement émanant d'une administration
ou d'une entreprise **90 €**

**Ces tarifs comprennent l'abonnement à la revue XYZ au tarif préférentiel de 45 €
et sont valables pour la France et pour l'étranger**

☐ Je vous adresse :

- ☐ soit un bon de commande afin de recevoir une facture au préalable
- ☐ soit le règlement de : _____ €
- ☐ par chèque à l'ordre de l'AFT, accompagné de ce bulletin dûment rempli
- ☐ par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR
sans omettre d'adresser le bulletin dûment rempli par courrier ou courriel
- ☐ par carte bancaire, via notre site internet www.aftopo.org
(seulement depuis un pays à monnaie transférable)
- ☐ je désire recevoir un reçu après règlement

M/Mme Nom : _____ Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal : [][][][][][] Ville : _____ Pays : _____

Tél. : [][][][][][][][][][] Portable : [][][][][][][][][][]

Courriel : _____

Date / / Signature

RIEGL WAVEFORM LIDAR

LA TECHNOLOGIE POUR LiDAR-PAR-DRONE

DISTRIBUTED, SUPPORTED AND SERVICED BY
RiCOPTER[®]
... A RIEGL[®] COMPANY

miniVUX-1 / 2 / 3 UAV
NEW miniVUX-1 LR

1,6 kg
360° FOV
champ de vision
100 / 200 kHz
fréquence de mesure
Ultra léger

3,5 kg
330° FOV
champ de vision
500 / 750 kHz
fréquence de mesure
Capteur très performant pour des relevés de zones étendues

2,0 kg
100° FOV
champ de vision
1,5 MHz
fréquence de mesure
NFB (Nadir/Forward/Backward) Scanning avec un champ de vision spécialement adapté pour assurer l'acquisition fiable de données dans des situations complexes

4,1 kg
75° FOV
champ de vision
1,5 MHz
fréquence de mesure
Scanner polyvalent pour l'utilisation avec des drones à haute vitesse, des hélicoptères ou des avions avec équipage à bord

12 kg
40° FOV
champ de vision (scan elliptic)
200 kHz
fréquence de mesure
Pénétration de l'eau jusqu'à 2 Secchi de profondeur
Pour des applications LiDAR topo-bathymétriques
Cartographie efficace et de haute résolution du littoral ou des eaux peu profondes

miniVUX-1 / 2 / 3 UAV
NEW miniVUX-1 LR

NEW VUX-1 UAV²²
NEW VUX-1 LR²²

VUX-120

VUX-240

VQ-840-G

Pour une utilisation sur des drones à voilure tournante de petite et moyenne taille lors de vols à basse altitude

Exemple d'application : exploitation minière, topographie, surveillance des glissements de terrain et des avalanches

Pour une utilisation sur des drones à voilure fixe

Exemple d'application : cartographie de corridors, modélisation urbaine

Pour une utilisation sur des drones plus grands ou des hélicoptères, utilisation à altitude de vol élevée

Exemple d'application : enregistrement de données cartographiques haute résolution



Découvrez l'ensemble des capteurs
et systèmes RIEGL LiDAR
www.riegl.com





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

PROGRAMME

9h00-9h30	Ouverture du Forum et café de bienvenue
9h30-9h45	Accueil des participants par le directeur délégué aux formations et la présidente de l'AFT
9h45-10h10	"Solution Cloud collaborative pour les chantiers", Julien HOUPIN et François BISARO, Leica Geosystems
10h10-10h35	"Evolution du métier de géomètre au sein du secteur du BTP, guidage, numérisation, BIM", Nicolas DESCHATRETTE, NGE
10h35-11h05	La parole est aux exposants
11h05-12h30	Visite des stands
12h30-13h30	Pause repas

13h30-15h05	Café sur les stands et visite
15h05-15h35	La parole est aux exposants
15h35-16h00	"Le suivi de chantier TP via le Cloud", Michel GREUT et Steve LAVILLUNIÈRE, Topcon
16h00-16h25	"Les nouvelles technologies au service de la détection et la visualisation des réseaux enterrés", Xavier LUCIE et Romain LANDRIEU, Ecartyp Groupe Fondasol
16h25-16h30	Le partenaire du prix de l'AFT, Leica Geosystems
16h30-17h00	La remise du prix de l'AFT et les exposés
17h00	Cocktail de clôture

CONTACTS ET RENSEIGNEMENTS :

POUR LES EXPOSANTS communication@aftopo.org

POUR LES PARTICIPANTS forum@aftopo.org

billetterie 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