

Comparaison des images  
satellite et aériennes dans  
le domaine de la détection  
page 36

## Forum de la topographie 2021 à Égletons page 14



# Lexique GNSS pour le positionnement

Commission GEOPOS  
Groupe de travail GNSS



Édité par l'Association francophone de topographie (AFT)

**COMMANDEZ LE "LEXIQUE GNSS POUR LE POSITIONNEMENT"**

**AU PRIX DE 10,00 €**

**21 x 29,7 cm, 32 pages - frais de port inclus (France)**

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

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

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

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

Tél. :           Fax :

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

Date

Signature

**Bulletin de commande à retourner accompagné d'un chèque à l'Association francophone de topographie**

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

**Achat également sur Internet : [www.aftopo.org](http://www.aftopo.org) - Téléchargement gratuit en format PDF.**

# SOMMAIRE

## Directeur des publications

Tania Landes  
Maître de conférences  
INSA de Strasbourg

## Directeur des publications adjoint

Flavien Viguière  
Ingénieur topographe

## Rédaction et administration XYZ

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

## Rédacteur en chef

Bernard Flacelière  
Ingénieur topographe

## Rédacteur en chef adjoint

Flavien Viguière

## Comité de rédaction

André Bailly  
Ingénieur géomètre ETP  
Françoise Duquenne  
Ingénieur général des Ponts honoraire  
Stéphane Durand  
Maître de conférences à l'ESGT  
Ghyslain Ferré  
Enseignant en topographie  
Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités  
INSA de Strasbourg  
Michel Kasser  
Professeur des universités  
Jean-Pierre Maillard  
Géomètre-expert foncier  
Emmanuel Natchitz  
Ingénieur géomètre  
Elodie Sissler  
Enseignant en topographie et foncier

## Publicité

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

## Conception et maquette

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

1<sup>er</sup> trimestre 2022 ISSN 0290-9057

Tirage de ce numéro : 800 ex

## Abonnement pour les agences

Contactez info@aftopo.org pour tarifs

## Adhésion à l'AFT comportant

l'abonnement et le téléchargement

gratuit du PDF. Visitez

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

Pour adhérer

## Vente au numéro

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

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

L'AFT n'est pas responsable des opinions

émises dans les conférences qu'elle

organise ou les articles qu'elle publie.

Tous droits de reproduction ou d'adaptation strictement réservés.

Couverture : Une partie du salon des exposants au forum de la topographie à Égletons. © AFT



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

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres)

Membre de la FGF (Fédération des géomètres francophones)

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

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

## Éditorial

## Infotopo

> Les informations de la profession ..... 4

## Manifestation

> Retour sur l'édition 2021 des Journées de la topographie de l'INSA Strasbourg ..... 7

> La SFPT, une société savante soixantenaire  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 8

> IGN, changer d'échelle !  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 10

> La société de géographie est bicentenaire  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 12

> Forum de la topographie 2021 à Égletons, la détection et la localisation des réseaux enterrés  
Jean-Pierre MAILLARD - Bernard FLACELIERE ..... 14

## La vie de la profession

> La Base adresse nationale vers un véritable commun

Elise LADURELLE TIKRY - Loïc REBOURS - Romain BUCHAUT - Pierre NGUYEN TRONG - Carole LECOMTE  
Jérôme BOUTET - Azad POLAT ..... 17

> Le Conseil national de l'information géographique (CNIG) se renouvelle pour renforcer la gouvernance de la donnée géolocalisée au service des transitions écologique et numérique  
Bertrand MONTHUBERT - Pierre LAULIER ..... 20

## Géodésie

> Mise à jour du registre de l'EPSG suite aux évolutions du RGF93  
Thierry GATTACCEA ..... 23

> Lettre ouverte pour une mutualisation des moyens pour le développement d'un logiciel de compensation et d'auscultation  
Thomas TOUZÉ ..... 27

> Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : nouveau modèle dans le cas d'une stratification verticale de la célérité en Terre localement sphérique  
Thomas TOUZÉ ..... 28

## Télé-détection

> Comparaison des images satellite et aériennes dans le domaine de la détection d'obstacles à la navigation aérienne et de leur mise à jour  
Olivier DE JOINVILLE - Chloé MARCON - Moumina Idriss DAOUD ..... 36

## Compensation

> Illustration par un exemple pratique de l'utilisation de méthodes d'ajustement robuste en topographie  
Stéphane DURAND ..... 45

## Cartographie



> Développement d'une solution de numérisation 3D temps réel via smartphone  
Raphaël HAENEL ..... 55

## Patrimoine

> Évaluation des apports de l'apprentissage profond au sein d'un service dédié à la numérisation du patrimoine  
Maxime MERIZETTE ..... 61

## Histoire

> La Base de Plouescat, un maillon essentiel de la cartographie française  
Une recherche personnelle qui débouche sur une autre découverte  
Geneviève ROUSSEAU ..... 66

## Art et géométrie

> Jacob + MacFarlane : les Turbulences  
Mathias Goeritz : écho zen  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 72

## Ouvrages

André BAILLY ..... 74

## GSF

> Comment rester sans frontières dans un monde où elles se ferment et où les règles pour entrer et sortir demandent une expertise ?  
Claire GALPIN ..... 76

Pour la recherche de nos annonceurs, consulter la p. 75

PROCHAIN XYZ - n° 171  
Évaluation de la qualité de modèles 3D  
issus de nuages de points



# ÉTUDE D'UN SCANNER DYNAMIQUE AU SEIN D'UN CABINET DE GÉOMÈTRES

Retour d'expérience avec le cabinet  
GEODIS sur l'utilisation du BLK2GO  
lors de relevés d'intérieur



Lire l'article : <https://qrco.de/LeicaBLK2GO>

## Leica BLK2GO

Technologie de scanner dynamique  
la plus avancée au monde



Leica Geosystems SAS  
[www.leica-geosystems.fr](http://www.leica-geosystems.fr)  
Contactez-nous : [info.france@leica-geosystems.fr](mailto:info.france@leica-geosystems.fr)

- when it has to be **right**

**Leica**  
Geosystems



## Postapocalypse

Au collège et au lycée, j'écumais la bibliothèque – maintenant on dit le CDI –, mais je délaissais les ouvrages de montagne et alpinisme légués par proviseurs et enseignants portés sur le sujet – nous étions dans les Alpes-Maritimes –, en explorant la science-fiction. Pour compléter les voyages dans l'espace, j'en vivais l'actualité dans les années 60, le rayon postapocalyptique proposait en tête de gondole *Ravage* de René Barjavel, suivi par *Malevil* de Robert Merle, puis par *La Planète des singes* de Pierre Boulle. *Le Fléau* de Stephen King aurait pu y figurer, mais il paraîtra une quinzaine d'années plus tard. Il a été récemment remis au goût du jour suite à son thème accrochant à l'actualité : une super pandémie, vous voyez. “*Il ne reste qu'à survivre quand tout s'est écroulé !*” disent les auteurs. C'est la leçon de la littérature postapocalyptique.

Sans vouloir me comparer aux personnages de ces récits, je ressens un parfum de déjà-vu. La lecture des éditoriaux des deux années passées me rappelle les efforts de l'AFT et de la rédaction de XYZ. Pour survivre, nous avons réduit les dépenses de fonctionnement de l'association, les voyages, en tenant des réunions de travail, les conseils d'administration et les assemblées générales en mode distanciel, diminué le tirage et le nombre de pages de la revue, remplacé les exemplaires papier destinés aux écoles par l'édition numérique. Faire le dos rond a été bénéfique, au troisième report, le forum de mars 2020 a enfin pu avoir lieu en novembre 2021 à Égletons et de même, la revue XYZ a pu passer le cap grâce aux contributions de ses auteurs et à la vigilance de son comité de rédaction.

Après deux numéros réduits à 56 pages, votre revue offre 76 pages qui vont certainement satisfaire lectrices et lecteurs. La rubrique relative aux manifestations est largement fournie, c'est la preuve que “les affaires reprennent”, que les organisateurs osent bousculer l'attentisme tout en restant prudents. Les pages vie de la profession sont témoins de la vitalité des actions menées par les organismes professionnels. Concernant la géodésie, les professionnels français qui manipulent les codes EPSG dans leurs logiciels pourront les mettre à jour avec les actuelles versions du RGF93, tandis qu'une solide remise à niveau des notions théoriques de la réfraction nous est offerte, avec promesse d'un prochain article appliqué à la bathymétrie, au LiDAR et voire même au LiDAR bathymétrique. Une lettre ouverte est dédiée à la mutualisation (francophone) d'un logiciel de compensation et d'auscultation, et ça tombe bien, vous aurez aussi un rappel sur les méthodes d'ajustement robuste, de meilleurs moindres carrés capables d'identifier les fautes. Mais pourquoi n'avions-nous pas appris tout ça à l'école ? Suivent les articles variés qui ont pour thèmes la télédétection, puis la cartographie et le patrimoine pour les lauréats du prix de l'AFT et un petit air breton pour l'histoire. Le lecteur découvrira enfin les fidèles rubriques art et géométrie, ouvrages et géomètre sans frontière.

Actualité associative : vous avez reçu le 15 janvier, avec les vœux de notre présidente, un appel à candidature pour les prochaines élections au conseil, avec date limite du 15 mars. Vous recevrez en avril les instructions de vote, vous voterez fin mai électroniquement par Internet ou par courrier pour les très rares adhérents sans adresse courriel. Vous serez également convoqués à l'assemblée générale en mode mixte, en présentiel ou en visioconférence, vers mi-juin. Tout est fait pour faciliter votre participation à la vie de l'AFT, soyez au rendez-vous.

Une colonne (en page 26) est offerte à l'association topo sans frontière, en route pour Madagascar. Elle cherche partenaires ou donateurs. Vous les anciens, prenez connaissance de leur projet, encouragez la jeune génération de l'ESGT et participez.

**Bernard Flacelière, vice-président, rédacteur en chef.**



## ■ Suivi des impacts du changement climatique dans les parcs naturels régionaux grâce aux satellites



Le 14 janvier 2022 a eu lieu le lancement du projet ADOPT (Applications des données d'observation de la Terre pour les parcs naturels régionaux et leurs territoires) par SpatialistESS et soutenu par sept PNR (parcs naturels régionaux) de la région Occitanie. Ce projet vise à développer un service de fourniture de cartes pluriannuelles d'occupation du sol et d'indicateurs du fonctionnement des écosystèmes pour contribuer, à l'échelle des territoires des PNR occitans, à l'identification des impacts du changement climatique, l'anticipation de ces impacts et l'adaptation. Les experts en technologie spatiale des sociétés E2L, Idgeo et La TeleScop, réunis sous le collectif SpatialistESS, proposent d'exploiter les données de satellites d'observation de la Terre afin d'établir un diagnostic partagé et servir de support aux discussions et aux analyses. Financé par le CNES, l'Office français de la biodiversité et la région Occitanie, ADOPT a été labélisé en janvier 2021 par le *Space Climate Observatory* qui soutient les projets proposant aux acteurs locaux des outils opérationnels permettant de comprendre et modéliser les conséquences du dérèglement climatique sur leur territoire. Le service auquel ADOPT doit aboutir, développé sous la forme de SIG et de WebSIG, pourra être dupliqué sur d'autres PNR et potentiellement sur tout territoire intéressé par les indicateurs des impacts du changement climatique.

## ■ GEOFIT GROUP fait l'acquisition de la société IGO

GEOFIT GROUP a annoncé son entrée au capital d'IGO, leader de la 3D territoriale en France, et devient actionnaire majoritaire de la société qui se positionne comme nouvelle filiale du groupe. GEOFIT GROUP et IGO rassemblent désormais une expertise et un savoir-faire unique couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur du jumeau numérique.



## ■ Un nouveau président pour le CTHS



Le 20 janvier 2022, la commission centrale du Comité des travaux historiques et scientifiques (CTHS) a élu un nouveau président, Philippe Bourdin, professeur d'histoire moderne à l'université Clermont-Auvergne. Philippe Bourdin était jusqu'alors président de la section Histoire des mondes modernes, de la Révolution française et des révolutions, membre de nombreuses sociétés savantes. Il succède à Bruno Laurioux qui a permis, dans un contexte sanitaire difficile, la poursuite de l'activité du Comité et la réalisation de beaux projets.

## ■ Handicap International : des drones pour faciliter le déminage humanitaire



Les mines et restes explosifs de guerre sont des fléaux de nombreuses villes martyres. Avec plus de 100 millions de mines terrestres encore actives dans le monde, le déminage humanitaire reste une nécessité vitale, pour que ces villes martyres puissent enfin se reconstruire. Une des problématiques est de repérer les restes explosifs de guerre sous un amas de gravats au milieu d'une ville détruite par les bombardements. Fin 2019, Handicap International et Mobility Robotics ont présenté pour la première fois une solution pour localiser les mines sous terre à l'aide de drones, munis de caméras infrarouges dans certains environnements. En survolant de vastes zones en un temps très court, il permet de réduire considérablement la durée de ce que les professionnels du déminage appellent "l'enquête non technique". Cette phase correspond à l'étape d'investigation d'un terrain qui sert à déterminer si des mines et des restes explosifs sont potentiellement présents et nécessitent l'intervention de démineurs. C'est dans le cadre du Projet Odyssée2025, financé par la Direction générale Coopération au développement et aide humanitaire du gouvernement belge, que Handicap International a pu tester depuis septembre 2018 l'apport des drones dans ses opérations de déminage. L'expérimentation de cette nouvelle technologie, a été rendue possible grâce à la collaboration avec l'Union européenne et grâce à la mise à disposition d'une zone de test opérationnelle, dans le cadre du projet PRODECO au Tchad, où plus de 100 millions de mètres carrés, soit la surface de la ville de Paris, sont contaminés par les mines et les restes explosifs de guerre.

## ■ L'Institut Paris Région met en ligne une carte interactive : état d'avancement des documents d'urbanisme locaux

Cette carte est une photographie de l'état d'avancement des documents d'urbanisme locaux à la date du 31 décembre 2020. Elle a été réalisée à partir des données extraites de la base Sudocuh, produite et mise à jour annuellement par le ministère de la Cohésion des territoires. La région Île-de-France est presque entièrement couverte par des documents d'urbanisme approuvés, ou en cours d'élaboration ou de révision. Fin 2020, moins de 27 % des communes franciliennes sont concernées par une procédure d'élaboration ou de révision d'un PLU(i) ou d'une carte communale. La planification locale est ainsi globalement stabilisée, mais vraisemblablement pour une courte durée, compte tenu de la loi Climat et résilience parue le 22 août 2021.

► Lien : <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/etat-davancement-des-documents-durbanisme-locaux/>

## ■ Centre géographique de la population des USA

Le NOAA's National Geodetic Survey (NGS) et le US Census Bureau (recensement) ont déterminé le centre géographique de la population américaine de situer près de Hartville dans le Missouri. Ce centre géographique permet d'analyser le déplacement territorial et temporel de la population américaine. Il est matérialisé par des repères à chaque détermination. Une cartographie interactive en ligne permet de visualiser cette évolution.

► Cartographie : <https://www.census.gov/library/visualizations/interactive/2020-census-center-of-population.html>





## ■ Renouveau du CNIG

Le Conseil national de l'information géographique (CNIG) se renouvelle pour renforcer la gouvernance de la donnée géolocalisée au service de la transition écologique et de la transition numérique. Annoncé lors de son comité plénier le 1<sup>er</sup> décembre 2021, le CNIG étend son champ d'action et renforce son rôle central dans le pilotage de la géodonnée en devenant le Conseil national de l'information géolocalisée. Le CNIG a pour mission d'éclairer le gouvernement dans le domaine de l'information géographique et de coordonner les contributions des acteurs concernés. Sa particularité est de rassembler en un lieu unique la très grande variété d'acteurs qui composent l'écosystème de la géodonnée en France : ministères, établissements publics, collectivités territoriales, entreprises privées, associations professionnelles, association de citoyens, qui peuvent se rencontrer, décider et co-produire ensemble. Rendez-vous en page 20 pour en savoir plus.

► Lien : <http://cnig.gouv.fr/>



## ■ Un nouvel insigne de coiffure pour les géographes de l'armée

Le 28<sup>e</sup> groupe géographique, basé à Haguenau (Bas-Rhin) est une unité de l'armée de Terre, la seule en France spécialisée dans la topographie, la cartographie et le recueil et l'exploitation de l'information géographique. Fin novembre 2021, les arpenteurs du 28<sup>e</sup> GG ont reçu leur nouvel insigne de béret qui fait référence au dernier insigne connu du Service géographique de l'armée dissous le 1<sup>er</sup> juillet 1940.



## ■ Baromètre annuel de l'Observatoire national du cadre de vie

Les membres fondateurs de l'Observatoire national du cadre de vie (ONCV) ont présenté la première édition du "Baromètre annuel du cadre de vie" à l'occasion du Salon des Maires et des Collectivités Locales. L'objectif est de donner aux acteurs du cadre de vie et aux collectivités des indicateurs qui leur permettent de développer l'attractivité de leur territoire. Les membres de l'ONCV, dont l'Ordre des géomètres-experts, ont accueilli les acteurs des collectivités pour leur présenter les résultats de cette vaste enquête. Réalisée auprès d'un échantillon de plus de 1 000 personnes, représentatif de la population, cette enquête permet de suivre le rapport des Français à leur cadre de vie en fonction de leur région, leur lieu d'habitation, leur âge et leur catégorie socioprofessionnelle. Le baromètre révèle par exemple qu'un Français sur quatre compte déménager dans les cinq ans. Un résultat impressionnant qui concerne principalement les actifs (40 %) et les habitants d'Île-de-France (45 %).

## ■ Collaboration SHOM - Amhydro



Le SHOM et Amhydro (Amicale des hydrographes) ont signé le 18 janvier une nouvelle convention de collaboration. Les deux organisations ont, chacune dans leur domaine, vocation à pérenniser les connaissances et les savoir-faire en hydrographie, à promouvoir le métier d'hydrographe ainsi qu'à faire découvrir au grand public les techniques et les sciences visant à la sécurité de tous les navigateurs. La collaboration Shom-Amhydro a démarré en

2006 et s'est matérialisée notamment par la réalisation de deux courts-métrages de reconstitution historique : Profil au top en 2017 et Paré pour la sonde en 2019.

## ■ Nouvelle direction et refonte logicielle pour la société JSInfo

La société JSInfo évolue avec la refonte de son moteur logiciel et le renforcement de son équipe par la nomination d'Hélène Leplomb au poste de directrice générale et de Thierry Lebrun en tant que directeur technique. JSInfo, propriété du groupe ATGT est éditeur de logiciels de topographie dont TopStation®, moteur de calcul graphique sur lequel sont basés les applicatifs tels que PIC, Topo-Codification ou DANumérique ainsi que le logiciel Limit Addict dédié aux géomètres-experts ou l'applicatif de division en volumes HBase. Un développement majeur du moteur TopStation® sera accessible dans le courant de l'année 2022, sans surcoût pour les utilisateurs et les développeurs d'applicatifs sous maintenance.

► Site web : <https://www.jsinfo.fr>



Hélène Leplomb (DG de JSInfo)

## ■ POSITICS nouveau revendeur DJI



La société POSITICS complète son offre de solutions pour la capture 3D avec la gamme DJI Enterprise, leader du drone professionnel et propose ainsi des systèmes complets : préparation du vol, acquisition et production des livrables. Ces drones sont équipés de charges utiles, caméra ou LiDAR, fiables et simples d'usage pour réaliser les projets de levé, cartographie, calculs de volumes, modèles 3D, compléments de levés et aussi pour des missions d'inspection.



## Erratum

Vous voudrez bien excuser la rédaction d'avoir évoqué l'orogénèse de la chaîne alpine au-delà du raisonnable. En page 40 du n° 169, dans la note relative à la mesure des géomètres-experts, il est raconté : "Au plus haut en 2007, le mont Blanc atteignait 4 910,90 m et, au plus bas en 2019, 4 806,06 m". Pan sur le bec, ou plutôt sur l'hectomètre, l'altitude maximale est de 4 810,90 m !

## Agenda des manifestations 2022

■ Du 29 au 31 mars, **Commercial UAV Expo Europe & Amsterdam Drone Week**  
<https://www.expouav.com/europe/>

■ Du 5 au 6 avril, **BIM World** à Paris  
<https://bim-w.com/>

■ Du 6 au 8 avril, **5<sup>th</sup> Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2022) in cooperation with FIG Commission 6**, à Valence, Espagne  
<https://jisdm2022.webs.upv.es>

■ Du 8 au 13 mai, **The 15<sup>th</sup> Royal Institute of Navigation Annual Baška GNSS Conference**, à Baška, Croatie  
<https://rin.org.uk/mpage/GNSSConference>

■ Du 6 au 11 juin, **XXIV<sup>th</sup> ISPRS Congress**, à Nice  
<https://www.isprs2022-nice.com/>

■ Du 7 au 9 juin, **ICL-GNSS 2022 International Conference on Localization and GNSS**, à Tampere, Finlande  
<https://events.tuni.fi/icl-gnss2022/>

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

■ Du 13 au 15 septembre, **46<sup>e</sup> congrès des géomètres-experts**, au Havre

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

■ 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/>

■ Le 17 novembre, **17<sup>e</sup> forum de la topographie**, au lycée des métiers Gaudier-Brzeska à Saint-Jean-de-Braye, près d'Orléans  
 exposants [communication@aftopo.org](mailto:communication@aftopo.org), participants [forum@aftopo.org](mailto:forum@aftopo.org)

## ■ BLUE PARKING : les géomètres-experts s'engagent pour la mobilité des personnes en situation de handicap



À l'occasion de la journée internationale des droits des personnes handicapées, l'Ordre des géomètres-experts a donné le coup d'envoi national de son projet *Blue Parking*, une opération de mobilisation de la profession pour accompagner les personnes en situation de handicap dans leurs déplacements du quotidien. Cette opération a reçu le label "Tous concernés, tous mobilisés" de la Conférence nationale du handicap, soit le label le plus encourageant pour un tel projet. Ce projet a pour objectif de géolocaliser l'ensemble des places de stationnement réservées aux personnes en situation de handicap et mettre ces données en open-data. Les emplacements réservés aux personnes en situation de handicap seront géoréférencés pour permettre l'utilisation des données par les véhicules autonomes, ces nouveaux modes de transport pouvant, demain, offrir une solution de mobilité sécurisée pour des personnes en situation de handicap. Les informations recensées seront ensuite rassemblées sur le portail Géofoncier, créé par la profession en 2010, et disponibles gratuitement.

■ Vidéo de présentation : <https://vimeo.com/652792546>

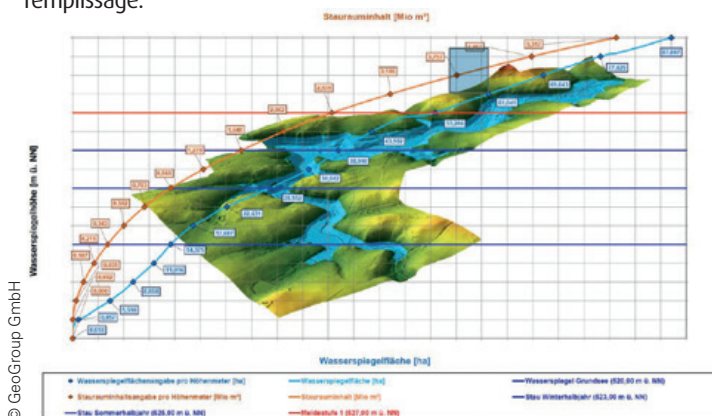
## ■ ESGT : départ de Christophe Proudhon, directeur des études

Christophe Proudhon, directeur des études de l'École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes (ESGT) a quitté ses fonctions début décembre 2021 pour occuper le poste de directeur adjoint de l'enseignement supérieur de la région académique PACA à Nice. Il occupait ce poste à la scolarité de l'ESGT, composante du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), depuis septembre 2004 après trois années passées à l'ESGT Liban et au centre CNAM Liban et une année au CNAM à Paris. Malgré ce départ, Christophe Proudhon conserve un lien fort avec l'ESGT, dont il est diplômé (1997), puisqu'il vient d'être nommé président de l'UIESGT, association des anciens élèves de l'école.



## ■ Mesures 3D de réservoirs d'eau en Allemagne

Les barrages comptent parmi les ouvrages les plus surveillés d'Allemagne, mais les contrôles s'effectuent par des méthodes traditionnelles d'arpentage du bassin d'un réservoir. Celles-ci restent chronophages et peu précises. GeoGroup GmbH et Fraunhofer IPM ont mené des essais sur 100 % d'un réservoir de Liebensteinspeicher, dans la région du Haut-Palatinat, avec des acquisitions 3D de haute précision. Le relevé complet combine plusieurs techniques : un système de cartographie mobile équipé d'un échosondeur monté sur un bateau et le LAP (Lightweight Airborne Profiler, système composé d'un scanner laser, de caméras et d'un capteur de positionnement sur un drone) pour survoler le lac. Les données fusionnées constituent la base d'un modèle 3D du réservoir, de plusieurs cartes de la surface de la nappe phréatique et concernant la profondeur du lac ainsi que la courbe de niveau de remplissage.



Modélisation du bassin de Liebensteinspeicher

## Retour sur l'édition 2021 des Journées de la topographie de l'INSA Strasbourg

*Les Journées de la topographie (JDT) se sont déroulées en ligne, entièrement dématérialisées, du 22 au 24 septembre 2021 : retour sur cette 18<sup>e</sup> édition des JDT.*

### Des soutenances de PFE diffusées en ligne

Les soutenances des projets de fin d'études (PFE) se sont déroulées dans les locaux de l'INSA pour les étudiant·e·s et les membres des jurys. Pour permettre au public de suivre les soutenances, celles-ci ont été diffusées en ligne et en direct, jusqu'au moment de la phase de questions/réponses. Les étudiant·e·s ne se sont pas laissé·e·s déstabiliser par cette situation et nous ont présenté de beaux projets de fin d'études.

### Deux événements autour des entreprises de topographie

Cette année le traditionnel salon des exposants s'est réinventé autour de deux événements au format 100 % virtuel : "La parole aux entreprises" (figure 1) et "La topographie recrute". Deux occasions de découvrir des entreprises dans le domaine de la topographie. Les étudiants ont découvert un secteur attractif avec une grande variété d'offres de recrutement.

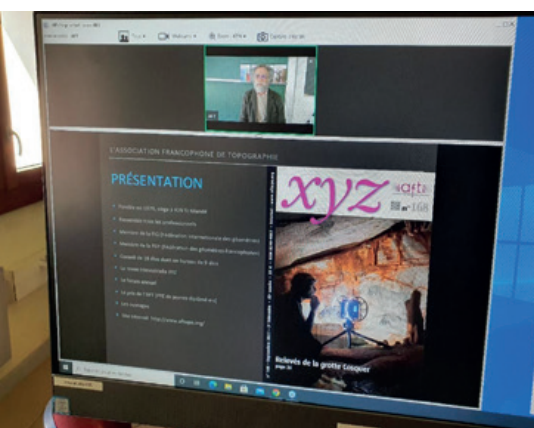


Figure 1. Présentation de l'AFT lors de l'évènement "La parole aux entreprises".

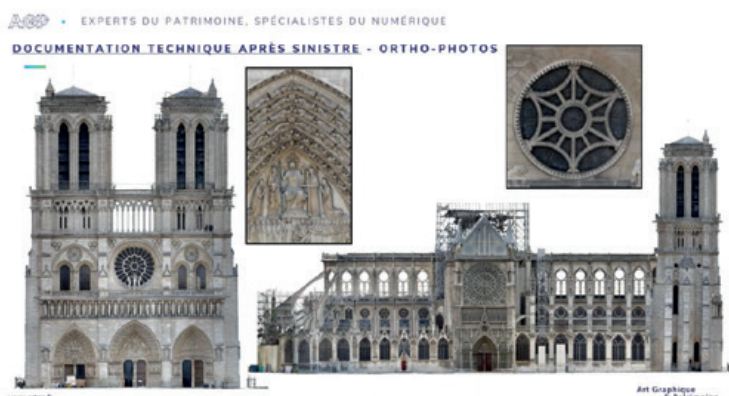
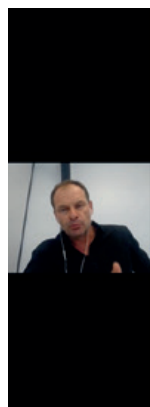


Figure 2. Conférence sur le thème de la "Numérisation 3D du patrimoine culturel".

### Une conférence sur le thème de la "Numérisation 3D du patrimoine culturel"

Lors de la conférence en ligne des JDT 2021, des experts ont expliqué, à travers différents projets, comment les nouvelles techniques d'acquisition en 3D permettent de préserver le patrimoine culturel, de réaliser des études archéologiques et de rendre accessibles des sites au grand public à l'aide d'outils numériques.

Matthieu Beuvin, directeur des affaires culturelles et touristiques à la Communauté de communes du Territoire Nord Picardie, a présenté les travaux de valorisation de la cité souterraine de Naours. Bertrand Chazaly, expert numérique et 3D chez Fugro France, a expliqué les conditions extrêmes des numérisations 3D de la grotte Cosquer réalisées depuis 2010 (deux articles du n° 168 de XYZ sont consacrés aux relevés de la grotte Cosquer). Enfin, à travers l'exemple du chantier de numérisation de Notre-Dame de Paris, Gaël Hamon, fondateur et dirigeant d'Art Graphique & Patrimoine (AGP), a fait un tour d'horizon des méthodologies et des savoir-faire appliqués à la préservation et à la valorisation du patrimoine (figure 2).

**Vous n'avez pas pu suivre la conférence ?** Retrouvez le replay sur le blog de la topographie : <http://topographie.insa-strasbourg.fr/> ou en scannant le QR code ci-contre.

### À bientôt pour une nouvelle édition des JDT !

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

Pour ne rater aucune information sur la prochaine édition des Journées de la topographie, abonnez-vous au blog de la topographie : <http://topographie.insa-strasbourg.fr/sujet/journees-de-la-topographie/> et rejoignez-nous sur notre page LinkedIn : <https://www.linkedin.com/showcase/topographie-insa-strasbourg>. ●

► L'équipe organisatrice des Journées de la topographie : [jdt2021@insa-strasbourg.fr](mailto:jdt2021@insa-strasbourg.fr) et [helene.macher@insa-strasbourg.fr](mailto:helene.macher@insa-strasbourg.fr)





## La SFPT, une société savante soixantenaire

■ Jean-Pierre MAILLARD



*Le 29 novembre 2021, en accueillant une soixantaine de participants représentant 27 organisations professionnelles et associatives, Aurélie Sand, présidente de la Société française de photogrammétrie et de télédétection (SFPT), s'est félicitée de pouvoir fêter son soixantième anniversaire en présentiel, au Géoroom de l'IGN. La SFPT compte à ce jour 227 adhérents et la revue française de photogrammétrie et de télédétection qu'elle publie est diffusée dans 40 pays. La présidente a remercié les soutiens de la SFPT et présenté la journée organisée sous forme d'un séminaire sur le thème des nouvelles tendances en photogrammétrie, télédétection et sciences géographiques. Par sa présence, saluée par Aurélie Sand, Christian Heipke, président de l'International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), à laquelle la SFPT adhère, a honoré la manifestation et rappelé les enjeux importants du XXIV<sup>e</sup> congrès de l'ISPRS organisé du 6 au 11 juin 2022 à Nice, justement par la SFPT. Dans son intervention, Christian Heipke a loué les travaux fondateurs d'Aimé Laussedat et de Georges Poivilliers. À travers eux, il a souligné l'apport considérable de la France dans le domaine de la photogrammétrie. Au sujet de Laussedat, Aurélie Sand a mentionné la commémoration, en 2019, du bicentenaire de sa naissance, organisée conjointement par la SFPT et l'AFT. L'évocation de Laussedat a également renvoyé à son alter ego en photogrammétrie, l'ingénieur allemand Albrecht Meydenbauer, spécialisé en architecture dont le centenaire de la mort, en 2021, a été marqué par l'édition d'une biographie offerte par le président Heipke à la SFPT.*

- la production de données utiles au projet LiDAR HD France entière ;
- la production d'un référentiel national de données géographiques d'occupation des terrains pour suivre l'artificialisation des sols.

Ces ambitions induisent une vision élargie pour appréhender l'ensemble des chaînes de traitement de données géospatiales allant jusqu'aux applications et usages qui incluent entre autres :

- le stockage de la donnée dans des data-centers et leur gestion par des systèmes d'information géographique (SIG) ;
- le traitement de données massives incluant le temps réel avec des capacités correspondantes de calcul intensif ;
- la fusion et l'intégration de ces données dans un ou des référentiels ;
- l'interopérabilité de ces données avec d'autres référentiels de données géolocalisées.

En conclusion, aux côtés du CNES, l'IGN continuera, autant que possible, de soutenir la SFPT qui concourt à la dynamique de la communauté scientifique francophone et participe dans le monde au rayonnement des compétences françaises dans les domaines qu'elle porte.

Au nom du CNES, Gilles Rabin, directeur innovation, applications et

Les présents ont été reçus par les hôtes de la maison, Magali Stoll, directrice-adjointe de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et Nicolas Paparoditis, directeur de l'École nationale des sciences géographiques-géomatique (ENSG).

Magali Stoll a souligné que les domaines de la SFPT, la photogrammétrie et la télédétection, sont aussi des sujets structurants des activités de l'IGN. En faisant écho au projet "géo-communs, avançons ensemble !", présenté le 24 novembre à ses partenaires (cf. page 10), l'institut met en œuvre une nouvelle stratégie qui substitue à l'observation statique du territoire celle du "temps réel". Entre autres constituants des géo-communs, on note en particulier :

- la coproduction du plan de corps de rue simplifié (PCRS) nécessaire à la mise en œuvre de la réglementation "anti endommagement des réseaux" ;

- la coproduction de données géographiques à partir d'images satellite pour le programme "GEODE 4D" (avec ses quatre dimensions : géographique, hydrographique, océanographique et météorologique) au service du ministère des Armées ;



Aurélie Sand, présidente de la SFPT.



Christian Heipke, président ISPRS.



sciences, tout en réaffirmant que la science est fondamentale a montré l'influence du spatial sur l'économie du secteur. Désormais, c'est la donnée qui fait la valeur et pèse sur l'activité. Si, précédemment, la production des lanceurs et des satellites générait le plus gros du travail, désormais ce sont les applications qui emploient le plus.

Par suite, de nombreux intervenants ont pris la parole pour exposer chacun un sujet préparé pour l'occasion. Pour donner un aperçu du programme et de la densité du séminaire, quelques présentations sont résumées ci-après. Pour en savoir plus, il convient de se reporter à la newsletter n° 47 de décembre 2021 de la SFPT et à la revue française de photogrammétrie et de télédétection qui va s'enrichir de la restitution écrite de plusieurs exposés.

Loïc Gondol a fait valoir la technologie LiDAR et sa maîtrise qui permettent de réaliser des cartographies 3D denses et précises répondant déjà utilement, mais partiellement, aux besoins des politiques publiques. Pour mieux répondre aux besoins la France initie pour la première fois, un projet national de couverture LiDAR haute densité (10 points /m<sup>2</sup>) afin de disposer d'une cartographie 3D très précise de la quasi-totalité de son territoire d'ici à 2025. Les acquisitions ont débuté au printemps 2021 en étant localisées sur un grand quart Sud-Est de la France. Le secteur privé industriel va être grandement mobilisé pour la production des données. Les produits à fournir incluent notamment des nuages de points classés, des modèles numériques de terrain et des modèles numériques de surface.

L'objectif de ce programme ambitieux et fédérateur est d'obtenir un saut qualitatif dans la description fine du territoire en 3D.

Arnaud Le Bris a explicité le projet *Historical Image Analysis for Territory evolution Stories* (HIATUS) relatif à la mise en géométrie de campagnes photogrammétriques aériennes anciennes. Par le développement de l'analyse automatique d'images historiques, HIATUS vise à proposer *in fine* des produits permettant la caractérisation de l'évolution des territoires, une façon de remonter le temps. Les couvertures photographiques aériennes de l'IGN, suffisamment denses et rapprochées, constituent des séries temporelles longues qui offrent une très haute résolution spatiale (généralement submétrique) et un accès potentiel à une information 3D puisqu'elles étaient destinées à un traitement stéréoscopique. Le projet HIATUS passe par la nécessaire remise en géométrie des images et leur égalisation radiométrique afin d'obtenir des mosaïques intégrant la sémantisation des différents millésimes de la série temporelle. La valorisation des différents résultats se fera par le développement de démonstrateurs en ligne pour la visualisation des données et autres produits du projet HIATUS.

Pierre-Marie Brunet a rapporté l'état d'avancement d'AI4GEO (*prononcer a-i-for-géo*). Pour répondre à la demande croissante de produits géospatiaux "3D qualifiés", les GAFAM ont investi le marché en ingérant de façon systématique toutes les données spatiales disponibles et en proposant leurs services. Dans le cadre d'un

partenariat public-privé (PPP) l'ambition du projet AI4GEO est d'offrir aux utilisateurs une alternative souveraine. En se basant sur des données satellitaires à très haute résolution et en ayant recours à l'intelligence artificielle, le projet vise à développer une solution compétitive en termes de coût et de délai de production, à qualité égale. À chaque passage de satellite à carte 3D peut être mise à jour sachant que la finalité est l'identification des zones qui ont changé et mériteraient un traitement à plus grande échelle. À ce jour, trois chaînes sont disponibles, la première permet de produire des cartes 3D avec une reconstruction du bâti, deux chaînes de classification des sols venant compléter le produit pour ajouter des informations sémantiques. Ces trois chaînes ont la capacité de traiter les données de manière totalement automatique. L'ensemble de ces informations sera fusionné dans un produit global, la 3D Smart Map.

Les participants se sont donné rendez-vous au congrès de Nice de l'ISPRS qui se déroulera du 6 au 11 juin 2022.

N.B. La revue française de photogrammétrie et de télédétection change son mode de numérotation et passe en publication continue à partir de la revue n° 223.

Désormais la SFPT éditera un seul volume par an. Ce volume comportera plusieurs numéros regroupant les articles selon leur rubrique d'appartenance et des hors série. Tous les articles sont désormais publiés en numérique au fur et à mesure de leur acceptation définitive. ●

### 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**



## IGN, changer d'échelle !

■ Jean-Pierre MAILLARD



*Le 24 novembre 2021, l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a présenté à ses partenaires institutionnels, industriels et citoyens les premières conclusions de la concertation initiée en mai 2021 sur un projet "géo-communs, avançons ensemble !", menée en lien avec un ensemble d'acteurs de la communauté géomatique. Réunis dans les murs de Ground Control, l'endroit à la mode du XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris qui se présente comme un lieu de vie culturel, indépendant et engagé où l'on peut nourrir le corps et l'esprit. Les participants ont été accueillis par Mme Emmanuelle Prada-Bordenave, présidente du conseil d'administration de l'IGN, qui a introduit la rencontre en déclarant que l'institut a engagé sa mue et la recherche de la souveraineté numérique. Puis M. Sébastien Soriano, directeur général, a présenté les actions entreprises déclinées sous forme de chantiers et invité plusieurs intervenants à exprimer leurs points de vue sur différents sujets en relation avec les problématiques tels le biomimétisme ou la carte de France de la nature sauvage.*

La priorité actuelle de l'institut vise à outiller la Nation pour mieux comprendre son territoire à l'heure de grands bouleversements écologiques et numériques. Cela passe d'abord par la connaissance de l'anthropocène, l'ère géologique présente caractérisée par la modification considérable et incessante du milieu naturel du fait de l'homme, pour que la cartographie publique devienne un moyen utile à une meilleure maîtrise des bouleversements générés par celui-ci. À cette fin, dix chantiers sont mis en avant, autant de façons de donner corps au nouvel élan. Pour autant, l'IGN poursuivra légitimement son activité de production de données "socle" et d'inventaire, sa disponibilité au service du ministère des Armées et son investissement dans l'enseignement supérieur comme dans la recherche. Mais revenons aux chantiers définis comme suit :

### 1) les cartes de l'anthropocène

Elles feront l'objet de publications régulières (tous les un à trois ans), des cartes dédiées aux enjeux écologiques majeurs, notamment la vigueur des forêts, l'évolution du relief et des cours d'eau, l'artificialisation des sols, le potentiel de biodiversité et tous thèmes à définir à l'appui des politiques publiques,

### 2) un modèle 3D France entière

Il sera établi par une acquisition LiDAR haute densité, programmée entre 2021 et 2025, avec mise à disposition progressive des données et un travail sur leur exploitation relative à des secteurs clés comme la ville, la forêt, l'agriculture, le bâti, les infrastructures,

### 3) un plan de recrutement et de formation

Le personnel de l'IGN acquerra ou complètera ses connaissances en matière d'intelligence artificielle (IA), de data science, d'altimétrie 3D et de géovisualisation. En s'appuyant sur l'École nationale des sciences géographiques (ENSG-Géomatique), le plan sera élaboré et rendu attractif par une politique salariale et un cadre de travail adapté,

### 4) une "place à communs"

Les acteurs intéressés seront rassemblés autour de défis collectifs. Une fabrique des géo-communs développera les thèmes et d'autres projets IGN avec les partenaires privés et services publics concernés. Nicolas Berthelot, cofondateur de la société namR, en charge du département data intelligence, puis responsable produit de transport.data.gouv.fr, le point d'accès national aux données de mobilité,

devient responsable de la fabrique des géo-communs. L'infrastructure Géoplateforme (voir encadré) leur sera ouverte pour l'hébergement et le partage de données,

### 5) un système de labels

Les partenaires publics et des communautés contributives seront habilités à enrichir et mettre à jour en autonomie la base "BD France" de l'IGN, les données ajoutées étant garanties par l'institut,

### 6) un "forum IGNfab"

Une enceinte d'échanges entre les professionnels du secteur, acteurs de l'innovation et de la *French Tech*, est constituée pour élaborer des visions partagées et tisser, le cas échéant, des partenariats. Le programme IGNfab actuel en appui aux startups demeure et s'enrichira de la valeur ajoutée du forum,

### 7) un plan pour smartphones

Alternatif aux offres de Google et Apple, un plan pour smartphones est à établir en respectant la richesse du territoire et la liberté des utilisateurs. Ce plan est à co-construire dans la fabrique des géo-communs,

### 8) de nouvelles cartes papier

Pour répondre aux attentes des Français demandeurs d'une reconnexion à la nature, d'une meilleure connaissance du patrimoine et des pistes cyclables, des cartes au 1/25000<sup>e</sup> plus fraîches et accessibles seront produites,

### 9) un guichet "cartographe du service public"

Le service valorisera les fonctionnalités de géovisualisation et d'hébergement de la Géoplateforme, un service de soutien aux administrations qui souhaitent utiliser la carte comme outil de médiation ou de pilotage des politiques publiques,

### 10) des programmes de partage autour de la cartographie

Des actions de vulgarisation scientifique et de sensibilisation citoyenne



© IGN

Le directeur général de l'IGN, Sébastien Soriano, présente les ambitions de l'IGN.

autour de la cartographie et des enjeux auxquels elle peut contribuer seront proposés au musée des Arts et Métiers à Paris (patrimoine), au Géoroom à Saint-Mandé (public scolaire, acteurs des communs) et dans les implantations de l'IGN en région.

Ce faisant, l'IGN recentre son activité sur son rôle d'observateur du territoire national et de fournisseur de données géographiques désormais en continu. De même, il s'engage dans une collaboration avec de nombreuses parties prenantes pour la mise en commun des données numériques cartographiques qu'il se propose de rassembler. Ces actions visent à revaloriser le potentiel de la carte dans toutes ses composantes comme outil de connaissance géographique et de médiation, potentiel démultiplié par la

numérisation. Ce projet est présenté comme une nouvelle boussole pour l'IGN et un nouveau projet économique basé sur le contrat d'objectifs et de performances 2020-2024 assigné par l'État qui intègre, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021, la gratuité des données de l'IGN.

Partant, l'institut joue un rôle majeur de production de cartes et données numériques au service de la compréhension de l'environnement et notamment de l'action publique attachée à la transition écologique. Pour souligner son engagement, l'institut prend désormais pour signature "IGN changer d'échelle". La présentation a été conclue par l'intervention vidéo de Mme Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, la tutelle de l'institut, qui a validé les ambitions présentées et exprimé ses vifs encouragements à l'IGN pour son entreprise. ●

## La Géoplateforme

La Géoplateforme, infrastructure mutualisée pour le partage des géodonnées, sera ouverte pour l'accueil des communs, comme un trait d'union entre les acteurs. La Géoplateforme propose de fournir les fonctions utiles à cette fin : accès rapide et simplifié aux données, rationalisation de l'existant, développements de standards et de spécifications communes, certification des données, accélération du développement d'applicatifs innovants, etc. En 2021, le projet Géoplateforme a franchi des étapes importantes (avis conforme de la DINUM, choix de l'hébergeur OVHCloud et du groupement industriel en charge de son développement et de son exploitation). Le projet va maintenant entrer dans une phase concrète de co-construction avec les nombreux partenaires intéressés à y contribuer, dont : ASP, ADEME, INSEE, ONF, Shom, CRIGE PACA, CRAIG AURA, OpenIG, PIGMA, Géopal, GRIGE Normandie, etc.

Alain Coulomb

## Le marégraphe de Marseille

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

aftp  
association francophone de topographie

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

640 pages, 400 illustrations  
frais de port inclus (France)

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

Prénom : \_\_\_\_\_

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

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

Code postal :

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

Tél. :

Fax :

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

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

Signature \_\_\_\_\_

**Bulletin de commande à retourner  
accompagné d'un chèque  
à l'Association francophone de topographie**

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

**Achat également sur Internet :  
[www.aftopo.org](http://www.aftopo.org)**



## La société de géographie est bicentenaire

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Le 15 décembre 2021, sous le haut patronage du président de la République, la société de géographie a célébré son bicentenaire.*

*Cet anniversaire permet de rappeler que la société, doyenne des sociétés de géographie au monde, a été fondée en 1821 et reconnue d'utilité publique depuis 1827.*

Société savante, l'une des plus anciennes de France, elle a été constituée justement il y a deux cents ans, le 15 décembre, en l'hôtel de ville de Paris par 217 personnalités, dont les plus grands savants de l'époque : Laplace, Cuvier, Chaptal, Denon, Fourier, Gay-Lussac, Champollion, Chateaubriand pour ne citer que ceux dont le nom résonne encore aujourd'hui. Depuis, bien d'autres noms illustres tels Jules Verne, Anatole France et le Prince Albert I<sup>er</sup> de Monaco ont adhéré et servi la société.

Depuis 1878, boulevard Saint-Germain à Paris, elle dispose d'un immeuble qui héberge l'un des hauts lieux de la géographie française et mondiale, dont l'amphithéâtre et les équipements permettent l'accueil de nombreuses rencontres nationales et internationales.

La société a de multiples activités, notamment l'édition au travers de ses publications à savoir la revue *La Géographie*, qui enregistre cette année son 1570<sup>e</sup> numéro, un bulletin de liaison des membres et de nombreux ouvrages. De même, elle s'emploie à l'organisation de conférences mensuelles, d'expositions ou de voyages, à l'accueil à Paris de géographes étrangers ou encore à l'attribution de prix divers. À ce dernier sujet, Raymond D'Hollander et l'AFT ont été honorés, en 2005, par l'attribution à l'auteur pour l'ensemble de son œuvre du grand prix de cartographie. La société possède un patrimoine considérable d'ouvrages, revues, cartes, atlas,



Le président de la société de géographie, Jean-Robert Pitte, accueille les participants dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne.

globes, photographies, constitué depuis sa création, un fonds placé en dépôt et géré par la Bibliothèque nationale de France (BnF) dans son département des cartes et plans, à partir de 1942.

La société est membre de l'union géographique internationale (UGI) et participe à ses congrès quadriennaux. De même, elle contribue aux journées annuelles du comité national de géographie (CNG), au festival international de géographie (FIG) qui se tient tous les ans depuis 1990 à Saint-Dié-des-Vosges et à toutes les manifestations importantes de la discipline.

Le point d'orgue du bicentenaire s'est traduit, dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne à Paris, par un moment de fête. Le maître de cérémonie, Jamy Gourmand, a introduit l'après-midi en soutenant que la géographie est l'antidote du repli sur soi. L'animateur a ensuite déroulé le programme en recevant de nombreuses personnalités, toutes invitées à prendre la parole. En premier, l'hôte des lieux, Christophe Kerrero, recteur de l'académie de Paris, a souhaité la bienvenue à plusieurs centaines de participants, personnalités, membres de la société, amoureux de la géographie et de plusieurs classes d'élèves de France et de Roumanie. Il a démontré avec

conviction que la mappemonde, l'atlas et la carte sont des portes ouvertes sur une réalité plus complexe. Ensuite, Jean-Robert Pitte, président de la société de géographie, a souligné son universalisme puisqu'elle n'est ni de France ni de Paris. C'est pourquoi elle accueille en son sein Français et étrangers, une cohérence avec la démarche du géographe qui a toujours besoin d'aller voir ailleurs et ne se reconnaît pas dans des limites. Si la géographie a d'abord servi la guerre, désormais, elle sert tout autant la paix. Le président a conclu son intervention en souhaitant que la géographie redevienne une passion joyeuse pour les Français et tous les citoyens du monde avec un enseignement valorisé. Entre autres interventions, Nathalie Lemarchand, vice-présidente de l'UGI, qui réunit quatre-vingts pays, a approuvé le caractère précieux de la géographie à l'ère de l'anthropocène et annoncé la tenue, à l'été 2022 à Paris, du prochain congrès de l'union avec la célébration du centenaire de l'institution.

Le fil conducteur de la cérémonie s'est traduit par la déclinaison des cinq sens puisque le monde se regarde, s'écoute, se hume, se goûte et se touche en autant de moyens donnés à tous pour le percevoir, en jouir en disposant, de plus,

© Leo-Paul Horlier/Société de Géographie



de clés pour mieux comprendre l'humanité et son environnement. Il a donc été proposé d'approcher successivement la géographie de l'ouïe, du toucher, de la vue, de l'odorat et du goût.

Le premier sens abordé a été celui de l'ouïe. Sa perception, pour le plaisir des oreilles, a été confiée à l'orchestre de la Garde républicaine qui a ouvert la manifestation par une sonnerie Marseillaise. Au fil des intermèdes musicaux qui ont rythmé le programme, les morceaux choisis ont successivement et virtuellement conduit les auditeurs en France, en Afrique, en Amérique du Nord, en Amérique du Sud, en Chine et en Russie.

Pour illustrer le sens du toucher, la société Clairefontaine a mis à la disposition des participants un cahier d'une vingtaine de feuilles à l'épaisseur et au grain tous différents, le produit de la composition de chaque papier. Indifféremment élaborée avec des fibres végétales, du cacao ou encore des tissus tel le jean, chaque sorte de papier est caractérisée par un toucher et une couleur spécifiques. Ainsi, en tenant le cahier bien en main l'imagination peut, pour citer deux exemples, révéler une impression de Sibérie pour l'aquarelle torchon 300 gr ou encore de Sahara pour l'Ingres rouge 130 gr.

Nul besoin d'une approche particulière pour expliciter la dimension géographique du sens de la vue puisqu'elle permet l'observation directe des territoires. Des témoignages ont suffi à illustrer les innombrables possibilités offertes par l'œil. Deux d'entre eux sont rapportés. Christian Prudhomme, directeur du Tour de France, apprécie particulièrement que l'épreuve sportive en elle-même télégraphique soit magnifiée par le paysage et reconnaît que la géographie peut avoir une incidence sur la définition de son tracé. Pour sa part, Thomas Pesquet, reçu par vidéo, a exprimé son émotion d'avoir pu contempler la Terre à 400 km d'altitude et à 28 000 km/h, confessé son admiration pour ses couleurs toujours changeantes et le besoin de photographe pour garder trace et partager.

Le sens de l'odorat a mobilisé le savoir-faire de Francis Kurkdjian, créateur

parfumeur, pour établir une géographie des senteurs de France. L'enveloppe cachetée remise avec le cahier aux feuilles dépareillées contenait neuf fragrances qui sentaient fort l'une les bottes de foin de la campagne, l'autre la marée basse du bord de mer, une troisième, le macadam des villes pour identifier les odeurs les plus immédiatement reconnaissables. Une carte de France, qui n'oubliait pas les régions ultramarines, localisait chacune des odeurs. Le compositeur de parfums a ainsi permis un voyage immobile en réveillant la mémoire olfactive de chacun et son empreinte de souvenirs, souvent indélébile.

Reste le sens du goût. Si la musique a égayé les oreilles, si le cahier de Clairefontaine permit de s'en remettre au toucher, si les vidéos ont accroché les regards, si les nez ont senti des parfums de France, la Covid-19 a au contraire interdit que les papilles des participants soient sollicitées. Le président Pitte en était le premier désolé. Alors, pour évoquer le lien entre la géographie et le goût, la création des appellations d'origine contrôlée (AOC) puis celle des appellations d'origine protégée (AOP), les organisateurs se sont tournés vers Guillaume Gomez, cuisinier au palais de l'Élysée devenu représentant personnel du président de la République pour ce qui concerne la gastronomie. D'entrée, il note qu'un deuxième bicentenaire doit être remarqué, celui en 1821 de la première du port de la toque par un chef de cuisine. Il pour-



suit en montrant que le nom même des plats fait voyager puisque l'évocation des plats paella ou couscous entraîne immédiatement l'esprit au-delà des frontières. Réciproquement, la France attire les visiteurs non seulement pour ses paysages, mais aussi pour le goût des produits de ses multiples terroirs.

Le Prince Albert II de Monaco a clos la cérémonie en soutenant le caractère universel de la société de géographie, à laquelle il appartient avec fierté. Il évoque et salue son trisaïeul, Albert I<sup>er</sup> dont 2022 marque le centenaire de sa disparition. Navigateur émérite, savant, explorateur, Albert I<sup>er</sup> a effectué 28 campagnes en mer au service de la science et, en premier, à celle de la géographie. Son œuvre scientifique a conduit à la fondation de l'institut océanographique de Paris et au musée océanographique de Monaco, des références en la matière.

Le bicentenaire de la société, celui de la toque, le centenaire de l'UGI et celui de la mort d'Albert I<sup>er</sup> ont placé le moment à l'échelle du siècle. Un retour sur le passé avec une telle mesure permet d'apprécier les progrès de la connaissance, les moyens de son appropriation, et de nommer ceux qui ont fait avancer la discipline, autant d'inventaires au service de l'histoire de la géographie. ●

## Manifeste de la société de géographie

Dans le cadre de la préparation de son bicentenaire, la société de géographie a rédigé un manifeste pour remettre la géographie sur le devant de la scène, en particulier auprès des jeunes générations. Ce document formule huit propositions majeures afin que le plus grand nombre reprenne goût à cette discipline incontournable pour la compréhension du monde. De l'amélioration de son enseignement jusqu'à la création d'une journée mondiale de la géographie par l'UNESCO, en passant par la relance des voyages scolaires, ce manifeste est soumis aux pouvoirs publics afin de redonner toute sa place à la géographie.

Dans cet élan, du 7 au 9 avril 2022, la société réunira pour trois jours de réflexion des géographes académiques et d'autres fêrus de géographie comme des écrivains, intellectuels et personnalités de tous horizons : Jamy Gourmaud, Régis Debray, Erik Orsena, Xavier Darcos... Organisé en partenariat avec l'académie des sciences morales et politiques, ce colloque permettra de faire un état des lieux de la géographie en France au regard de la diffusion du savoir géographique dans les médias et auprès du grand public, de la participation des géographes aux grands débats actuels (climat, biodiversité, mondialisation économique, migrations, démographie, aménagement du territoire, géopolitique et géostratégie, etc.), et de l'enseignement de la géographie à tous les niveaux de l'instruction primaire, secondaire et supérieure.





## Forum de la topographie 2021 à Égletons, la détection et la localisation des réseaux enterrés

■ Jean-Pierre MAILLARD – Bernard FLACELIÈRE

*Après deux reports, une année blanche en 2020, les conditions sanitaires liées à la Covid-19 ont enfin permis la tenue du forum de la topographie. Il s'est déroulé le 18 novembre 2021 à Égletons, la ville porteuse de nombreux établissements d'enseignement proposant de multiples formations aux métiers des travaux publics et du génie civil. L'AFT s'est réjouie de pouvoir de nouveau réunir des professionnels de la topographie au sens large, notamment des étudiants de la section topographie du lycée Caraminot de la ville, des étudiants du campus local, ceux de la section topographie du lycée Le Caousou de Toulouse et des exposants de matériels ou de logiciels en proposant des conférences et un salon d'exposition, la 16<sup>e</sup> manifestation de l'association sous la formule forum.*

**R**appelons que le forum a déjà été organisé à Égletons en 2011, alors une façon de saluer la création de la section BTS topographie du lycée. Cette création doit beaucoup à Louis Catinot, fondateur et premier président de l'AFT qui, justement, a fait des études au lycée Caraminot. Sous le titre *"Lutte pour un avenir"*, Louis Catinot a écrit ses mémoires à dominante topographique, un ouvrage réédité par l'association en bonne place sur son stand et le site [www.aftopo.org](http://www.aftopo.org). Nonagénaire en retraite sur le bord de la Méditerranée,

il a adressé ses vœux de réussite au forum.

Pour la deuxième fois, la préparation du forum s'est appuyée sur Dominique et Eric Coudert, respectivement retraitée du lycée Caraminot et en congés avant retraite de l'École d'application aux métiers des travaux publics (EATP). En 2021, l'AFT a apprécié la sollicitude du proviseur, Gilles Tissandier, et celle de Didier Cassez, directeur délégué aux formations professionnelles et technologiques de l'établissement, par ailleurs conseiller municipal. Cette fois, les promoteurs

du forum se sont associés à Rémi Acampo représentant le campus des métiers et des qualifications "génie civil et infrastructures intelligentes" de Nouvelle-Aquitaine, coorganisateur, afin d'élargir la communication à toute la communauté éducative locale et au-delà. Le label "campus des métiers et des qualifications" permet d'identifier, sur un territoire donné, un réseau d'acteurs qui interviennent en partenariat pour développer une large gamme de formations professionnelles, technologiques et générales, relevant de l'enseignement secondaire et de l'enseignement supérieur, ainsi que de la formation initiale ou continue, qui sont centrées sur des filières spécifiques et sur un secteur d'activité correspondant à un enjeu économique national ou régional.

Le campus d'Égletons réunit l'EATP, l'école de formation initiale par alternance aux métiers des travaux publics (EFIATP), l'institut universitaire de technologie (IUT) du Limousin - département génie civil d'Égletons, l'université

de Limoges, le lycée des métiers Marcel Barbanceys de Neuville, l'association pour la formation professionnelle des adultes (AFPA) d'Égletes, du lycée Caraminot, le groupement d'établissements (GRETA) du Limousin, le centre de formation d'apprentis (CFA) et la plateforme technologique des travaux publics du Limousin (PFTTP).

L'AFT sait gré à la ville d'Égletes d'avoir mis l'espace Ventadour à sa disposition, un lieu particulièrement adapté à la manifestation. L'association remercie vivement son maire, Charles Ferré qui a tenu à visiter le forum et tous les acteurs de l'équipe d'organisation sur place et sans qui la manifestation ne pouvait avoir lieu.

Un forum sans salon n'est plus un forum. Ainsi, après contrôle du passe sanitaire, les participants ont chacun reçu un badge, été accueillis par l'AFT et le campus des métiers et des qualifications puis, sans transition, attirés par les stands des exposants qui ont fait confiance à l'association. Justice est de les citer tous : ADRE Réseaux, ASTELLOG, atelier topographie services (ATS), centre d'études et de réalisations du Nord-Est (CERENE), ESCADRONE, FUTURMAP, GEOFIT, GEOMESURE, GEOPIXEL, GEOTOPO, JSINFO, KICKTHEMAP, KIPAWARE, LEICA GEOSYSTEMS, MADE, MDS, MESURES & SYSTEMES, my networks detection solutions (MYNDS), N.A.T. GROUPE, RADIODETECTION, REZOPROCESS, SFS TOPO, SITECH, service technique topographie laser (STTL), SYSLOR, TERIA et VIVAX METROTECH. Le Campus a disposé d'un stand près de l'accueil, proche de celui de l'AFT tandis que l'AFIGEO, qui soutient le forum, s'est affichée au moyen d'un kakémono.

Les nombreux visiteurs, plus de quatre cents tout au long de la journée, ont ainsi pu recevoir et apprécier des propositions de matériels topographiques, de systèmes de repérage de réseaux, de services divers et toutes informations à leur sujet. On a notamment remarqué les radars de détection sur roues, les plus sophistiqués accrochés à des véhicules automobiles ou encore des restitutions 3D géolocalisées à partir de vidéos de smartphones. Parmi des vingt-sept exposants, onze ont eu la parole pour



Figure 1. Margaux Dérouès présente la réglementation anti-endommagement.

présenter en un égal temps compté leurs offres et leur valeur ajoutée.

Le forum a été introduit par Bernard Flacelière et Pierre Grussenmeyer, vice-présidents de l'AFT et ouvert par des mots de bienvenue de Gilles Tissandier, proviseur du lycée Caraminot.

Une table ronde, modérée par Bernard Flacelière, a ouvert les exposés. La réglementation, l'enjeu et l'évolution de la détection et localisation des réseaux enterrés y ont été introduits et développés.

Margaux Derouès (*figure 1*), chargée de mission réglementation anti-endommagement (RAE) au ministère de la Transition écologique, nous a présenté la réforme selon les thèmes suivants :

- le contexte de cette réforme ;
- le nouveau dispositif avec les trois piliers de cette réforme ;
- les étapes de la mise en œuvre ;
- le zoom sur la détection et le géoréférencement ;
- le bilan.

Loriane Roussel, présidente de la FNEDRE (Fédération nationale des entreprises de détection de réseaux enterrés) a insisté sur le rôle de la fédération dans :

- la promotion de la détection et le géoréférencement des réseaux enterrés ;

- la défense des intérêts de la profession auprès des instances en charge de la définition du cadre réglementaire et normatif du plan anti-endommagement des réseaux ;
- la fédération de toutes les parties prenantes, la position de la profession au centre de l'écosystème de l'amélioration de la cartographie des réseaux et de la sécurité des travaux ;
- la veille réglementaire et expertise technique aux adhérents ;
- le développement des compétences et de l'expertise des entreprises.

Rémi Acampo, directeur opérationnel, a présenté et expliqué le rôle du Campus des métiers et des qualifications avec les établissements membres et les nouveaux outils pédagogiques.

Jean-Pierre Moreau nous a montré, pour l'opérateur ENEDIS, les bénéfices de la mise en place de la réforme.

Les participants ont suivi successivement trois présentations axées sur les méthodes et les restitutions. Benoit Jean-Larippe de la société Vivax-Metrotech a ouvert par la "détection par méthode électromagnétique". L'après-midi nous a offert la "détection par méthode géoradar" par Samuel Sainte-Luce de la société MDS (*figure 2*) suivi par Lilian Mangin de SYSLOR qui a développé la "restitution,





Figure 2. Samuel Sainte-Luce présente la méthode radar.



visualisation et mise à disposition des données”.

La table ronde et les présentations sont disponibles sur le site de l'AFT à l'adresse <https://www.aftopo.org/le-prochain-forum-de-2022/> puis descendre vers “les forums précédents”.

Les lauréats du prix de l'AFT n'ont pas été oubliés. Les renvois successifs du forum ont occasionné un embouteillage certain dans la distribution des prix. En compagnie de Farouk Kadded, représentant Leica Geosystems, sponsor du prix, Bernard Flacelière a présenté, en leur absence, les études des lauréats du prix 2019 récompensés en 2020 sans cérémonie protocolaire. Nous les rappelons ici :

- 1<sup>er</sup> prix, Hmimou Mohammed, de l'IAV Hassan II à Rabat avec “Estimation

du rendement agricole via imagerie drone et scanner laser terrestre : cas des agrumes” ;

- 2<sup>e</sup> prix ex aequo, Arthur Picard, de l'INSA Strasbourg avec “Création d'un moteur de détection automatique d'objets ponctuels dans une base de données de scanner dynamique” ;

- 2<sup>e</sup> prix ex aequo, Laurine Cartier, de l'INSA Strasbourg avec “Modélisation 3D du château disparu des Wurtemberg à Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine”.

Place ensuite au prix 2020, récompensé ce jour. Pour réduire les dépenses de transport, la pandémie oblige, nous avons demandé aux deux lauréats de

préparer une vidéo de 8 à 9 minutes présentant leurs travaux. Ils se sont pliés à l'exercice et nous avons pu suivre leurs présentations :

- 1<sup>er</sup> prix ex aequo, Camille Parra, de l'ENSG Marne-la-Vallée avec “Modélisation des délais ionosphériques appliquée au traitement PPP-RTK centimétrique avec ambiguïtés entières de phase” ;
- 1<sup>er</sup> prix ex aequo, Matthieu Rebmeister, INSA Strasbourg+Karlsruher Institut für Technologie, avec “Compressive Sensing appliqué au traitement de données Insar pour le suivi de la déformation des zones urbaines”.

En souvenir de la présence du rédacteur en chef de votre revue à ses côtés au sommet du mont Blanc en septembre 2015, Farouk a offert à l'AFT un exemplaire à couverture personnalisée par Leica Geosystems de l'ouvrage “Mont-Blanc – Mesures d'un mythe”, édité par Publi-Topex<sup>1</sup>. Cette publication, qui reprend les mesures bisannuelles de 2001 à 2021, trônera en bonne place au siège de l'AFT à Saint-Mandé.

À la clôture de son édition 2021, le forum de la topographie 2022 a été annoncé, en présence de son directeur délégué aux formations Thierry Vasseur, au lycée Gaudier-Brezeska de Saint-Jean-de-Braye (près d'Orléans) sur le thème de l'intégration des solutions connectées pour le suivi de la réalisation des chantiers. Rendez-vous est pris pour le jeudi 17 novembre prochain. Notons-le. ●

<sup>1</sup> <https://www.publi-topex.com/librairie/30>



## La Base adresse nationale vers un véritable commun

■ Elise LADURELLE TIKRY - Loïc REBOURS

Romain BUCHAUT - Pierre NGUYEN TRONG

Carole LECOMTE - Jérôme BOUTET - Azad POLAT

*En application de la directive européenne INSPIRE, le guide européen sur l'adresse fournit la définition de l'adresse comme l'identification de la localisation fixe d'un bien au moyen d'une composition structurée de dénominations géographiques et d'identifiants. Tous les acteurs s'accordent sur le principe qu'il existe une notion sémantique et une notion géographique de l'adresse.*

Les utilisateurs professionnels de l'adresse sont potentiellement très nombreux : services de secours, acteurs de la sécurité civile, opérateurs de réseaux (fibre, électricité, gaz, télécom), éditeurs de solutions GPS, toute entreprise ou tout service public ayant un service des clients-usagers, tout bureau d'étude ou toute administration utilisant les techniques de traitement de données géomatiques, toute structure ou personne souhaitant réaliser une cartographie à partir d'un fichier comportant des adresses, etc. L'activité entière de certains utilisateurs est dépendante de la qualité de la base Adresse.

Dans le cadre de ses actions d'animation, l'Afigéo a réactivé en 2021 un groupe de travail dédié aux données Adresse. L'association publie en ce début d'année un rapport de synthèse de ses travaux *"La Base Adresse Nationale vers un véritable commun"*, figure 1, qui a pour objectifs :

- de valoriser les usages quotidiens et les attentes d'organisations publiques et privées ;
- de nouer un dialogue et des échanges constructifs avec les grands opérateurs français de l'Adresse ;
- de permettre une prise en compte des besoins des usagers de l'Adresse et de leur capacité à contribuer à la montée



Figure 1. La Base adresse nationale vers un véritable commun.

en qualité d'une base unifiée, consolidée et pérenne, d'autant que la voirie est au cœur de nombreux métiers, à savoir ceux relatifs à la gestion de l'existant, l'aménagement du territoire, l'équipement en réseaux divers, à l'urbanisme, à la sécurité civile, aux actions foncières et cadastrales, aux études statistiques, à la livraison de fournitures et aux services de toute nature.

L'utilisation d'adresses partagées par tous sous forme d'une base de données Adresse fiable, unique, univoque, à jour et ouverte est un gage majeur de performance pour de nombreuses activités économiques ou sociales (sécurité civile, livraison...)

En 2011, l'Afigéo publiait un premier rapport *"Pour une politique nationale de la donnée Adresse"*<sup>1</sup> qui posait les bases d'une coordination nationale pour organiser la production d'un référentiel Adresse efficace et non nominatif sur tout le territoire français.

Puis en 2014, le projet d'une Base adresse nationale (BAN) entre le département Etalab de la direction interministérielle du numérique (DINUM),

<sup>1</sup> <https://www.afigeo.asso.fr/publications/rapport-sur-les-donnees-adresse/>



département coordonnant notamment la conception et la mise en œuvre de la stratégie de l'État dans le domaine de la donnée, l'Institut de l'information géographique et forestière (IGN), La Poste, la Direction générale des Finances publiques (DGFiP), l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) et *Open Street Map* (OSM) a permis des avancées. Il existe également, à l'échelle locale, des expériences partenariales réussies. L'application d'une licence ouverte (LO) à la BAN en janvier 2020 et la création d'une start-up d'État au sein de l'Agence nationale de la cohésion des territoires (ANCT) ont redonné une nouvelle dynamique à la constitution d'une base nationale.

Ainsi la BAN, un projet de convergence des bases Adresse nationales, a été formalisé par convention signée en avril 2015 par tous les partenaires. Elle a permis de constituer une base de données socle sur laquelle les communes peuvent intervenir via un outil de gestion des adresses. Cette base est devenue l'un des neuf référentiels du service public de la donnée, créé par la loi "République numérique", dite loi Lemaire, du 7 octobre 2016.

Toutefois, le projet restait peu lisible du fait de la coexistence de plusieurs licences de réutilisation des données



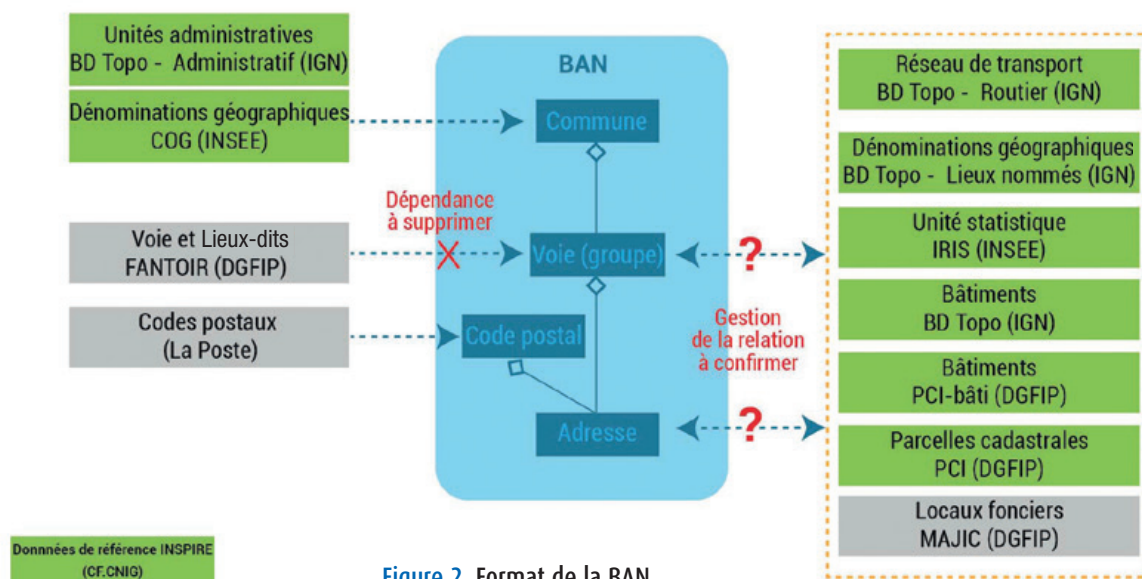


Figure 2. Format de la BAN.

et du maintien de produits commerciaux. Suite à une remarque de la Cour des comptes du 11 décembre 2018, le Premier ministre a demandé à la direction interministérielle du numérique (DINUM) de piloter la BAN et de la rendre gratuite, avec licence ouverte au 1<sup>er</sup> janvier 2020. Cette décision a clarifié les conditions de réutilisation de la base et donné un nouvel élan au projet.

La démarche nationale est venue compléter et dynamiser la mise en place d'initiatives locales portées par des acteurs territoriaux (collectivités territoriales, établissements publics de coopération intercommunale [EPCI], syndicats mixtes, plateformes territoriales de données géographiques) pour accompagner les communes à produire et diffuser facilement leurs adresses. L'association des ingénieurs territoriaux de France (AITF) a proposé un format simple et interopérable avec la BAN : le format Base adresse locale (BAL). Cette démarche a convergé vers la nouvelle BAN portée par la DINUM, qui intègre directement les données issues des BAL (figure 2).

Lors de son conseil plénier du 1<sup>er</sup> décembre 2021, le Conseil national de l'information géolocalisée (CNIG) a posé les principes de la nouvelle gouvernance BAN. Désormais, la commune crée les adresses et est seule compétente pour dénommer les voies, apporter une numérotation aux bâtiments et pour certifier la retranscription des arrêtés et des délibérations dans la BAN. La commune devient

non seulement responsable de la création des adresses, mais également se trouve seule compétente sur la base de données locale. Les communes peuvent réaliser leur Base adresse locale (BAL) en autonomie avec les outils [mes-adresses.data.gouv.fr](https://mes-adresses.data.gouv.fr). Elles peuvent aussi être accompagnées par des structures publiques (plateformes territoriales de données géographiques, EPCI, départements, syndicats mixtes) dans le cadre d'une mutualisation ou une politique publique dédiée, ou par des structures privées dans le cadre d'une commande publique.

La donnée Adresse devrait donc en 2022 connaître de nouvelles avancées, auxquelles le rapport contribue.

Le groupe de travail de l'Afigéo, co-animé par Loïc Rebours (Enedis) et Romain Buchaut (CRIGE PACA), remercie les 350 participants au cycle de webinaires entièrement consacrés aux usages de l'Adresse en 2021. Les témoignages suivants illustrent l'engagement suscité par cette mise en commun :

- "L'Afigéo est convaincue que pour mettre en œuvre et administrer une donnée aussi stratégique que l'Adresse, l'animation de communautés de producteurs et utilisateurs est essentielle. C'est ce que font de nombreux territoires pour sa coproduction raisonnée, il reste désormais au niveau national à accompagner le mouvement pour doter enfin la France d'un référentiel unique et de qualité. C'est dans cet objectif que cette publi-

cation s'inscrit, car elle tient compte de la diversité des besoins des usagers."

Jean-Marie Sèité, président de l'Afigéo.

- "La publication du groupe de travail Adresse de l'Afigéo converge avec ce qui a été établi lors de la relance du CNIG. Il faut maintenant opérationnaliser cela, autour des commissions du CNIG et de l'adresse lab." Bertrand Monthubert, président du conseil national de l'information géolocalisée (CNIG).

- "Nous remercions le groupe de travail Adresse de l'Afigéo pour ce travail qui permet de disposer d'une base solide de l'expression de besoin des utilisateurs représentés pour les futurs travaux autour de la BAN." Frédérique Williams, IGN.

- "Pour les Services d'incendie et de secours, la donnée Adresse géolocalisée est primordiale. Elle est la clé de voûte pour localiser un sinistre, assurer une intervention et une prise en charge la plus rapide possible." Amélie Méchenin, Service cartographie – SDIS de Haute-Savoie (74).

La figure 3, présente le fonctionnement général de la BAN, ses diverses composantes et leurs interactions. Il permet d'avoir une vision globale et une compréhension partagée de la base, tout en mettant en évidence la nécessité de fluidifier les échanges.

L'étude analyse en détail la problématique de la constitution, à l'échelle des communes, de la BAN, les façons de remployer les données, les retours d'expérience sur l'utilisation quotidienne qui





# Le Conseil national de l'information géographique (CNIG) se renouvelle pour renforcer la gouvernance de la donnée géolocalisée au service des transitions écologique et numérique

■ Bertrand MONTHUBERT - Pierre LAULIER

*Annoncé lors de son comité plénier le 1<sup>er</sup> décembre, le CNIG étend son champ d'action et renforce son rôle central dans le pilotage de la géodonnée en devenant le Conseil national de l'information géolocalisée.*

Le Conseil national de l'information géographique (CNIG) a pour mission d'éclairer le gouvernement dans le domaine de l'information géographique et de coordonner les contributions des acteurs concernés. Sa particularité est de rassembler en un lieu unique la très grande variété d'acteurs qui composent l'écosystème de la géodonnée en France : ministères, établissements publics, collectivités territoriales, entreprises privées, associations professionnelles, associations de citoyens, qui peuvent se rencontrer, décider et co-produire ensemble. Plus de 500 personnes ont contribué, ces dernières années, aux travaux des différentes commissions du CNIG.

La donnée géolocalisée connaît un essor spectaculaire. Elle est essentielle pour la compréhension du territoire, et nous disposons de données de plus en plus précises permettant de nouveaux usages. Mais également, de plus en plus de données deviennent géolocalisées, dans des secteurs qui ne relèvent pas traditionnellement de l'information géographique. La santé, qui à l'heure de la Covid-19 suppose de connaître les déplacements des personnes infectées pour comprendre les mécanismes de propagation de la pandémie, en est un exemple. À l'heure du changement

climatique où des phénomènes systémiques interagissent de manière de plus en plus complexe, la constitution de données de plus en plus précises, interopérables et largement partagées devient indispensable au développement de services utiles à la transition écologique, à la prévention des risques, à la sécurité, aux services de secours, à la sauvegarde de la biodiversité... De plus, l'information géolocalisée est aujourd'hui produite par de nombreux acteurs, y compris par les particuliers : de nouveaux modèles de gouvernance doivent être inventés.

Se plaçant dans le contexte du rapport de Mme la députée Valéria Faure Muntian sur les données géographiques souveraines, et du rapport de M. le député Eric Bothorel *"pour une politique publique de la donnée"*, Mme la ministre de la Transition écologique a nommé Bertrand Monthubert président du CNIG et lui a confié la mission d'une part, de relancer au plus vite l'action du Conseil national de l'information géographique, en matière de coordination des acteurs de la donnée géographique, de collaboration entre ces acteurs autour de projets communs et de production des outils nécessaires à la qualité, la diffusion et la réutilisation de la donnée géographique, et d'autre part, de préparer une proposition au gouvernement de réforme des missions, de la composition et de la gouvernance du Conseil national de l'information géographique visant à conforter celui-ci dans son rôle pivot de pilotage de la donnée géographique et à établir la donnée géographique comme un point d'appui pour la connaissance des territoires et de la transition écologique.

## Des travaux de concertation pour définir un nouveau CNIG

Afin de lancer le travail de concertation avec les acteurs, et définir en commun les grands axes de travail pour le CNIG, un travail de réflexion a été mené sous forme de deux ateliers durant l'été 2021. Ces ateliers ont impliqué un grand nombre d'acteurs publics et privés, territoriaux ou nationaux, de haut niveau de décision ou d'expertise. Vingt-sept entités (ministères, organismes, associations d'élus, associations professionnelles, entreprises) étaient représentées.

Les échanges lors de ces deux ateliers ont permis de montrer l'envie de l'ensemble des acteurs de participer à la relance du CNIG et d'identifier les attentes fortes et partagées vis-à-vis de son action. Ils ont de ce point de vue parfaitement préfiguré la dynamique de collaboration et de concertation souhaitée pour le CNIG.

La synthèse de ces ateliers a permis de dégager des axes forts pour la relance du CNIG et d'identifier les chantiers prioritaires sur lesquels le CNIG doit se pencher :

- renforcer le rôle stratégique du CNIG et son rôle de conseil au gouvernement ;
- renforcer le rôle de concertation et de coordination entre les producteurs à tous les échelons, notamment avec les collectivités ;
- renforcer le rôle clé du CNIG dans la production de standards, de méthodes, de préconisations pour la production, la diffusion, l'utilisation et le traitement des données géographiques ;



- favoriser les échanges, fédérer l'innovation, animer l'écosystème et être un lieu de réflexion prospective pour traiter les sujets émergents, faire le lien avec des écosystèmes connexes, et favoriser la communication, l'information, l'acculturation et le développement des compétences sur l'information géographique.

Un conseil plénier a été réuni le 1<sup>er</sup> décembre pour décider des évolutions à mettre en œuvre pour le renouveau du CNIG.

## Le conseil plénier renouvelé du 1<sup>er</sup> décembre

En introduction de la réunion du conseil plénier du CNIG le 1<sup>er</sup> décembre, Mme la ministre de la Transition écologique, Barbara Pompili, a déclaré : *"Je souhaite que le CNIG devienne un point central du pilotage et de coordination de l'information géolocalisée. Ce conseil a tous les atouts pour devenir une instance au service à la fois de notre transition écologique, de notre souveraineté numérique et de notre développement économique. Le CNIG doit devenir le Conseil national de l'information géolocalisée"*.

Au cours de la réunion, Thomas Lesueur, commissaire général au développement durable, a insisté sur l'importance du CNIG *"pour créer de la confiance, de la réflexion, du partage, de la définition de standards et de référentiels au service du défi considérable de la transition écologique"*. Sébastien Soriano, directeur général de l'IGN, a proposé de *"rassembler les acteurs qui ont envie de partager des défis communs"* au sein de la *"fabrique de géo-communs"* mise en place à l'IGN.

Bertrand Monthubert a conclu : *"L'information géolocalisée prend une place croissante dans notre société : de nombreux services en dépendent et nous devons nous coordonner pour répondre de manière souveraine aux besoins des citoyens, de notre société, de notre planète."*

Lors de cette réunion du Conseil plénier du CNIG, plusieurs décisions ont été prises : lancement d'un chan-

tier de rassemblement des données au service de la transition écologique, d'une étude sur le développement de la filière économique de la géodonnée, association à la démarche des Géo-communs de l'IGN, contribution au déploiement et à l'accélération de la Base adresse nationale. Dix nouveaux standards de données géographiques ont également été adoptés par le conseil plénier.

Une nouvelle organisation du CNIG accompagne cette ambition avec la création de nouveaux pôles et nouvelles commissions, dont un pôle "innovation et prospective" et un pôle de "coordination avec les territoires".

## Nouvelle organisation du CNIG

Tout d'abord, il faut revenir sur le changement de nom du CNIG. Celui-ci doit être compris comme une extension de son champ d'intervention.

Le terme "géographique", même s'il peut en vérité recouvrir un champ très vaste, peut sembler restreindre le champ d'intervention du CNIG à des données de description topographique du territoire, alors qu'il doit s'intéresser à toute donnée comportant une composante localisée qui en augmente sa valeur, en particulier pour servir de base à son croisement avec d'autres données.

Par exemple, des données localisées de santé pourraient être exclues du champ d'un conseil national de l'information géographique, alors qu'elles peuvent participer à constituer un ensemble de données interopérables, si elles s'établissent dans le respect de standards, de règles communes aux informations géolocalisées.

Le CNIG devient ainsi le conseil national de l'information géolocalisée.

La composition du conseil plénier du CNIG sera élargie à de nouveaux membres pour mieux prendre en compte l'évolution des acteurs producteurs et utilisateurs de l'information géolocalisée.

Cette évolution sera traduite dans un nouveau décret relatif au CNIG en cours de rédaction. Cependant,

sans attendre la modification du décret, ceux-ci pourront participer aux prochaines réunions du conseil plénier au titre d'invités, comme ce fut le cas pour la réunion du 1<sup>er</sup> décembre.

Le CNIG se positionne comme un facilitateur de l'action collective, il n'a de force que dans la réunion des acteurs qui voudront travailler, coopérer et décider ensemble.

## Nouveaux pôles et nouvelles commissions

Le rôle du CNIG comporte trois grands axes, qui structurent la nouvelle organisation :

- rôle prospectif pour définir les axes stratégiques et orienter les travaux ;
- rôle de coordination des acteurs pour une production de données mutualisées et partagées ;
- rôle de rassemblement de l'expertise pour produire des avis, standards, recommandations.

Ainsi l'organisation comprend :

- le pôle "innovation et prospective", en réponse au besoin d'identifier les sujets qui orienteront les travaux du CNIG. Au sein de ce pôle, trois commissions sont créées :
  - la commission besoins et usages, traitera de l'analyse des besoins et l'exploration des nouveaux usages ;
  - la commission Europe et international, qui participera à la veille sur les sujets et projets européens et internationaux en réalisant du benchmarking, et en établissant des contacts avec les autres pays européens, notamment sur les aspects de gouvernance et de modèles économiques ;
  - la commission modèles économiques, traitera des enjeux de l'impact de la donnée géolocalisée sur le développement économique, ainsi que du modèle économique de la production et de l'utilisation des données géographiques.
- le pôle de "coordination avec les territoires", en réponse à la demande de coordination des acteurs de la donnée géographique, et de collaborations de ces acteurs autour de projets communs, en remplacement





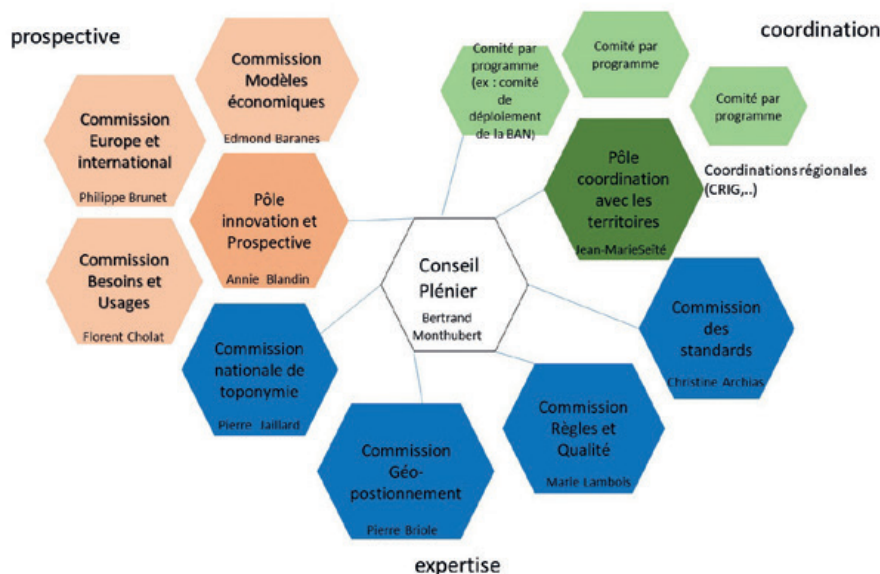
Les président(e)s de pôle et de commission :

Commission	NOM	Éléments de biographie
<b>Innovation prospective</b>	Mme Annie Blandin	Annie Blandin est professeur à l'IMT Atlantique, au sein du département "Systèmes réseaux, cybersécurité et droit du numérique" et titulaire d'une chaire d'excellence Jean Monnet.
<b>Coordination avec les territoires</b>	M. Jean-Marie Séité	Architecte, urbaniste, professeur au CNAM, vice-président du parc naturel de Corse, maire de Galeria (2B), vice-président de la communauté de communes de Calvi-Balagne, président de l'Afigéo.
<b>Besoins et usages</b>	M. Florent Cholat	Maire de Champagnier (38). Conseiller métropolitain de Grenoble Alpes Métropole, délégué au développement du numérique, à l'innovation digitale et à la gestion publique de la donnée. Enseignant à l'Institut d'urbanisme et de géographie alpine.
<b>Modèles économiques</b>	M. Edmond Baranes	Professeur d'économie à l'université de Montpellier, ses travaux de recherche portent sur l'économie du numérique, de l'énergie, la concurrence et la régulation.
<b>Europe et international</b>	en cours de désignation	
<b>Standards</b>	Mme Christine Archias	Directrice du CRIGE-PACA (Centre de ressources en informations géographiques), vice-présidente de l'Afigéo.
<b>Règles et Qualité</b>	Mme Marie Lambois	Cheffe de projet normalisation à l'IGN. Cheffe de projet Métadonnées au DGIWG. Représentante française au groupe de maintenance technique d'INSPIRE.
<b>Toponymie</b>	M. Pierre Jaillard	Administrateur de l'INSEE, Président du groupe d'experts des Nations Unies sur les noms géographiques (GENUNG).
<b>Géopositionnement</b>	M. Pierre Briole	Geophysicien, directeur de recherche au CNRS, il participe aux développements de l'utilisation en géophysique du GNSS et de l'imagerie radar différentielle à partir de satellites.



de la commission "animation territoriale" qui aura pour rôle d'organiser la concertation avec les structures de concertation régionales et les comités de suivi ou de déploiement des programmes nationaux ;

- la commission "règles et qualité", en réponse à la demande de production d'outils nécessaires à la qualité, la diffusion, la réutilisation de la donnée géographique, remplace la commission "règles de mise en œuvre" ;
- la commission des standards, qui reprend les activités de la commission "données" en les recentrant sur la standardisation et les préconisations sur les données ;
- la commission nationale de toponymie, chargée de contribuer à la conservation et au développement cohérent du patrimoine toponymique de la France ;
- la commission géopositionnement chargée de mener des travaux relatifs aux techniques de géopositionnement à terre, en mer, sous la terre, sous les mers, dans les airs ou dans l'espace. ●



Organisation des pôles et commissions du CNIG

## Contacts



Bertrand Monthubert,  
président  
du CNIG,  
bertrand.mon-  
thubert@cnig.  
gouv.fr



Pierre Laulier,  
secrétaire général  
du CNIG,  
pierre.laulier@deve-  
loppement-durable.  
gouv.fr

# Mise à jour du registre de l'EPSG suite aux évolutions du RGF93

■ Thierry GATTACCECA

*L'IGN maintient un registre (IGNF) consacré aux références géodésiques françaises. En parallèle, l'IGN alimente le "registre géodésique" EPSG, devenu un standard de fait dans ce domaine. Les récentes évolutions du RGF93 ont entraîné une remise en question de la présentation de ce système de référence géodésique dans les registres, avec des impacts potentiellement significatifs pour les utilisateurs.*

## Le RGF93 dans les registres IGNF et EPSG : évolutions récentes

Le RGF93 (Réseau géodésique français 1993) a été mis en place et est maintenu par le service de géodésie et de métrologie (SGM) de l'IGN depuis 1993. Il a succédé à la "Nouvelle triangulation de la France" (NTF) et est actuellement le repère légal au sens du décret n° 2019-165 du 5 mars 2019 relatif au système national de référence de coordonnées et de l'arrêté correspondant<sup>1</sup>.

Comme demandé dans ce dernier, le SGM publie dans un registre au format XML (<https://registre.ign.fr/ign/IGNF/IGNF>) l'ensemble des informations concernant les repères de référence, les systèmes de référence de coordonnées, et les transformations entre repères sur les territoires français métropolitain et d'outre-mer. En parallèle, il alimente le registre EPSG<sup>2</sup> (dont le nom officiel est EPSG *geodetic parameter dataset*) de l'IOGP (*International Association of Oil & Gas Producers*) pour qu'y soient ajoutés les enregistrements correspondant à ces objets géodésiques.

Le RGF93 a connu depuis sa création deux étapes importantes, qualifiées d'opérations de maintenance : passage

<sup>1</sup> Arrêté du 5 mars 2019 portant application du décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 modifié portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics.

<sup>2</sup> European Petroleum Survey Group (1986-2005), absorbé par l'IOGP en 2005.

### ■ MOTS-CLÉS

RGF93, repère de référence géodésique, système de référence de coordonnées, EPSG *geodetic parameter dataset*

de la version 1 à la version 2 le 18 juin 2010, puis de la version 2 à la version 2b en janvier 2021. Initialement, les réalisations successives ont continué à porter le nom RGF93 et n'étaient pas distinguées dans les registres géodésiques. Mais le besoin en précision grandissant des utilisateurs, et la publication dans le registre EPSG de grilles de conversion altimétrique basées sur les versions successives du RGF93, ont contraint le SGM à établir une distinction plus nette entre ces réalisations. Depuis quelques mois, les fiches signalétiques des points géodésiques, publiées par l'IGN, précisent la version du RGF93 à laquelle sont associées les coordonnées.

### ■ Distinction entre les versions de RGF93 dans les registres

Depuis septembre 2021, la distinction est ainsi officielle dans l'EPSG et l'IGNF entre le RGF93 v1, le RGF93 v2 et le RGF93 v2b, correspondant à autant de codes différents dans le registre IGNF ou EPSG, avec pour corollaire une déclinaison pour tous les systèmes de référence de coordonnées associés. **Il faut noter que le code EPSG traditionnellement utilisé pour RGF93 a été conservé pour le RGF93 v1 et que de nouveaux codes ont été créés pour RGF93 v2 et RGF93 v2b.**

Pour rendre les choses encore plus complexes, EPSG duplique pour le RGF93 les CRS (*Coordinate Reference System*) géographiques : l'un est défini avec l'ordre (longitude, latitude), et l'autre avec l'ordre (latitude, longitude). Ce dernier enregistrement a pour but

d'être cohérent avec la version en cours (de 2008) de la norme ISO 6709 (représentation normalisée de la localisation des points géographiques par coordonnées), qui impose l'ordre (latitude, puis longitude), alors que le SGM de l'IGN, et d'autres acteurs de la sphère publique, utilisent et publient traditionnellement les coordonnées dans l'ordre (longitude, puis latitude). Mais l'EPSG a consenti à une exception pour la France, en acceptant de dupliquer les CRS géographiques en inversant l'ordre imposé par la norme. À noter que la version en cours de révision d'ISO 6709 n'imposera plus l'ordre (latitude, puis longitude) sauf si la rétrocompatibilité avec des données plus anciennes est requise.

### ■ Conséquences pour les utilisateurs

Les conséquences pour les utilisateurs sont nombreuses, mais la plupart dépendent de la précision des données concernées.

La plus significative est qu'il faut modifier le code EPSG associé aux données mises en référence dans RGF93 v2 et RGF93 v2b en utilisant les nouveaux codes créés en septembre 2021. Ce n'est pas simple, car l'utilisateur ne peut pas toujours savoir dans quelle réalisation du RGF93 sont ses données (et d'autant moins simple que jusqu'ici même l'IGN ne parlait que du RGF93 pour les données qu'il produisait, sans distinguer entre les réalisations). La réponse se trouve dans la date des observations, mais aussi la méthode de calcul utilisée et les coordonnées utilisées comme référence (RBF, RGP, pivot déterminé par l'utilisateur...). Dans le doute, il faudra conserver la version 1.

Une autre conséquence de cette distinction est que les utilisateurs voudront savoir comment transformer des coordonnées entre les repères "NTF", "RGF93 v1", "RGF93 v2" et "RGF93 v2b". Le SGM a demandé à l'EPSG d'ajouter



Nom	Code	Type	Remarque
RGF93 v1	4964	geocentric	Replaced by RGF93 v2 (CRS code 9775) from 2010-06-18.
RGF93 v2	9775	geocentric	Replaces RGF93 v1 (CRS code 4964) from 2010-06-18. Replaced by RGF93 v2b (CRS code 9780) from 2021-01-05.
RGF93 v2b	9780	geocentric	Replaces RGF93 v2 (CRS code 9775) from 2021-01-05.
RGF93 v1	4171	geographic 2D	See CRS code 7084 for alternate system with axes reversed used by IGN for GIS purposes. Replaced by RGF93 v2 (CRS code 9777) from 2010-06-18.
RGF93 v1 (lon-lat)	7084	geographic 2D	See CRS code 4171 for system with axes in sequence lat-lon to be used for air, land and sea navigation and safety of life purposes. Replaced by RGF93 v2 (lon-lat) (CRS code 9779) from 2010-06-18.
RGF93 v2	9777	geographic 2D	Replaces RGF93 v1 (CRS code 4171) from 2010-06-18. Replaced by RGF93 v2b (CRS code 9782) from 2021-01-05. See CRS code 9779 for alternate system with axes reversed used by IGN for GIS purposes.
RGF93 v2 (lon-lat)	9779	geographic 2D	Replaces RGF93 v1 (lon-lat) (code 7084) from 2010-06-18. Replaced by RGF93 v2b (lon-lat) (CRS code 9784) from 2021-01-05. See CRS code 9777 for system with axes in sequence lat-lon to be used for air, land and sea navigation and safety of life purposes.
RGF93 v2b	9782	geographic 2D	Replaces RGF93 v2 (CRS code 9777) from 2021-01-05. See CRS code 9784 for alternate system with axes reversed used by IGN for GIS purposes.
RGF93 v2b (lon-lat)	9784	geographic 2D	Replaces RGF93 v2 (lon-lat) (CRS code 9779) from 2021-01-05. See CRS code 9782 for system with axes in sequence lat-lon to be used for air, land and sea navigation and safety of life purposes.
RGF93 v1	4965	geographic 3D	See CRS code 7042 for alternate system with horizontal axes reversed used by IGN for GIS purposes. Replaced by RGF93 v2 (CRS code 9776) from 2010-06-18.
RGF93 v1 (lon-lat)	7042	geographic 3D	See CRS code 4965 for system with horizontal axes in sequence lat-lon to be used for air, land and sea navigation and safety of life purposes. Replaced by RGF93 v2 (lon-lat) (CRS code 9778) from 2010-06-18.
RGF93 v2	9776	geographic 3D	Replaces RGF93 v1 CRS code 4965) from 2010-06-18. Replaced by RGF93 v2b (CRS code 9781) from 2021-01-05. See CRS code 9778 for alternate system with horizontal axes reversed used by IGN for GIS purposes.
RGF93 v2 (lon-lat)	9778	geographic 3D	Replaces RGF93 v1 (lon-lat) from 2010-06-18. Replaced by RGF93 v2b (lon-lat) (CRS code 9783) from 2021-01-05. See CRS code 9776 for system with horizontal axes in sequence lat-lon to be used for air, land and sea navigation and safety of life purposes.
RGF93 v2b	9781	geographic 3D	Replaces RGF93 v2 (CRS code 9776) from 2021-01-05. See CRS code 9783 for alternate system with horizontal axes reversed used by IGN for GIS purposes.
RGF93 v2b (lon-lat)	9783	geographic 3D	Replaces RGF93 v2 (lon-lat) (CRS code 9778) from 2021-01-05. See CRS code 9781 for system with horizontal axes in sequence lat-lon to be used for air, land and sea navigation and safety of life purposes.

**Table 1.** Extraction depuis le site de l'EPSG (v10.051) des codes relatifs aux CRS associés au RGF93 (mise à jour du 28 janvier 2022).

deux transformations dans le registre : une transformation nulle entre RGF93 v1 et RGF93 v2 avec une incertitude de 5 cm à 1 sigma, et une transformation de Helmert à 7 paramètres entre RGF93 v2 et RGF93 v2b, avec une précision infracentimétrique. En effet, il n'a pas été possible de modéliser par les méthodes traditionnelles l'écart entre RGF93 v1 et RGF93 v2, chaque point du RBF et chaque station du RGP ayant été recalculé de manière globale en 2010 et présentant des écarts non homogènes de proche en proche avec les positions antérieures (atteignant jusqu'à 10 cm en planimétrie et en altimétrie pour les valeurs extrêmes sur le RBF, et 5 cm en planimétrie et en altimétrie pour les valeurs extrêmes sur le RGP). *A contrario*, les écarts entre RGF93

v2 et RGF93 v2b (5 mm en planimétrie, 15 mm en altimétrie) ont pu être modélisés par une transformation à 7 paramètres classique. Quant à la transformation entre NTF et RGF93, le SGM et l'EPSG ont décidé de définir la transformation avec la même grille gr3df97a entre la NTF et les trois réalisations publiées de RGF93, car la précision de ce modèle de transformation (2 à 5 cm à 1 sigma) correspond aux écarts entre les différentes versions du RGF93. Dans le registre IGNF aussi, cela se traduit par une copie conforme de la transformation existante entre NTF et RGF93 v1 pour passer également de la NTF au RGF93 v2 ou v2b. Ces changements posent aussi la question de l'automatisation des concaténations de transformation par

les logiciels utilisant le registre EPSG ; ces outils doivent impérativement apprendre à utiliser l'information relative à la précision de ces transformations afin de construire la transformation la plus adaptée pour passer d'un repère (1) à un repère (2). Exemple : actuellement, un outil automatique qui chercherait dans l'EPSG une transformation entre NTF et RGF93 v2b trouverait les transformations NTF vers RGF93 v1 (transformation avec grille), RGF93 v1 vers RGF93 v2 (transformation nulle), et RGF93 v2 vers RGF93 v2b (transformation à 7 paramètres). Mais il trouverait également un autre chemin : NTF vers RGF93 v1 (transformation avec grille), RGF93 v1 vers WGS 84 (transformation nulle) et WGS 84 vers RGF93 v2b (transformation nulle). Seule l'analyse

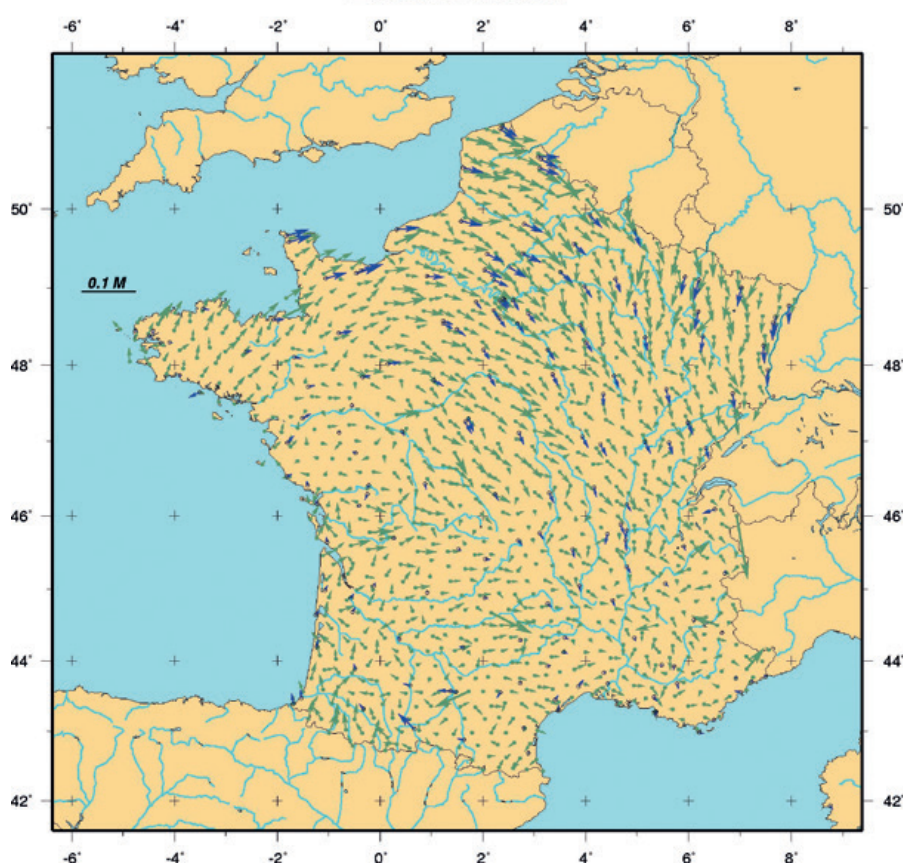


Figure 1. Carte des écarts planimétriques sur les points du RBF entre RGF93 v1 et RGF93 v2.

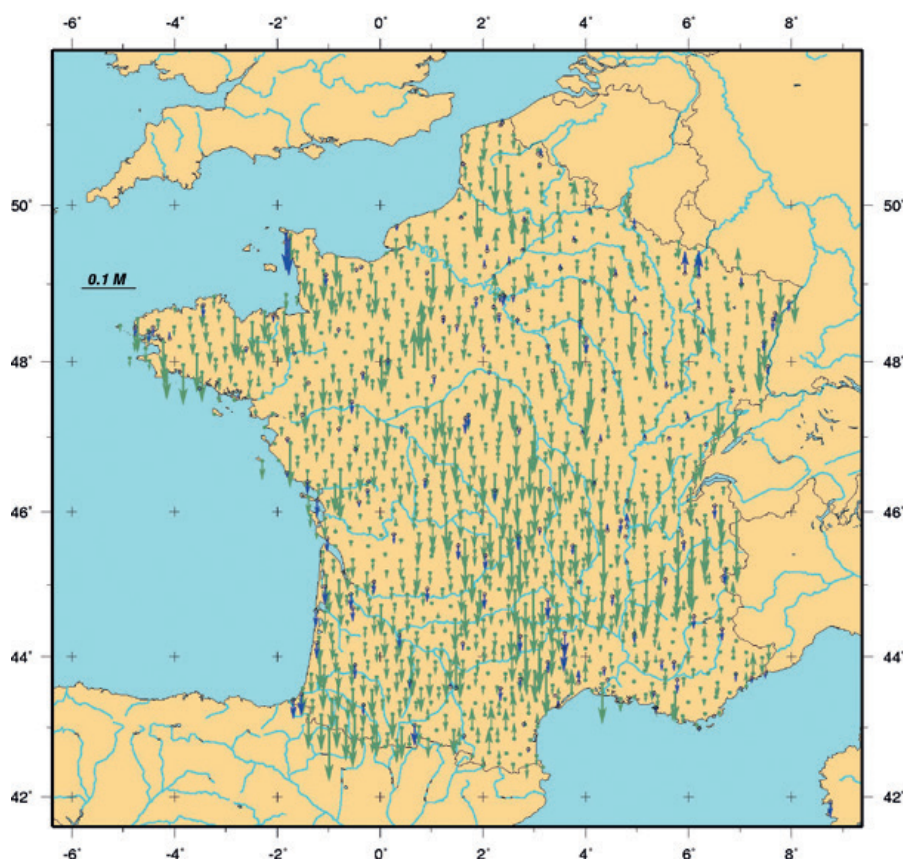


Figure 2. Carte des écarts altimétriques sur les points du RBF entre RGF93 v1 et RGF93 v2.

des incertitudes associées à ces transformations permettrait de choisir la combinaison la mieux adaptée. Mais comme cette incertitude est, dans le cas des deux dernières transformations, dissimulée dans les champs *Scope* et *Remarks* du registre EPSG, elle n'est pas vraiment interprétable ou directement exploitable sans intervention humaine...

### ■ Les nouvelles grilles de conversion altimétriques dans le registre EPSG

La grille RAF18b a été publiée en janvier 2021 par l'IGN pour accompagner le passage à RGF93 v2b. Elle a été ajoutée dans le registre EPSG en septembre 2021, en association avec le RGF93 v2b nouvellement créé.

La grille RAF20 a été publiée en septembre 2021 (avec Circé "Service Public" v5.3.1), et ajoutée dans les registres IGNF et EPSG le même mois (code EPSG 9876). Remarquons que l'EPSG duplique systématiquement ce type de grille dans son registre pour disposer d'une alternative totalement réversible.

Ainsi, pour RAF20, nous avons :

- code EPSG 9876 = longitude, latitude, et hauteur ellipsoïdale RGF93 v2b vers altitude NGF-IGN69 (5<sup>e</sup> version de cette transformation, non réversible car l'information sur les coordonnées géographiques de départ est "perdue") ;
- code EPSG 9877 = longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale RGF93 v2b vers longitude et latitude RGF93 v2b + altitude NGF-IGN69 (5<sup>e</sup> version de cette transformation, réversible car l'information sur les coordonnées géographiques de départ est conservée).

### ■ Synchronisation entre les registres

Les différents intermédiaires et les réunions programmées des comités de validation de l'IOGP font qu'il n'est pas toujours possible d'avoir une cohérence parfaite à un instant (t) entre IGNF et EPSG. Une première version du registre est habituellement publiée sur <https://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/IGNF.xml>. Ce registre est transmis par l'IGN au pôle technique Géoportail pour publication sur <https://registre.ign.fr/ign/IGNF/>





Nom	Code	Type	Remarques
RGF93 v1 to WGS 84 (1)	1671	transformation	Approximation at the 1m level assuming that ETRS89 is equivalent to WGS 84 within the accuracy of the transformation. (RGF93 v1 is a national realization of ETRS89).
RGF93 v2 to WGS 84 (1)	9791	transformation	Approximation at the 1m level assuming that ETRS89 is equivalent to WGS 84 within the accuracy of the transformation. (RGF93 v2 is a national realization of ETRS89).
RGF93 v2b to WGS 84 (1)	9792	transformation	Approximation at the 1m level assuming that ETRS89 is equivalent to WGS 84 within the accuracy of the transformation. (RGF93 v2b is a national realization of ETRS89).

Table 2. Transformations nulles<sup>3</sup> ajoutées dans le registre EPSG (à partir de la v10.039) entre RGF93 et WGS 84.



IGNF/, mais le délai de publication peut être parfois supérieur à trois semaines... ce qui introduit un premier décalage. Pour ajouter les enregistrements nouveaux dans l'EPSG, l'IGN remplit un formulaire Excel "data submission" (accompagné de documents techniques tels qu'un rapport de calcul), ce qui, après acceptation, conduit à une publication dans une nouvelle version du registre EPSG dans un délai variable (habituellement une à plusieurs semaines). Ce n'est qu'une fois le nouveau registre EPSG publié qu'il devient possible de rajouter les nouveaux codes EPSG dans le registre IGNF afin d'obtenir une cohérence complète entre les deux registres.

## Conclusion

L'alimentation de ces registres par l'IGN a trois objectifs :

- amélioration de la qualité et de la sécurité des données de localisation, en fournissant des informations de qualité garantie sur les systèmes de référence de coordonnées et les transformations entre ces systèmes ;
- augmentation de la disponibilité de ces informations géodésiques, en permettant aux utilisateurs de les trouver et de les comprendre dans un environnement lisible à la fois par l'homme et la machine ;

<sup>3</sup> Le champ "Scope" précise en outre : "Approximation for medium and low accuracy applications assuming equality between plate-fixed static and earth-fixed dynamic CRSs, ignoring static/dynamic CRS differences."

- mieux répondre à l'exigence de traçabilité des données imposée par les textes réglementaires.

Si le premier objectif peut être considéré comme atteint actuellement, le second se heurte à quelques difficultés. Par exemple, IGNF ne contient pas de transformation nulle entre repères de référence. D'autre part, ni IGNF ni EPSG ne peuvent être utilisés directement ou de manière complètement automatisée par PROJ (bibliothèque permettant de réaliser des transformations entre coordonnées planes très largement utilisée) : des scripts d'importation traduisent les informations des deux registres IGNF et EPSG (entre autres) dans une base de données SQLite3 unifiée lisible par PROJ et, idéalement, cette base de données devrait être mise à jour chaque fois qu'un des registres source est modifié. ●

## Contact

Thierry Gattacceca

Département information géodésique  
Service de géodésie et de métrologie - IGN  
Thierry.Gattacceca@ign.fr

## ABSTRACT

IGN maintains a register (IGNF) devoted to French geodetic references. At the same time, IGN contributes to the EPSG "geodetic register", which has become a de facto standard in this field. Recent developments in RGF93 have called into question the presentation of this geodetic reference system in the registers, with potentially significant impacts for users.



## DIRECTION MADAGASCAR POUR LES FUTURS GÉOMÈTRES !

Six étudiants de l'École supérieure des géomètres topographes (ESGT) au Mans se préparent à mettre le cap sur Madagascar pour une mission humanitaire. Dans le cadre de l'association **Topo sans Frontières**, qui envoie chaque année des étudiants dans le monde entier pour réaliser des travaux topographiques, ils partiront de juin à septembre 2022.

Originaires de toute la France et de cursus scolaires différents, ils se sont retrouvés au Mans pour devenir **ingénieur géomètre topographe** et avec l'objectif commun de mettre à profit leurs compétences pour aider des populations dans le besoin.

Ils donneront tout d'abord des **cours théoriques et pratiques** aux étudiants de l'École supérieure polytechnique d'Antananarivo.

Puis, ils se rendront à Diégo-Suarez, au nord de l'île pour **cartographier des zones de pêche** et des terrains pour des collectivités locales en collaboration avec l'association C3.



Ces 10 semaines de travaux bénévoles ont un coût pour ces jeunes étudiants (transports, santé, hébergement, nourriture, etc.)

Ils ont donc besoin de **17 000 €** pour mener à bien ce projet et sont actuellement à la recherche de **partenaires** ou **donateurs** qui pourraient leur venir en aide. Ils réalisent déjà de nombreuses actions telles que des ventes de viennoiseries et de charcuteries, mais cela n'est pas suffisant. C'est pourquoi vous pouvez les aider, simplement en faisant un don ou en partageant leur mission autour de vous.

Vous pourrez ensuite suivre toutes leurs aventures sur place à travers leurs réseaux sociaux.

Leur cagnotte :



Où les contacter :

f TSF Madagascar 2022  
tsf\_madagascar\_2022\_mission\_2  
tsf.madagascar2.2022@gmail.com



Diégo-Suarez

Antananarivo

# Lettre ouverte pour une mutualisation des moyens pour le développement d'un logiciel de compensation et d'auscultation

■ Thomas TOUZÉ

Si par rapport à nos confrères et consœurs germanophones, la culture des ajustements par moindres carrés des mesures topométriques est relativement peu développée en France, nous ne manquons pas de logiciels ni de pôles de compétences en ce domaine. Ainsi, nous pouvons citer l'IGN avec COMP3D, l'ESGT avec COMET, votre serviteur avec son prototype de Trinet++ et évidemment Geomedia avec les calculs topométriques de Covadis. Si nous l'étendons à la Suisse, on peut inclure le CERN avec LGC, Swisstopo avec LTOP et la HEIG-VD avec Trinet+.

Cette longue liste, qui n'est sans doute pas exhaustive, pourrait donner l'impression que cette thématique de la géodésie repose sur un socle solide. Or il s'agit peut-être d'un leurre. En effet, comment expliquer que les calculs effectués par les géomètres et topographes soient presque exclusivement effectués avec les calculs topométriques de Covadis, y compris dans des contextes de topométrie de précision ? Ce dernier logiciel, fonctionnel et pérenne, a le mérite d'exister et est adapté à la plupart des opérations classiques de topométrie, mais face aux logiciels alternatifs, nous considérons que pour les opérations requérant précision ou fiabilité, il ne correspond pas forcément au choix le plus judicieux. Ce constat repose notamment sur le travail d'intercomparaison de logiciels d'ajustements effectué par Stéphane Durand de l'ESGT et publié dans cette revue.

Mais comment un-e chef-fe d'entreprise pourrait raisonnablement miser sur les autres logiciels sans prendre de risque ? En effet, ceux-ci peuvent :

- ne pas être diffusés ;
- être développés et maintenus par une unique personne qui, aussi talentueuse qu'elle soit, partira un jour à la retraite, ce qui engendre un problème de pérennité ;
- être conçus pour des contextes spécifiques qui ne sont pas forcément adaptés à tous (mesures prises en charge, modèles fonctionnels et stochastiques) ;
- fournir des indicateurs de qualité qui ne sont pas forcément uniformisés ;
- avoir des formats en entrées et sorties plus ou moins difficiles.

Et si nous étendons la problématique aux outils d'auscultation, quelle solution alternative existe à celles proposées par Leica et Trimble au travers desquelles on nous vend comme un progrès la représentation de séries temporelles, sans presque aucun recours possible à l'état de l'art en compensation ?

Parmi les instituts cités ci-dessus ou parmi ceux auxquels je n'ai pas pensé (qu'ils me pardonnent !), nous trouvons des personnes éminemment talentueuses dans la programmation, dans la théorie et la méthodologie des compensations, dans le pilotage d'appareils, dans les bases de données, dans les modèles mathématiques et physiques, ou que sais-je encore. Cependant quel organisme peut se targuer de disposer en son sein de

toutes ces compétences ? Quel organisme peut lucidement admettre qu'il ne souffre pas présentement de compression de personnel ni de budget ?

Pardonnez ma naïveté, mais la seule solution que j'entrevois est le modèle collaboratif qui permettrait :

- de convenir d'un cahier des charges ;
- d'uniformiser les méthodes, modèles et procédures ;
- de fournir un logiciel, ou plus vraisemblablement une suite de logiciels, qui pourrait rapidement devenir un standard international (en effet, les constats faits ici sont valables partout) ;
- de transmettre des compétences aux utilisateurs ;
- de fournir des résultats plus exacts, plus précis et plus fiables et ce, de manière rigoureuse et incontestable. Certes, de nombreuses questions surviendront, tels le modèle économique, le type de licence, la supervision, etc. Mais commençons par nous réunir pour en discuter, ce ne sera certainement pas une perte de temps ni d'argent.

Si ce projet vous intéresse, en tant que potentiel contributeur ou utilisateur, écrivez-moi un courriel, s'il vous plaît ! ●

## Contact

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



# Généralisation des réfractions terrestres et bathymétriques : nouveau modèle dans le cas d'une stratification verticale de la célérité en Terre localement sphérique

■ Thomas TOUZÉ

*La question de la réfraction survient en topométrie et en bathymétrie selon des modèles distincts qui diffèrent, pour l'essentiel, dans le fait qu'en bathymétrie, des profils de célérité sont mesurés tandis qu'en topométrie est introduit le coefficient de réfraction qui permet de décrire la déviation du point de vue angulaire. De plus, les modèles proposés reposent sur la loi de Snell-Descartes ou sur l'équation eikonale. Dans cet article, dans un premier temps, nous montrons que la loi de Snell-Descartes implique l'équation eikonale. La substitution de l'indice de réfraction par la célérité, en considérant le problème de manière tensorielle, permet d'obtenir l'expression tensorielle de l'équation eikonale valable tant en topométrie qu'en bathymétrie et indépendante de tout système de coordonnées. La résolution de cette équation différentielle de second ordre nous permet de construire un modèle généralisé de la réfraction dans le cas spécifique de couches de célérité stratifiées verticalement en Terre sphérique. Nous obtenons un résultat qui généralise les formules de nivellement trigonométrique et qui sont compatibles avec des mesures d'un profil de célérité.*

## MOTS-CLÉS

Réfraction terrestre, réfraction acoustique, loi de Snell-Descartes, équation eikonale, nivellement trigonométrique, nivellement indirect, topométrie, hydrographie.

de ce problème. Ce point a été résolu grâce à la chaîne YouTube d'Eigenchris permettant d'apprendre à manipuler les tenseurs.

Cet article présente le fruit de ce travail mené, *in fine*, sur près de dix années. Il permettra au lecteur, nous l'espérons, de faire le lien entre les lois de Snell-Descartes et l'équation eikonale, de voir comment cette dernière s'exprime en Terre sphérique et d'en suivre la résolution pour un milieu de propagation stratifié verticalement. Cela nous permettra d'obtenir un modèle de réfraction qui généralise les équations du nivellement trigonométrique et qui sera également applicable au LiDAR et à la bathymétrie.

## État de l'art

La topométrie et la bathymétrie recourent à des systèmes de mesures de proximité basés sur la propagation d'ondes, respectivement, électromagnétiques dans l'air et acoustiques dans l'eau. Si dans les milieux dans lesquels se propagent nos ondes, les obstacles rencontrés sont de tailles nettement supérieures aux longueurs d'onde, les cas de diffractions peuvent être exclus. Il est alors possible de faire l'hypothèse d'une propagation localement rectiligne : dans le cas de l'électromagnétisme, c'est là le fondement de l'optique géométrique. Cependant les milieux que nos rayons traversent peuvent subir des changements brusques ou continus, de nature, de pression, de température ou de

## Introduction

La difficulté de la question de la réfraction s'est posée à nous en 2011 lorsqu'avec des étudiants de l'ENSTA Bretagne, au cours d'un projet ERASMUS sur le lac Vassivière, nous avons remarqué de très fortes erreurs de nivellement trigonométrique pour les longues visées, notamment celles à faible hauteur au-dessus du lac.

Par la suite, nous avons constaté que dans le contexte des réseaux d'auscultation d'ouvrages, la connaissance du coefficient de réfraction dans le modèle fonctionnel, ainsi que la prise en compte de l'effet de scintillement dans le modèle stochastique, étaient deux paramètres cruciaux dans la qualité des résultats. De plus amples études nous avaient

alors permis de définir des ordres de grandeur sur ces deux points, ainsi qu'une méthodologie des visées réciproques simultanées [Touzé et Hansen, 2019]. Ce travail avait ensuite mis en évidence que dans certains cas extrêmes en topométrie, un coefficient d'asymétrie devenait nécessaire en présence d'une forte perturbation thermique le long du trajet [Touzé et al., 2019].

Le fait d'être face à des enjeux de bathymétrie est alors devenu décisif puisque la réfraction est bien présente, mais traitée de toute autre manière. Ainsi, l'observation de profils de célérité en grande profondeur, avec la présence d'une thermocline, rendait évidente la nécessité d'un coefficient d'asymétrie. Il ne manquait plus que les outils mathématiques nécessaires à la résolution

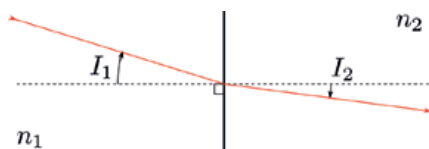
composition chimique par exemple, qui engendreront des phénomènes de réfraction ou de réflexion.

## ■ Modèles physiques

Deux modèles permettent de traiter la réfraction : la loi de Snell-Descartes et l'équation eikonale.

### Loi de Snell-Descartes

La réfraction est prise en compte dans les techniques terrestres de la topométrie, notamment en nivellement direct ou trigonométrique. Généralement la modélisation se fonde sur la loi de la réfraction de Snell-Descartes en *figure 1*, dans le cas discret de la présence d'un dioptre (voir illustration en *figure 2*).



**Figure 1.** Loi de la réfraction de Snell-Descartes dans le cas de la traversée d'un dioptre séparant deux milieux d'indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$ .

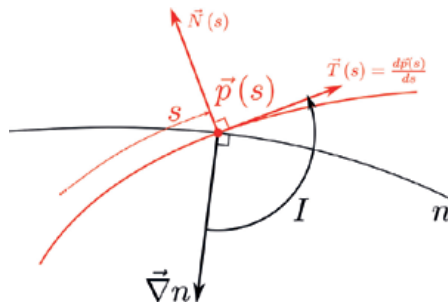
**Loi de Snell-Descartes, cas discret**  
 $n \sin I = \text{constante} \quad (\text{DSD})$

Cependant, en topométrie, la variation de l'indice de réfraction se fait de manière continue. Considérons donc la situation décrite en *figure 3* dans laquelle, la trajectoire  $\vec{p}(s)$  de notre



**Figure 2.** La réfraction dans trois milieux différents, l'air, l'eau et le verre<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9fraction#/media/>



**Figure 3.** La réfraction d'un chemin  $\vec{p}(s)$  dans le champ scalaire de l'indice de réfraction  $n$ .

rayon, paramétrée par son abscisse curviligne  $s$ , est déviée tout le long de sa traversée du champ scalaire de l'indice de réfraction  $n$ .

Prenons la différentielle totale de (DSD). Nous obtenons :

$$\delta I = -\frac{\delta n}{n} \tan I \quad (1)$$

Si nous considérons une section élémentaire  $\delta \vec{p}$ , de longueur  $\delta s$ , du trajet, l'indice de réfraction varie de  $\delta n$ . En considérant ce  $\delta n$  comme le travail du gradient de  $n$  le long d'une section élémentaire du rayon, nous pouvons noter que :

$$\delta n = \vec{\nabla} n \cdot \delta \vec{p} \quad (2)$$

En considérant que  $I$  est l'angle orienté, depuis  $\vec{\nabla} n$ , le gradient de  $n$ , vers la tangente au rayon  $\vec{T} = \frac{d\vec{p}}{ds}$ , autour de leur produit vectoriel, il est possible d'exprimer  $\delta n$  de la façon suivante :

$$\delta n = \|\vec{\nabla} n\| \cos I \delta s \quad (3)$$

À l'aide des résultats (1) et (3), nous pouvons obtenir l'expression de la loi de Snell-Descartes dans le cas continu [Touzé, 2018].

### Loi de Snell-Descartes, cas continu

$$\frac{dI}{ds} = -\frac{\|\vec{\nabla} n\|}{n} \sin I = \gamma \quad (\text{CSD})$$

Cette expression correspond à la courbure locale  $\gamma$  de notre rayon du fait de la réfraction [Torge, 2001]. Par définition de l'angle  $I$ , nous avons nécessairement  $\sin I \geq 0$ . De ce fait, selon la convention que nous avons choisie, la courbure  $\gamma$  est nécessairement négative.

Cette courbure étant liée à la dérivée seconde, si nous introduisons le second vecteur unitaire  $\vec{N}$  du repère de Frenet (voir *figure 3*), nous pouvons écrire les égalités suivantes :

$$\frac{d^2 \vec{p}}{ds^2} = \frac{d\vec{T}}{ds} = \frac{d\vec{T}}{dI} \frac{dI}{ds} = \gamma \vec{N} \quad (4)$$

Par conséquent, en appliquant (CSD) dans (4) :

$$\vec{N} = \frac{d\vec{T}}{dI} \quad (5)$$

### L'équation eikonale

L'équation eikonale est l'équation différentielle fondamentale de deuxième ordre qui décrit le trajet de la lumière dans un milieu donné. Elle peut être obtenue selon deux approches, le principe de Fermat et la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu réfractif [Guillaume, 2015]. Elle implique la loi de Snell-Descartes.

### Équation eikonale

$$\frac{d}{ds} \left[ n \frac{d\vec{p}}{ds} \right] = \vec{\nabla} n \quad (\text{E})$$

En développant cette expression, nous obtenons :

$$\frac{d^2 \vec{p}}{ds^2} = \frac{\vec{\nabla} n}{n} - \frac{1}{n} \frac{dn}{ds} \frac{d\vec{p}}{ds} \quad (6)$$

En reprenant le résultat (2), nous pouvons remplacer  $\delta n$  par un produit scalaire, ce qui donne :

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{ds} = \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \frac{d\vec{p}}{ds} \quad (7)$$

En introduisant ce résultat dans (6) nous obtenons une nouvelle formulation de l'équation eikonale qui est fort pratique pour du lancé de rayon, car la dérivation de  $n$  y est remplacée par un simple produit scalaire :

$$\frac{d\vec{T}}{ds} = \frac{\vec{\nabla} n}{n} - \left( \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{T} \right) \vec{T} \quad (8)$$

### Snell-Descartes implique l'eikonale

Par définition en section précédente, notre repère de Frenet est composé des deux vecteurs unitaires orthogonaux  $\vec{T}$  et  $\vec{N}$  (voir *figure 3*). Il est donc possible de définir le gradient de  $n$  dans la base formée par ces deux vecteurs :

$$\frac{\vec{\nabla} n}{n} = \left( \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{T} \right) \vec{T} + \left( \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{N} \right) \vec{N} \quad (9)$$

C'est-à-dire :

$$\frac{\vec{\nabla} n}{n} - \left( \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{T} \right) \vec{T} = \left( \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{N} \right) \vec{N} \quad (10)$$

Or, de par les définitions de notre angle  $I$  et du vecteur  $\vec{N}$  données précédemment et en *figure 3*, nous avons nécessairement :

$$\frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{N} = \frac{\|\vec{\nabla} n\|}{n} \cos \left( \frac{\pi}{2} + I \right) = -\frac{\|\vec{\nabla} n\|}{n} \sin I \quad (11)$$





En appliquant (CSD), (4) et (11) dans (10), nous obtenons donc :

$$\frac{\vec{\nabla} n}{n} - \left( \frac{\vec{\nabla} n}{n} \cdot \vec{T} \right) \vec{T} = \gamma \vec{N} = \frac{d\vec{T}}{ds} \quad (12)$$

Ce résultat, égal à (8), démontre que la loi de Snell-Descartes implique l'équation eikonale.

## Traitement de la réfraction en topométrie

### Nivellement direct

La réfraction fait partie des sources d'erreurs connues en nivellement direct [Rueger et Brunner, 2000]. Toutefois, elle n'est généralement pas prise en compte. En effet, si on fait les hypothèses de visées courtes, de portées sensiblement égales et à hauteurs à peu près constantes au-dessus du sol, alors les erreurs de réfraction sur les dénivelées sont, d'une part faibles, et, d'autre part, éliminées entre les lectures arrière et avant.

### Nivellement trigonométrique

On appelle nivellement trigonométrique, ou nivellement indirect, l'art d'obtenir des dénivelées  $\Delta H$  à partir d'observations tachéométriques. Pour ce faire, il est nécessaire de mesurer les hauteurs d'instrument et de prisme, respectivement notées  $h_I$  et  $h_S$ , les angles zénithaux  $\zeta$  et les distances inclinées  $D$ . La dénivelée s'exprime en fonction de la dénivelée brute  $h$  et des corrections  $E$ , pour la courbure de la Terre, et  $R$ , pour la réfraction. On a :

#### Nivellement Trigonométrique (NT)

$$\begin{cases} \Delta H = h + E - R & \text{avec} \\ h = h_I - h_S + D \cos \zeta \\ E - R = (1 - k) \frac{D^2 \sin^2 \zeta}{2R} \end{cases} \quad \text{NT}$$

Ce modèle, somme toute assez connu [AFTOPO], requiert le rayon de la Terre  $R$  et le coefficient de réfraction  $k$ . Deux hypothèses majeures permettent d'obtenir ce modèle : d'une part le fait que l'indice de réfraction forme des couches verticalement stratifiées et, d'autre part, que le trajet du rayon forme un arc de cercle.

Les valeurs couramment employées pour le coefficient de réfraction  $k$  sont 0.13 [Torge, 2001] ou 0.16 [AFTOPO]. La première de ces deux valeurs aurait été déterminée par Gauss lui-même. La seconde se déduit des conditions

standard de l'atmosphère terrestre, notamment pour un gradient de température de  $-6.5^\circ\text{C}$  pour une élévation de 1 000 m. Ces valeurs n'ont de sens que si la visée est suffisamment haute au-dessus du sol pour les effets thermiques du sol puissent être négligés. En topométrie classique, pour des visées couramment à hauteur d'homme, les valeurs de  $k$  peuvent être d'un autre ordre de grandeur [Hübner, 1977].

De plus, dans certains contextes, il peut arriver que les hypothèses de verticalité ou d'arc de cercle doivent être abandonnées [Willhelm, 1994]. Ainsi, en nous appuyant sur le travail de [Willhelm, 1994], nous avons pu ajouter au modèle du nivellement trigonométrique un coefficient d'asymétrie  $\kappa$ , compris entre 0 et 1, fonction de la distance  $D_T$  le long du trajet de l'onde, d'une éventuelle perturbation thermique ; par défaut,  $\kappa$  valant 1/2 [Touzé et al., 2019].

$$\exists \kappa \in ]0, 1[$$

$$E - R = (1 - 2k(1 - \kappa)) \frac{D^2 \sin^2 \zeta}{2R} \quad (13)$$

avec  $\kappa = \frac{D_T}{D}$

### Réfraction bathymétrique

En bathymétrie, pour des mesures acoustiques immergées, l'approche est très différente des techniques terrestres. Elle passe par la mesure régulière, au cours de chaque levé, de profils de célérité du son dans l'eau  $v$  en fonction de la profondeur (voir la figure 4). Les navires sont également, en général, équipés de célérimètres de coque mesurant la célérité particulière  $v_0$  au plus près du transducteur.

Comme il est actuellement invisable de pouvoir associer à chaque sonde mesurée un profil de célérité réel,

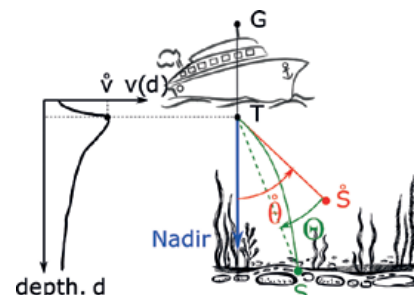


Figure 4. En bathymétrie, la prise en charge de la réfraction s'effectue par la mesure de profils de la célérité du son dans l'eau, appliquée aux sondes mesurées par lancé de rayon.

ceux-ci sont interpolés dans le temps ou dans l'espace parmi les profils disponibles. Le calcul de la position de la sonde mesurée se fait alors par lancé de rayon à partir de la loi de Snell-Descartes. L'hydrographe, lors du levé, est alerté du besoin de faire un nouveau profil de célérité quand sa célérité de coque, mesurée en continu, diffère trop du profil défini dans la configuration.

## Équation eikonale en géométrie différentielle absolue

Du fait que la loi de Snell-Descartes implique l'équation eikonale, il est possible d'utiliser cette dernière pour décrire la réfraction acoustique utile en bathymétrie. Cependant, dans ce contexte, l'indice de réfraction n'a pas de sens physique. Nous verrons que ce problème peut être contourné en utilisant la célérité de l'onde.

D'autre part, nous avons pu exprimer l'équation eikonale sous la forme d'un produit scalaire. Or l'intégration de cette équation est délicate car dans la majorité des cas, on souhaite l'effectuer dans un repère euclidien tandis que le gradient de  $n$ , souvent lié à la gravité, suit un espace courbe. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur les tenseurs, ces puissants outils de la géométrie différentielle absolue fondée par Ricci et Levi-Civita et appliqués avec brio par Einstein dans sa théorie de la relativité générale.

### Vitesse et gradient de vitesse

L'indice de réfraction est défini comme le rapport entre la célérité de la lumière dans le vide  $c = 299\,792\,458$  m/s et la célérité de l'onde  $v$  dans le milieu qu'elle traverse.

$$n = \frac{c}{v} \quad (14)$$

Dérivons cette expression selon  $v$  pour obtenir :

$$\frac{dn}{dv} = -\frac{c}{v^2} = -\frac{n}{v} \quad (15)$$

De ce fait, nous pouvons définir la relation suivante reliant les gradients de l'indice de réfraction  $n$  et celui de la célérité  $v$  :

$$\frac{\vec{\nabla} n}{n} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dv} \vec{\nabla} v = -\frac{\vec{\nabla} v}{v} \quad (16)$$



Dans les études des effets de la réfraction, il est donc possible de substituer au champ scalaire de l'indice de réfraction  $n$  et au champ vectoriel de son gradient  $\vec{\nabla}n$  ceux de  $v$  et de son gradient, tel qu'en bathymétrie. De plus, la loi de Snell-Descartes impliquant l'équation eikonale, nous pouvons appliquer la même équation, en l'occurrence l'eikonale tant aux réfractions terrestres que bathymétriques. Notre équation devient :

$$\frac{d\vec{T}}{ds} = -\frac{\vec{\nabla}v}{v} + \left( \frac{\vec{\nabla}v}{v} \cdot \vec{T} \right) \vec{T} \quad (17)$$

avec  $\vec{T} = \frac{d\vec{p}}{ds}$

## ■ Géométrie différentielle absolue

### Remarque

Pour vous familiariser avec ces puissants outils de calcul différentiel, l'auteur vous recommande de suivre, sur la chaîne *YouTube* d'Eigenchris<sup>1</sup> les deux séries de vidéos dans l'ordre suivant :

- *Tensors for beginners*, 19 films ;
- *Tensors calculus*, 29 films

Ainsi, si vous avez un minimum de connaissances en calcul matriciel et en analyse, vous serez rapidement capable, comme l'auteur, de manipuler les tenseurs qui vont suivre.

### Convention de sommation d'Einstein

Quand dans une expression, l'indice d'une variable se trouve deux fois, en position covariante (en indice) et contravariante (en exposant), cet indice, dit muet, est le signe d'une sommation implicite. Autrement dit, nous avons :

$$x_i y^i = \sum_{i=1}^n x_i y^i \quad (\text{ESC})$$

Prenons notre trajectoire  $\vec{p}$  paramétrée par son abscisse curviligne  $s$ . Soit un système de coordonnées quelconque de l'espace. Pour  $i$  allant de 1 à 3, un point de notre trajectoire sera décrit dans ce système par trois coordonnées contravariantes  $x^i$  associées chacune à un vecteur directeur covariant  $\vec{e}_i$ .

La difficulté provient notamment de la manière de définir ces vecteurs directeurs. Pour ce faire, dérivons notre trajectoire en appliquant (ESC) :

$$\frac{d\vec{p}}{ds} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \vec{p}}{\partial x^i} \frac{\partial x^i}{\partial s} = \frac{\partial \vec{p}}{\partial x^i} \frac{\partial x^i}{\partial s} \quad (18)$$

Les vecteurs directeurs de notre système arbitraire de coordonnées sont définis localement à partir de ce résultat et notés  $\vec{e}_i$  :

$$\vec{e}_i = \frac{\partial \vec{p}}{\partial x^i} = \vec{\partial}_i \quad (19)$$

Par définition de l'abscisse curviligne  $s$  nous avons forcément  $\|\delta \vec{p}\| = \delta s$ , de ce fait, la relation suivante sera toujours respectée :

$$\left\| \frac{d\vec{p}}{ds} \right\| = 1 \quad (20)$$

Désormais, il est possible de définir le tenseur le plus important de la géométrie différentielle, en l'occurrence le tenseur métrique dont l'expression covariante est donnée par les produits scalaires des vecteurs directeurs. Il est toujours symétrique.

$$g_{ij} = \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \vec{e}_j \cdot \vec{e}_i = g_{ji} \quad (21)$$

L'équation suivante nous permet de déduire l'expression contravariante  $g^{kj}$  de ce même tenseur à l'aide du symbole de Kronecker, dont la définition est fournie. Cette équation tensorielle (22) équivaut à l'écriture matricielle  $G G^{-1} = \text{Id}$ .

$$g_{ik} g^{kj} = \delta_i^j = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (22)$$

Dès lors, soient les deux vecteurs  $\vec{a} = a^i \vec{e}_i$  et  $\vec{b} = b^j \vec{e}_j$ , leur produit scalaire fait intervenir le tenseur métrique de la façon suivante :

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a^i b^j (\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j) = g_{ij} a^i b^j \quad (23)$$

Si on considère un champ scalaire quelconque  $\mu$  dont on cherche à exprimer les composantes  $\mu^i$  de son gradient  $\vec{\nabla}\mu = \mu^i \vec{e}_i$ , nous devons également faire intervenir le tenseur métrique sous sa forme contravariante :

$$\vec{\nabla}\mu = \mu^i \vec{e}_i \implies \mu^i = g^{ij} \frac{\partial \mu}{\partial x^j} \quad (24)$$

Ce résultat se déduit de (2) en l'exprimant de manière tensorielle, pour  $\mu = n$ .

Le dernier outil nécessaire à notre étude sert à caractériser comment les vecteurs directeurs varient le long de notre trajectoire. C'est essentiel du fait qu'en géométrie différentielle, les vecteurs directeurs ne sont pas toujours immuables comme c'est le cas en géométrie euclidienne. Autrement dit, nous avons besoin de connaître des coefficients  $\Gamma_{ij}^k$  tels qu'il soit possible d'écrire :

$$\frac{\partial \vec{e}_i}{\partial x^j} = \Gamma_{ij}^k \vec{e}_k \quad (25)$$

Ces coefficients sont appelés "coefficients de connexion" ou encore "symboles de Christoffel". Ils s'obtiennent par dérivation du tenseur métrique :

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{g^{km}}{2} \left( \frac{\partial g_{mi}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{mj}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial x^m} \right) \quad (26)$$

Ainsi, il est possible d'exprimer la dérivée seconde de notre trajectoire en espace courbe en tenant compte de la variation propre des vecteurs directeurs. En s'appuyant sur les résultats précédents, on peut prouver que :

$$\frac{d^2 \vec{p}}{ds^2} = \left( \frac{d^2 x^k}{ds^2} + \Gamma_{ij}^k \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^j}{ds} \right) \vec{e}_k \quad (27)$$

Pour la culture générale des lecteurs, on parlera de courbes géodésiques dans le cas précis où :

$$\frac{d^2 x^k}{ds^2} + \Gamma_{ij}^k \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^j}{ds} = 0 \quad (28)$$

Ainsi, une géodésique est une courbe dont l'accélération compense exactement la variation du référentiel ce qui, en espace courbe, correspond au chemin le plus direct.

## ■ Reformulation de l'eikonale

Nous disposons en équation (17) d'une formulation de l'équation eikonale faisant intervenir la célérité  $v$  de notre onde sous la forme d'une dérivée seconde. Nous avons pu également obtenir en formule (27) l'expression générale en géométrie différentielle absolue d'une telle dérivée seconde, quel que soit le système de coordonnées. Il ne nous reste qu'à exploiter l'égalité entre ces deux formulations : Tout d'abord, en nous appuyant sur (24), exprimons le gradient de  $v$  de manière tensorielle :

$$\frac{\vec{\nabla}v}{v} = \frac{g^{ki}}{v} \frac{\partial v}{\partial x^i} \vec{e}_k \quad (29)$$

En appliquant ce dernier résultat ainsi que (18), (22) et (23), on peut prouver que :

$$\frac{\vec{\nabla}v}{v} \cdot \frac{d\vec{p}}{ds} = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial x^i} \frac{dx^i}{ds} \quad (30)$$

Ces deux derniers résultats appliqués dans notre eikonale (17) nous permettent d'obtenir :

$$\frac{d^2 \vec{p}}{ds^2} = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial x^i} \left( \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^k}{ds} - g^{ik} \right) \vec{e}_k \quad (31)$$

<sup>1</sup> <https://www.youtube.com/c/eigenchris>





Ainsi, en constatant l'égalité de (31) avec (17), et en ne nous intéressant qu'aux dérivées secondes des coordonnées, nous obtenons l'équation tensorielle de l'eikonale (TEE).

### Équation tensorielle de l'eikonale

Soit une trajectoire d'une onde  $\vec{p}$  en fonction de sa position longitudinale  $s$ , soumise à un champ scalaire de célérité  $v$ , et de coordonnées quelconques  $x^k$  dont le tenseur métrique  $g_{ij}$  est connu, l'équation eikonale s'écrit :

$$\frac{d^2 x^k}{ds^2} = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial x^i} \left( \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^k}{ds} - g^{ik} \right) - \Gamma_{ij}^k \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^j}{ds} \quad (\text{TEE})$$

(TEE) correspond en fait à autant d'équations que de dimensions spatiales  $k$  ; de plus, nous rappelons que nous y respectons la convention de sommation d'Einstein (ESC), ainsi, aux indices muets  $i$  et  $j$  correspondent des sommations implicites. Ce résultat est valable pour tout système de coordonnées et aucune hypothèse n'a été faite jusqu'à présent sur le champ de célérité  $v$ .

## Résolution en Terre sphérique pour un champ de vitesse stratifié verticalement

Désormais, nous allons exploiter l'expression tensorielle de l'eikonale (TEE) en appliquant les deux hypothèses d'une Terre localement sphérique et d'un gradient vertical de la célérité.

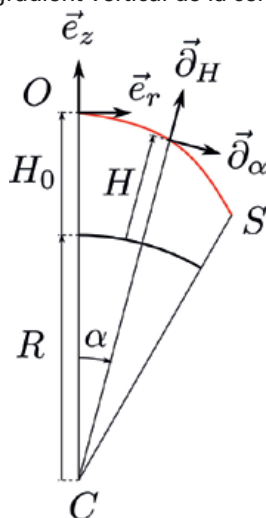


Figure 5. Dans le plan vertical de l'émission, repère local astronomique et repère lié à la courbure de la Terre le long de la trajectoire.

## Métrie de la Terre sphérique

Soit le point O d'émission de notre onde, selon un angle zénithal  $\zeta_0$ . Plaçons-nous dans le cadre de la figure 5, dans le plan vertical de l'émission.

Prenons le repère local astronomique en O. Le plan vertical est défini par le vecteur  $\vec{e}_z$  de la verticale locale en O et du vecteur horizontal  $\vec{e}_r$ . Soient  $R$  le rayon de courbure locale du géoïde en O,  $H$  l'altitude (dont  $H_0$  l'altitude en O) et  $\alpha$  l'angle au centre de la Terre. Si nous notons  $r$  et  $z$  les coordonnées d'un point de la trajectoire, celles-ci peuvent s'exprimer en fonction de  $H$  et de  $\alpha$  selon l'expression (32).

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} r \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R+H) \sin \alpha \\ (R+H) \cos \alpha - (R+H_0) \end{bmatrix} \quad (32)$$

En appliquant à ce résultat la définition (19), nous pouvons définir les vecteurs directeurs de notre référentiel lié à l'altitude et à l'angle au centre de la Terre.

$$\vec{\partial}_\alpha = \frac{\partial \vec{p}}{\partial \alpha} = (R+H) \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\vec{\partial}_H = \frac{\partial \vec{p}}{\partial H} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (34)$$

En calculant, à partir de ces deux vecteurs, selon la définition (21), nous trouvons aisément l'expression covariante du tenseur métrique qui est diagonal. Dans l'expression  $g_{ij}$ , les indices  $i$  et  $j$  correspondent à  $\alpha$  ou à  $H$ .

$$g_{ij} = \begin{bmatrix} (R+H)^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

En effet, on a :

$$\begin{cases} g_{\alpha\alpha} = \vec{\partial}_\alpha \cdot \vec{\partial}_\alpha = (R+H)^2 \\ g_{\alpha H} = g_{H\alpha} = \vec{\partial}_\alpha \cdot \vec{\partial}_H = 0 \\ g_{HH} = \vec{\partial}_H \cdot \vec{\partial}_H = 1 \end{cases} \quad (36)$$

L'expression contravariante du tenseur métrique s'obtient par l'inverse de cette matrice.

$$g^{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(R+H)^2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

La métrique étant maintenant résolue, vient l'étape simple – mais fastidieuse – du calcul des symboles de Christoffel selon la formule (26). Si notre référentiel a  $p$  coordonnées, il y a  $p^3$  symboles à calculer, c'est-à-dire huit dans notre cas. Tout d'abord, vu que le tenseur métrique est diagonal, toutes valeurs de  $g_{ij}$  et de  $g^{ij}$  sont nulles pour  $i \neq j$ . Cela

va considérablement simplifier l'application de la formule (26).

Intéressons-nous maintenant à la détermination de  $\Gamma_{\alpha\alpha}^\alpha$ .

$$\Gamma_{\alpha\alpha}^\alpha = \frac{g^{\alpha\alpha}}{2} \left( \frac{\partial g_{\alpha\alpha}}{\partial \alpha} + \frac{\partial g_{\alpha\alpha}}{\partial \alpha} - \frac{\partial g_{\alpha\alpha}}{\partial \alpha} \right) \quad (38)$$

Dans cette formule, toutes les dérivées sont nulles du fait de l'absence de l'angle au centre la Terre  $\alpha$  dans le tenseur métrique, ce qui donne :

$$\Gamma_{\alpha\alpha}^\alpha = 0 \quad (39)$$

En appliquant la même méthode aux sept autres symboles de Christoffel, nous trouvons :

$$\begin{cases} \Gamma_{\alpha\alpha}^\alpha = \Gamma_{HH}^\alpha = 0 \\ \Gamma_{\alpha H}^\alpha = \Gamma_{H\alpha}^\alpha = \frac{1}{R+H} \\ \Gamma_{\alpha\alpha}^H = -\frac{1}{R+H} \\ \Gamma_{\alpha H}^H = \Gamma_{H\alpha}^H = \Gamma_{HH}^H = 0 \end{cases} \quad (40)$$

## Champ de vitesse stratifié verticalement

La seconde hypothèse que nous faisons consiste à considérer que la célérité  $v$  ne varie qu'en fonction de l'altitude. Certes, il y a des variables intermédiaires, telles que la température et la pression, mais celles-ci ne sont supposées dépendre – selon notre hypothèse – que de l'altitude ou être constantes (telle la longueur d'onde). Dans ce cas, nous pouvons écrire :

$$x^i \neq H \implies \frac{\partial v}{\partial x^i} = 0 \quad (41)$$

Pour réduire les expressions par la suite, nous allons noter  $v'$  la dérivée de la célérité selon l'altitude :

$$\frac{\partial v}{\partial H} = v' \quad (42)$$

Ainsi, le gradient de la célérité est toujours vertical. La première conséquence, fort de notre équation eikonale en (17), est que la trajectoire de notre onde appartient toujours au plan vertical contenant la tangente à l'émission. C'est la raison pour laquelle, en section précédente, nous avons défini un référentiel en deux dimensions qui est suffisant pour décrire la trajectoire suivie par notre onde dans le plan vertical de l'émission, pour peu que l'azimut de ce plan soit connu.

## Nouvelles équations différentielles

Nous pouvons alors introduire tous ces résultats dans (TEE) pour obtenir



les équations différentielles de second ordre régissant, tout d'abord, l'angle au centre de la Terre  $\alpha$  :

$$\frac{d^2\alpha}{ds^2} = \frac{d\alpha}{ds} \frac{dH}{ds} \left( \frac{v'}{v} - \frac{2}{R+H} \right) \quad (43)$$

Puis l'altitude  $H$  :

$$\frac{d^2H}{ds^2} = \frac{v'}{v} \left( \left( \frac{dH}{ds} \right)^2 - 1 \right) + (R+H) \left( \frac{d\alpha}{ds} \right)^2 \quad (44)$$

Cette dernière expression peut être simplifiée. En effet, rappelons-nous que la norme de la tangente est nécessairement égale à 1 (voir la formule (20)). Ainsi :

$$1 = \left\| \frac{d\vec{p}}{ds} \right\|^2 = \frac{d\vec{p}}{ds} \cdot \frac{d\vec{p}}{ds} = g_{ij} \frac{dx^i}{ds} \frac{dx^j}{ds} \quad (45)$$

Ce qui, dans notre référentiel en Terre sphérique, donne :

$$(R+H)^2 \left( \frac{d\alpha}{ds} \right)^2 + \left( \frac{dH}{ds} \right)^2 = 1 \quad (46)$$

D'où la relation suivante, liant les dérivées de l'angle au centre de la Terre et l'altitude :

$$\left( \frac{d\alpha}{ds} \right)^2 = \frac{1}{(R+H)^2} \left( 1 - \left( \frac{dH}{ds} \right)^2 \right) \quad (47)$$

Introduisons désormais l'angle zénithal  $\zeta$  de la tangente à la trajectoire de notre onde en un point. En figure 3 et la section associée, nous avons défini l'angle orienté  $I$  du gradient de  $n$  vers cette même tangente. Sachant, depuis la formule (16), que les gradients de  $n$  et de  $v$  sont de sens opposés, et que le gradient de  $v$ , par hypothèse, est vertical, on peut déduire que :

$$\zeta = I \quad \text{ou} \quad \zeta = \pi - I \quad (48)$$

De ce fait :

$$\sin \zeta = \sin I \quad (49)$$

De plus, géométriquement, on peut remarquer que :

$$\cos \zeta = \frac{dH}{ds} \quad (50)$$

Donc, en introduisant les résultats (47) et (50) dans (44), nous obtenons :

$$\frac{d^2H}{ds^2} = \left( \frac{1}{R+H} - \frac{v'}{v} \right) \sin^2 \zeta \quad (51)$$

Si nous revenons au constat en formule (49), nous remarquons qu'il est possible de lui appliquer la loi de Snell-Descartes discrète (DSD). En introduisant l'angle zénithal à l'émission  $\zeta_0$ , ainsi que la célérité à l'émission  $v_0$ , nous obtenons l'équation différentielle

régissant l'altitude en réfraction stratifiée verticalement en Terre sphérique.

$$\frac{d^2H}{ds^2} = \left( \frac{1}{R+H} - \frac{v'}{v} \right) \frac{v^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2} \quad (52)$$

Ainsi, en considérant une stratification verticale de la célérité, en Terre sphérique, la question de la réfraction en altimétrie revient à résoudre l'altitude  $H(s)$  selon le système suivant :

$$\begin{cases} H(0) = H_0 \quad \text{et} \quad \frac{dH(0)}{ds} = \cos \zeta_0 \\ \frac{dH}{ds} = \cos \zeta \\ \frac{d^2H}{ds^2} = \left( \frac{1}{R+H} - \frac{v'}{v} \right) \frac{v^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2} \end{cases} \quad (53)$$

Pour obtenir ce dernier résultat, que nous allons exploiter par la suite, nous avons considéré que l'altitude  $H$  est suffisamment petite par rapport au rayon de la Terre  $R$  pour que  $\frac{1}{R+H} \approx \frac{1}{R}$ .

### ■ Un mot sur les sommes doubles

Le système (53) que nous allons devoir résoudre va nécessiter deux intégrations que nous allons approcher par deux sommations. Une propriété de ces sommes doubles particulièrement importante pour nos besoins est la suivante :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i u_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n u_{ij} \quad (54)$$

Pour comprendre cette égalité, il suffit de remarquer qu'au fond, seul compte le respect de l'inégalité  $1 \leq j \leq i \leq n$ . Pour s'en convaincre, nous invitons le lecteur à lire la démonstration illustrée au lien ci-après<sup>2</sup>. Cette propriété nous sera fort utile dans le cas où  $u_{ij} = a_i b_j$  puisque nous pouvons déduire de (54) le résultat suivant en (55) :

$$\sum_{i=1}^n a_i \sum_{j=1}^i b_j = \sum_{j=1}^n b_j \sum_{i=j}^n a_i = \sum_{i=1}^n b_i \sum_{j=i}^n a_j \quad (55)$$

Prenons désormais le cas particulier – qui nous servira naturellement – où  $b_i = a_i$ . Nous pouvons écrire la somme des termes de  $i$  à  $n$  de la manière suivante :

$$\sum_{j=1}^i a_j = \sum_{j=1}^n a_j - \sum_{j=i}^n a_j + a_i \quad (56)$$

<sup>2</sup> [https://fr.wikiversity.org/wiki/Sommatation/Sommatation\\_double](https://fr.wikiversity.org/wiki/Sommatation/Sommatation_double)

En appliquant (55) et (56), il est aisé de démontrer cette dernière propriété utile (57) :

$$2 \sum_{i=1}^n a_i \sum_{j=i}^n a_j = 2 \sum_{i \leq j} a_i a_j = \left( \sum_{i=1}^n a_i \right)^2 + \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (57)$$

Si nous considérons  $\hat{a}$  et  $\sigma^2$  comme étant, respectivement, la moyenne arithmétique et l'écart-type empirique des  $a_i$ , nous obtenons :

$$2 \sum_{i \leq j} a_i a_j = n(n+1) \hat{a}^2 + (n-1) \sigma_a^2 \quad (58)$$

### ■ Profil de la célérité le long du trajet

Le long du trajet de notre onde, nous supposons que nous traversons  $n$  couches de célérité  $v_i$  telles que la traversée de chaque couche est de durée constante  $\delta t$ . Nous supposons aussi que nous connaissons également, en chacune de ces couches, la valeur du gradient de la célérité  $v'_i = \frac{dv_i}{dH}$  qui, par hypothèse, ne varie que selon l'altitude  $H$ .

### ■ Longueur du trajet

Avant tout, nous pouvons constater qu'une longueur élémentaire  $\delta s$  du trajet parcouru est liée à la célérité et à la durée élémentaire  $\delta t$  pour traverser cette section.

$$\delta s = v \delta t \quad (59)$$

Soient  $\Delta t$  la durée du trajet aller et retour de notre onde entre l'émission et la réception et  $S$  la distance curviligne entre l'émetteur et le point mesuré. On a :

$$S = \int_0^S ds = \int_0^{\frac{\Delta t}{2}} v dt \quad (60)$$

Fort de notre hypothèse en section précédente de couches isochrones, nous avons :

$$\delta t = \frac{\Delta t}{2n} \quad (61)$$

D'où l'expression de la distance curviligne  $S$  en fonction de la moyenne arithmétique  $\hat{v}$  de la célérité :

$$S \approx \delta t \sum v_i = \frac{\Delta t}{2n} \sum v_i = \hat{v} \frac{\Delta t}{2} \quad (62)$$

De ce résultat (62), retenons un point supplémentaire qui sera fort utile par la suite, en l'occurrence :

$$\delta t = \frac{S}{\sum v_i} \quad (63)$$







## Résolution de l'altitude

Commençons par la première intégration du système (53) jusqu'au point d'abscisse curviligne  $s_i$ .

$$\frac{dH_i}{ds} = \cos \zeta_i = \cos \zeta_0 + \int_0^{s_i} \frac{d^2 H}{ds^2} ds \quad (64)$$

C'est-à-dire, en appliquant (59), (53) et (63) :

$$\frac{dH_i}{ds} \approx \cos \zeta_0 + \frac{S \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 \sum v_i} \sum_{j=1}^i v_j^3 \left( \frac{1}{R} - \frac{v'_j}{v_j} \right) \quad (65)$$

La dénivelée est donnée par l'intégrale de ce résultat, ce qui donne, en appliquant (59) et (63) :

$$\Delta H = \int_0^S \frac{dH}{ds} ds \approx \frac{S}{\sum v_i} \sum_{i=1}^n v_i \frac{dH_i}{ds} \quad (66)$$

En introduisant (65) dans (66) nous obtenons ce qui suit :

$$\Delta H = S \cos \zeta_0 + \mathcal{E} - \mathcal{R} \quad (67)$$

Avec

$$\mathcal{E} - \mathcal{R} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 (\sum v_i)^2} \sum_{i=1}^n v_i \sum_{j=1}^i \left( \frac{v_j^3}{R} - v_j^2 v'_j \right) \quad (68)$$

Nous pouvons désormais nous servir de la propriété des doubles sommes (55).

$$\mathcal{E} - \mathcal{R} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 (\sum v_i)^2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{v_i^3}{R} - v_i^2 v'_i \right) \sum_{j=i}^n v_j \quad (69)$$

Fort de (59), nous pouvons écrire que :

$$v = \frac{\delta s}{\delta t} = \frac{\delta s}{S} \sum v_i \quad (70)$$

En en faisant la somme, nous obtenons :

$$\sum_{j=i}^n v_j = \frac{\sum v_i}{S} \sum_{j=i}^n \delta s_j = \frac{\sum v_i}{S} \left( S - \sum_{j=1}^i \delta s_j \right) \quad (71)$$

En rappelant que  $s_i$  est l'abscisse curviligne du point  $i$ , nous obtenons donc :

$$\sum_{j=i}^n v_j = \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right) \sum v_i \quad (72)$$

Ce qui, une fois introduit dans (69), nous donne :

$$\mathcal{E} - \mathcal{R} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 \sum v_i} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right) \left( \frac{v_i^3}{R} - v_i^2 v'_i \right) \quad (73)$$

Ces expressions (67) et (73) nous donnent la dénivelée d'une onde acoustique ou électromagnétique émise selon l'angle zénithal  $\zeta_0$  ayant parcouru la

longueur  $S$  au travers de  $n$  couches isochrones de célérité  $v_i$ , de gradient  $v'_i$  et de position  $s_i$  le long du trajet. Nous allons désormais la simplifier.

## Simplification de l'expression

Posons

$$\mathcal{E} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 R \sum v_i} \sum_{i=1}^n v_i^3 \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right) \quad (74)$$

Et

$$\mathcal{R} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 \sum v_i} \sum_{i=1}^n v_i^2 v'_i \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right) \quad (75)$$

Considérons comme négligeables les variations relatives de la célérité  $v_i$  par rapport à leur moyenne  $\bar{v}$ . En effet, dans les conditions habituelles, les ordres de grandeur sont :

Bathymétrie :  $\frac{\Delta v}{\bar{v}} \approx 10^{-2}$

Topométrie :  $\frac{\Delta v}{\bar{v}} \approx 10^{-4}$

Cette approximation nous permet d'obtenir :

$$\mathcal{E} = \frac{\bar{v}^2 S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 R \sum v_i} \sum_{i=1}^n v_i \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right) \quad (76)$$

Or, en appliquant (72), on a :

$$\frac{\sum_{i=1}^n v_i \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right)}{\sum v_i} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{j=1}^n v_j}{(\sum v_i)^2} \quad (77)$$

Si on considère la propriété (58) avec  $n$  grand, ainsi que de faibles variations relatives des  $v_i$ , on en déduit que :

$$\frac{\sum_{i=1}^n v_i \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right)}{\sum v_i} \approx \frac{1}{2} \quad (78)$$

Ce qui nous donne :

$$\mathcal{E} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{2R} \frac{\bar{v}^2}{v_0^2} \quad (79)$$

En faisant la même approximation de variations relatives faibles des  $v_i$ , atteignons-nous à  $R$ . Nous obtenons :

$$\mathcal{R} = \frac{\bar{v} S^2 \sin^2 \zeta_0}{v_0^2 \sum v_i} \sum_{i=1}^n v_i v'_i \left( 1 - \frac{s_i}{S} \right) \quad (80)$$

Nous définissons désormais les gradients moyens  $\bar{v}'$  et le coefficient d'asymétrie  $\kappa$  définis par les moyennes pondérées suivantes :

$$\bar{v}' = \frac{\sum v_i v'_i}{\sum v_i} \quad \text{et} \quad \kappa = \frac{\sum v_i v'_i s_i}{\sum v_i v'_i} \quad (81)$$

Nous obtenons d'expression de  $R$  :

$$\mathcal{R} = S^2 \sin^2 \zeta_0 (1 - \kappa) \frac{\bar{v} \bar{v}'}{v_0^2} \quad (82)$$

In fine, nous obtenons comme expression de la dénivelée :

$$\Delta H = S \cos \zeta_0 + \mathcal{E} - \mathcal{R} \quad (83)$$

Avec

$$\mathcal{E} - \mathcal{R} = \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{2R} \left( \frac{\bar{v}^2}{v_0^2} - 2(1 - \kappa) \bar{v}' \right) \quad (84)$$

Dans laquelle,  $\kappa$  est le coefficient de réfraction tel qu'utilisé en topométrie classique. Son expression est :

$$\kappa = \frac{R \bar{v} \bar{v}'}{v_0^2} \quad (85)$$

## Cas particuliers

Si le gradient varie peu, le coefficient d'asymétrie se simplifie. En effet, en se basant sur (78) :

$$\forall i, v'_i \approx \bar{v}' \Rightarrow \kappa = \frac{\sum v_i v'_i s_i}{\sum v_i v'_i} \approx \frac{\sum v_i s_i}{\sum v_i} = \frac{1}{2} \quad (86)$$

Si la visée est proche de l'horizontale, vu l'hypothèse de stratification verticale de la célérité, notre résultat se simplifiera encore davantage. En effet :

$$\zeta_0 \approx \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{\bar{v}}{v_0} \approx 1 \quad (87)$$

En appliquant ces deux résultats dans (84), alors nous retrouvons exactement les formules classiques du nivellement trigonométrique (NT). Cela nous permet de mieux comprendre les hypothèses sous-jacentes à ces formules classiques de la topométrie et donc d'en cerner les limites.

## Correction angulaire

Plaçons-nous désormais dans le cadre de la figure 6. Nous allons chercher à déterminer la correction angulaire  $\Delta \zeta$  à apporter à l'angle zénithal d'émission  $\zeta_0$  de manière à obtenir l'angle zénithal corrigé.

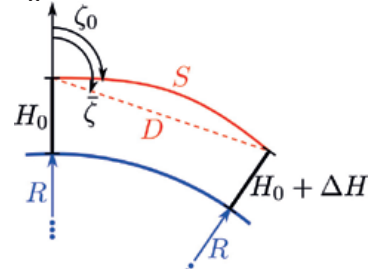


Figure 6. Trajet de l'onde acoustique ou électromagnétique émise selon l'angle zénithal  $\zeta_0$ .

Pour ce faire, nous allons considérer que la distance euclidienne  $D$  entre l'émission et le point mesuré est égale à la longueur curviligne du trajet  $S$ . Ensuite il suffit d'appliquer la loi des cosinus avec la dénivelée définie selon (83). Il est possible de montrer que la correction angulaire s'exprime,



en négligeant les termes correctifs de second ordre, selon la formule (88).

$$\Delta\zeta = \bar{\zeta} - \zeta_0 = \frac{S \sin \zeta_0}{R} \left( (1 - \kappa) k + \frac{v_0^2 - \hat{v}^2}{2v_0^2} \right) \quad (88)$$

## Conclusion

Tout d'abord, en montrant que la loi de Snell-Descartes impliquait l'équation eikonale, puis en nous intéressant à la célérité plutôt qu'à l'indice de réfraction, il a été possible de traiter exactement dans le même cadre théorique les réfractions acoustiques et électromagnétiques que nous pouvons rencontrer en hydrographie et en topométrie.

Ensuite, en utilisant les puissants outils de la géométrie différentielle absolue, nous avons pu établir l'équation tensorielle de l'eikonale qui régit la réfraction, et ce, quel que soit le système de coordonnées utilisé et sans aucune hypothèse.

La résolution de cette équation tensorielle en Terre sphérique, selon une stratification verticale de l'atmosphère en couches isochrones nous a permis d'obtenir un modèle généralisé de la réfraction. Il serait intéressant de résoudre cette équation tensorielle dans le cadre d'un tunnel avec un gradient radial pour la question de la réfraction latérale en topométrie souterraine. Sur notre proposition, nous montrons que :

Si une onde est émise, avec une célérité  $v_0$  à l'émission, selon un angle zénithal  $\zeta_0$ , et une durée de trajet aller-retour  $\Delta t$  au travers de  $n$  couches isochrones de célérité  $v_i$  et de gradient de célérité  $v'_i$  connu, alors nous pouvons définir les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} \text{Célérité moyenne} \quad \hat{v} &= \frac{\sum v_i}{n} \\ \text{Gradient moyen} \quad \hat{v}' &= \frac{\sum v_i v'_i}{\sum v_i} \\ \text{Longueur curviligne} \quad S &= \hat{v} \frac{\Delta t}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Coefficient d'asymétrie} \quad \kappa &= \frac{\sum v_i v'_i s_i}{\sum v_i v'_i} \\ \text{Coefficient de réfraction} \quad k &= \frac{R \hat{v} \hat{v}'}{v_0^2} \end{aligned}$$

De ces paramètres, il est possible de déduire la dénivelée  $\Delta H$  :

$$\Delta H = S \cos \zeta_0 + \frac{S^2 \sin^2 \zeta_0}{2R} \left( \frac{\hat{v}^2}{v_0^2} - 2(1 - \kappa) k \right)$$

Ainsi que la correction  $\Delta\zeta$  sur l'angle zénithal :

$$\Delta\zeta = \frac{S \sin \zeta_0}{R} \left( (1 - \kappa) k + \frac{v_0^2 - \hat{v}^2}{2v_0^2} \right)$$

En faisant les hypothèses d'un gradient variant peu (dans ce cas,  $\kappa \approx 0.5$ ), et d'une visée proche de l'horizontale (pour laquelle  $\hat{v} \approx v_0$ ), ce modèle est strictement identique aux formules habituelles du nivellement trigonométrique.

Ainsi, pour la topométrie, ce résultat nous informe des hypothèses pour lesquelles le modèle standard est valable et nous fournit une alternative si ce n'est pas le cas. De plus, une expression rigoureuse définit désormais le coefficient de réfraction  $k$  en fonction de la célérité et de son gradient. Grâce à ce lien rigoureusement établi, il est envisageable d'imaginer comment un drone équipé de capteurs météorologiques pourrait permettre de réaliser régulièrement des profils de célérité le long des visées d'un réseau d'auscultation d'ouvrage.

Dans un prochain article, nous exploiterons ce nouveau modèle à des simulations de mesures bathymétriques LiDAR aéroportés ainsi que dans le cas extrême d'un LiDAR bathymétrique aéroporté (émission dans l'air pour un point mesuré immergé). Ces tests nous permettront d'évaluer de manière plus concrète la valeur ajoutée de ce travail. ●

## Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Michel Kasser. En effet, il y a quelques années, il avait, d'une part, pressenti les intérêts d'une approche tensorielle en géomatique et, d'autre part, compris que des profils de température le long de visées permettraient de modéliser la réfraction. Ayant partagé plusieurs années le même bureau que lui, Michel m'a parlé de tout cela. S'il m'a fallu plusieurs années pour être en mesure d'en proposer un modèle, je tiens à rappeler que ces idées brillantes viennent de lui.

## Contact

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

## Bibliographie

[Guillaume, 2015] Guillaume, S. (2015). *Determination of a Precise Gravity Field for the CLIC Feasibility Studies*. Thèse de doctorat, ETHZ. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/126895>  
[Hübner, 1977] Hübner, E. (1977). *Einfluss*

*der terrestrischen refraction auf den laserstrahl in bodennahen luftschichten*. Vermessungstechnik, 25(10)

[Rueger et Brunner, 2000] Rueger, J. M. et Brunner, F. K. (2000). *On system calibration and type testing of digital levels*. Zeitschrift für Vermessungswesen, (125):p.120-130

[Torge, 2001] Torge, W. (2001). *Geodesy, third completely revised and extended edition*. Walter de Gruyter

[Touzé, 2018] Touzé, T. (2018). *How to solve the refraction problem of long distance measurements ?* In Trimble Dimensions. <https://trimbledimensions.com/session-info/catalog/?search=refraction#/>

[Touzé et al., 2019] Touzé, T., Chevallier, N. et olzon, N. (2019). *N'ayez pas peur du coefficient de réfraction ! deuxième partie sur la réfraction latérale ou asymétrique*. XYZ n° 161.

[Touzé et Hansen, 2019] Touzé, T. et Hansen, M. (2019). *N'ayez pas peur du coefficient de réfraction, première partie sur les enjeux de réfraction en nivellement trigonométrique*. XYZ n° 158, (158).

[Wilhelm, 1994] Wilhelm, W. (1994). *Die seitenrefraktion : Ein unbeliebtes thema ? oder ein thema nur für insider ?* Géomatique Suisse. <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=geo-006:1994:92::747>.

## ABSTRACT

*The issue of refraction arises in topometry and in bathymetry according to distinct models which differ, for the most part, in the fact that in bathymetry, velocity profiles are measured while in topometry the coefficient of refraction is introduced. This coefficient allows the description of the angular deviation. In addition, the models proposed are based either on Snell-Descartes law or on the eikonal equation.*

*In this article, first, we show that Snell-Descartes law involves the eikonal equation. The substitution of the refractive index by the celerity, and considering the problem in a tensor way, we manage to obtain the tensor expression of the eikonal equation valid both in topometry and in bathymetry and independent of any coordinate system.*

*Solving this second-order differential equation allows us to construct a generalized model of refraction in the specific case of layers of celerity stratified vertically in spherical Earth. We obtain a result which generalizes the trigonometric leveling formulas and which are compatible with observations of a velocity profile.*



# Comparaison des images satellite et aériennes dans le domaine de la détection d'obstacles à la navigation aérienne et de leur mise à jour

■ Olivier DE JOINVILLE - Chloé MARCON - Moumina Idriss DAOUD

*Le Service d'information aéronautique (SIA) est un service de la DGAC (Direction générale de l'aviation civile) qui publie et exploite des obstacles à la navigation aérienne afin de sécuriser les vols aux abords des aérodromes. L'article propose une étude comparative entre des données images aériennes (Orthoimages) et des données images satellite (Pléiades et Sentinel) dans les deux domaines suivants : détection d'obstacles (essentiellement végétation et bâtiments) ainsi que leur mise à jour. Il ressort que les images satellite, du fait de leur forte qualité radiométrique et géométrique, offrent un potentiel légèrement supérieur aux images aériennes pour le SIA. De futures études utilisant d'autres capteurs optiques, LiDAR et Radar et des moyens de contrôle plus exhaustifs, devront être menées pour confirmer cette tendance.*

## MOTS-CLÉS

Obstacles aéronautiques, détection des changements, images satellite, images aériennes, Pléiade, MNT, MNS, classifications pixellaires et orientée objet, restitution 3D, QGIS.

Le SIA a pour mission de vérifier les données fournies, de les intégrer dans ses outils et de fabriquer les divers produits d'information aéronautique, dont notamment les jeux de données de référence, requis pour les services à rendre, et aussi d'assurer la publication de cette information sous forme de produits et de services.

## Contexte opérationnel

En aéronautique, le terme "obstacles" définit tout ou partie d'un objet fixe (temporaire ou permanent) ou mobile [De Joinville, 2021] :

- qui est situé sur une aire destinée à la circulation des aéronefs à la surface ;
- qui fait saillie au-dessus d'une surface définie destinée à protéger les aéronefs en vol ;
- qui se trouve à l'extérieur d'une telle surface définie et qui est jugé être un danger pour la navigation aérienne.

Le SIA gère les trois types d'obstacles suivants :

- les obstacles à la navigation aérienne publiés dans l'AIP (*Aeronautical Information Publication*) pour des cycles de 28 jours ;
- les données du programme de l'OACI TOD (*Terrain and Obstacle Data*) ;
- les relevés d'obstacles pour la conception de procédures de vol aux instruments.

Les obstacles à la navigation aérienne sont gérés par le SIA via des informateurs aéronautiques. Ce sont des agents de la DGAC en contact avec les exploitants des aérodromes comme ADP, (Aéroport de Paris), ACA (Aéroport Côte d'Azur)... qui indiquent au SIA quels sont les obstacles à publier et ceux qui ne sont plus en service.

## Introduction

La qualité des relevés des obstacles est essentielle pour la sécurité aérienne. Ces données sont acquises à l'heure actuelle principalement à partir d'imageries aériennes, alors que des capteurs satellites à haute résolution existent depuis de nombreuses années.

Il convient donc de se poser la question du remplacement progressif des images aériennes par les images satellite pour l'acquisition et la mise à jour de ces obstacles. Comme pour suivre l'évolution saisonnière des couverts végétaux, le recours aux satellites s'impose, car ils fournissent des images à haute répétitivité temporelle, avec des résolutions spatiales de plus en plus fines.

Cette étude est un enjeu de sécurité pour protéger les aéronefs des obstacles environnants dans leurs manœuvres de décollage, d'atterrissage et de vols à basse altitude. La qualité des relevés des obstacles (artificiels et naturels) est essentielle pour la sécurité

aérienne. L'article étudie des techniques supervisées pour détecter et mettre à jour les obstacles à la navigation aérienne (essentiellement les obstacles surfaciques comme la végétation et les bâtiments) sur des orthoimages de l'IGN et sur des images satellite à moyenne résolution (Sentinel, 10 m.) et à haute résolution (Pléiades, 50 cm.). Nous analyserons les résultats obtenus et proposerons des axes d'amélioration.

## Contexte

### Présentation du SIA

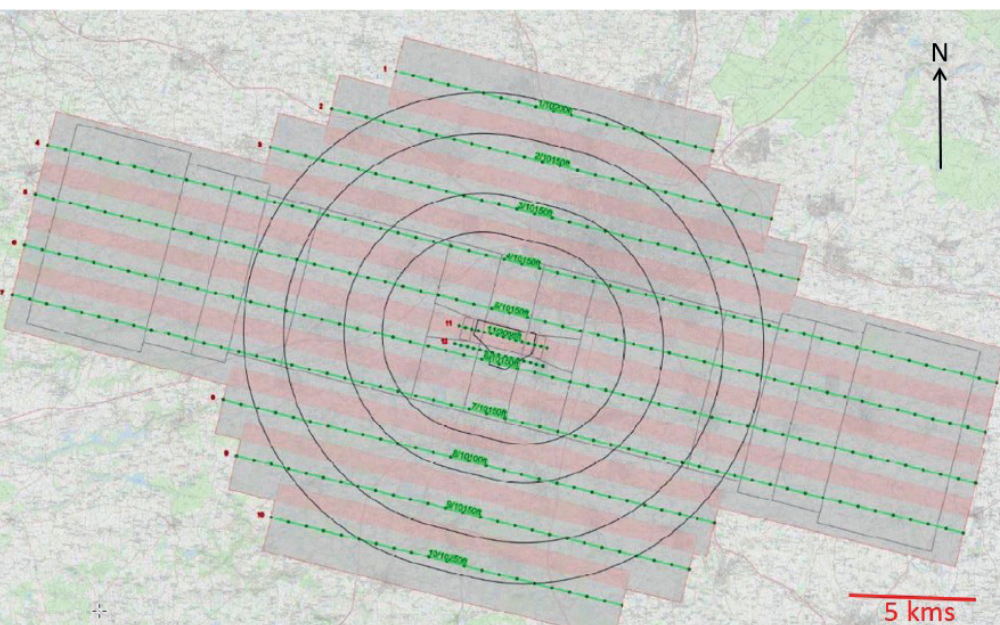
Le Service de l'information aéronautique (SIA, <https://www.sia.aviation-civile.gouv.fr/>) fait partie de la Direction des services de la navigation aérienne (DSNA) qui est l'une des directions de la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Le Service de l'information aéronautique (SIA) a été créé le 1<sup>er</sup> décembre 1958 au sein du Secrétariat général à l'aviation civile et commerciale (SGACC).

Les obstacles TOD et ceux destinés à la conception de procédures sont relevés par des géomètres via des marchés que passe le SIA. Des zones de collecte de ces obstacles sont définies dans les cahiers des charges destinés à la société qui devra faire le relevé. Le procédé se fait par photogrammétrie aérienne (restitution 3D), les opérateurs restituant les obstacles qui percent les zones de collecte.

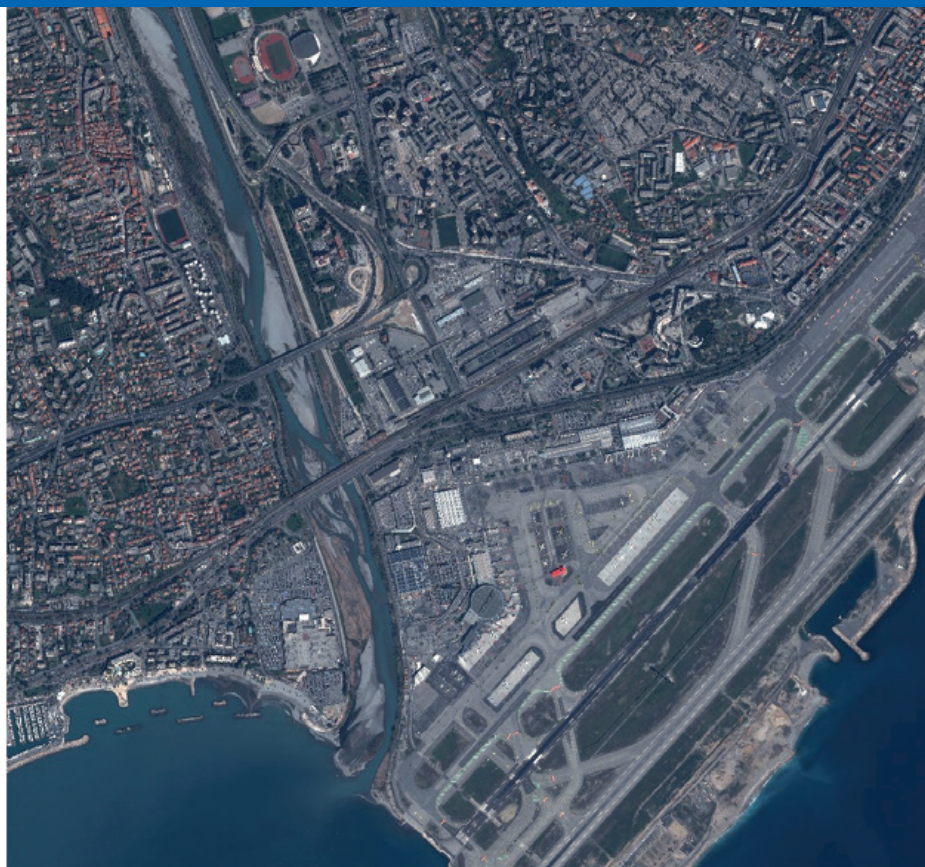
Les relevés des obstacles peuvent également être acquis à partir de relevés topométriques sur le terrain pour les obstacles non visibles sur les images (comme des antennes très fines par exemple).

La société choisie par le SIA effectue donc un relevé photogrammétrique à partir d'une campagne de prises de vues aériennes avec un plan de vol (exemple *figure 1*) suivant les principes stéréoscopiques bien connus en photogrammétrie aérienne. Une fois le relevé terminé, la société livre les obstacles au SIA sous forme vectorielle.

À l'issue du vol, les obstacles qui percent les zones de collecte sont restitués manuellement, ce qui est coûteux et chronophage, mais d'une bonne précision, exactitude et exhaustivité. Le SIA fait procéder à des contrôles automatiques et manuels des relevés d'obstacles par une société spécialisée.



**Figure 1.** Plan de vol d'un relevé d'obstacles sur l'aéroport de Rennes Saint Jacques, les points en vert sont les sommets de prise de vue et les bandes roses sont les zones de recouvrement latérales entre les bandes.



**Figure 2.** Vue aérienne de l'aéroport de Nice Côte d'Azur.

## Détection des obstacles

### Description de la zone d'étude, données disponibles et logiciels utilisés

L'étude a été réalisée sur l'aéroport de Nice-Côte d'Azur situé dans une zone entourée de montagnes et donc dangereuse en termes d'approche pour les avions.

### Données disponibles et outils utilisés

Les données disponibles sur cette zone sont (*figure 3*) :

- Pléiade Haute Résolution (PHR) 2014 –2018 : 50 cm (Programme Dinamis), 4 canaux (Bleu, Vert, Rouge et Proche Infra Rouge) ;
- Sentinel 2017 – 2021 : 10m. (Programme Copernicus), 3 canaux (Vert, Rouge et Proche Infra Rouge) ;
- BD Ortho® : 2017 –2020, 50 cm., 3 canaux (Vert, Rouge et Proche Infra Rouge).

Nous avons voulu diversifier la résolution spatiale des images satellite, les images aériennes étant à une résolution fine.

Les logiciels et bibliothèques utilisés sont :

- QGIS version 3.16 ;
- Monteverdi version 7.3 ;
- OTB (OrfeoTool Box) version 7.3.

Les logiciels utilisés sont tous gratuits.

### Méthode employée

Nous avons choisi d'utiliser des classifications supervisées pour détecter les obstacles surfaciques les plus fréquemment rencontrés, à savoir la végétation et les bâtiments.

Deux types de classifications ont été utilisés : les classifications pixellaires et



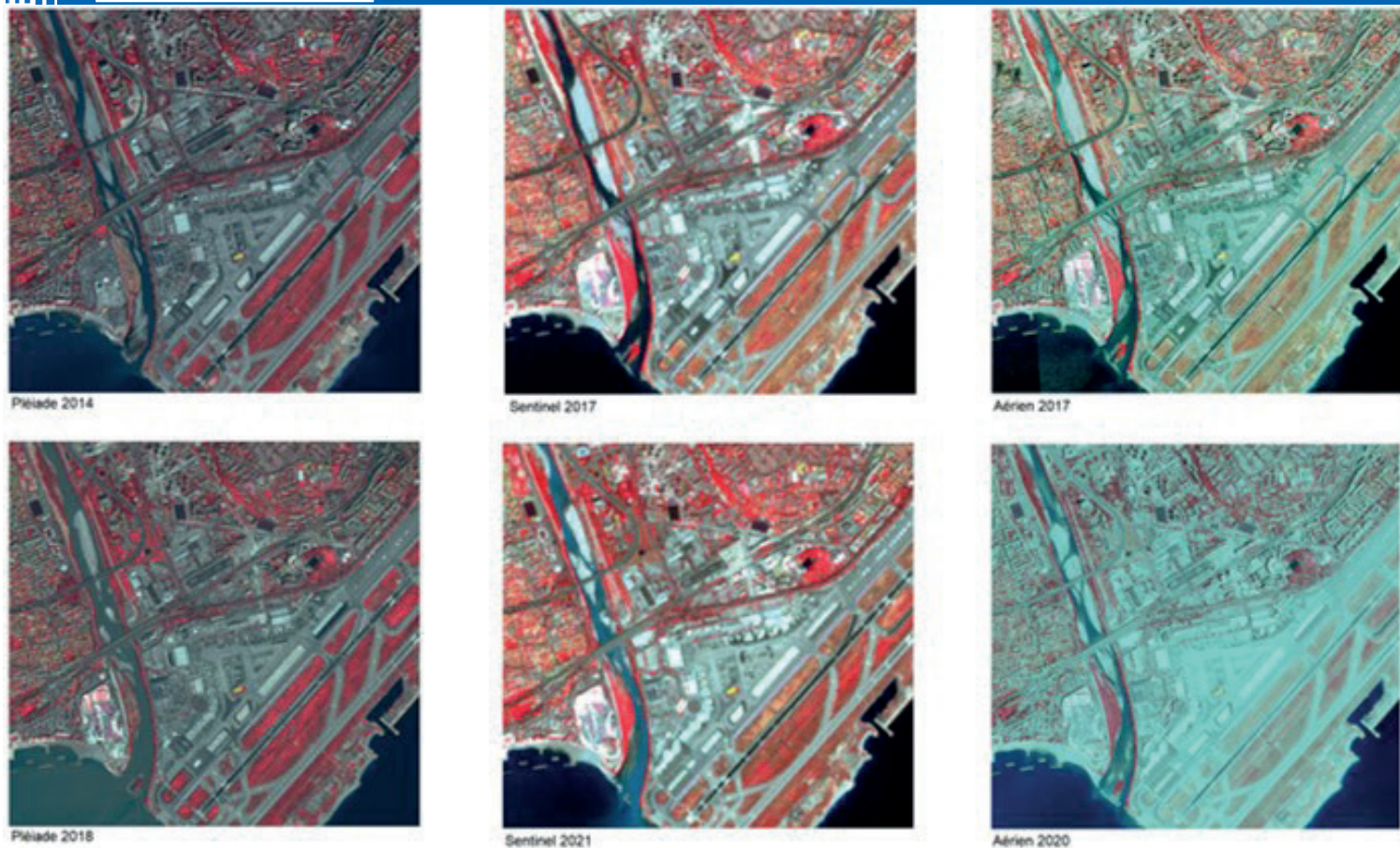


Figure 3. Données images disponibles.



les classifications orientées objet. Elles sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

## Les classifications pixellaires

### ■ Types de classification choisis

Nous avons choisi de détecter les obstacles en effectuant des classifications supervisées *Maximum Likelihood* [Cariou, V. et al, 2010 ; Keshk, H., Yin, X. C., 2020], Plus proche Voisin [Guadat, S., 2013] et SVM (*Support Vector Machine*) sur les images aériennes et les images satellite. Nous avons utilisé le module SCP (Semi-automatique Classification Plugin) de QGIS pour les classifieurs Maximum Likelihood et Plus proche Voisin et la librairie OTB (*Orfeo Tool Box*) pour le classifieur SVM. L'avantage principal de la classification SVM par rapport aux classifications classiques proposées par le SCP est qu'elle a un pouvoir séparateur nettement plus puissant (Bersini, H., 2020).

### ■ Sélection des ROIs

Nous avons sélectionné manuellement plusieurs zones d'apprentissage (appelées ROIs : *Regions of Interest*) par classe (environ trois ou quatre en

moyenne). La *figure 4* montre les ROIs qui ont été choisies pour faire les classifications supervisées.

### ■ Résultats

Le but était ici de savoir quel est le classifieur le plus performant pour détecter les obstacles surfaciques (essentiellement la végétation et les bâtiments) sur nos trois types d'images (PHR, Sentinel et Aérien).

Le *tableau 1* compare sur une même zone les classifications obtenues avec deux classifieurs PPV (Plus Proche Voisin jugé plus performant que Maximum Likelihood d'après les résultats de la matrice de confusion qui en a été extraite) et SVM avec noyau radial.

### ■ Discussion, difficultés rencontrées

Par type d'images, nous pouvons en déduire les résultats suivants :

**Sentinel** : La végétation a été bien détectée, aidée par le canal infrarouge, mais il y a cependant de fausses alertes de végétation haute dans l'herbe présente sur les pistes de l'aéroport.

**PHR** : On constate de fortes confusions sur la classe sable avec les classes de taxiway ou de parkings. La végétation est bien détectée et présente très peu

de confusions, en revanche les bâtiments sont beaucoup trop confondus.

**Aérien** : Malgré la présence du canal infrarouge, les confusions sont très marquées. On observe une surdé-

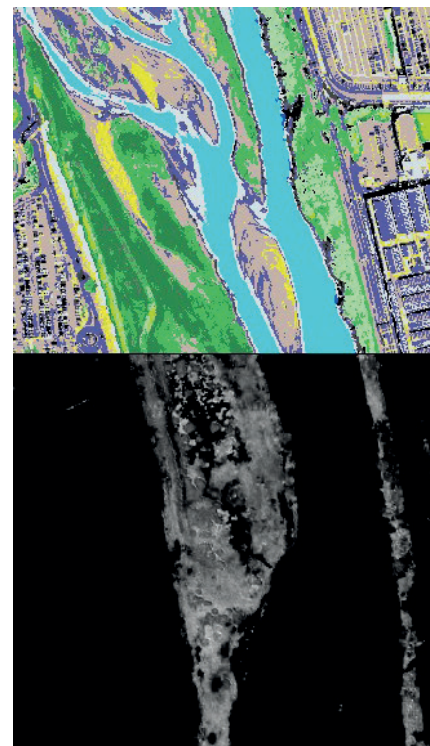


Figure 5. Superposition NDVI sur la classification par balayage (la partie en noir et blanc étant la prolongation de la partie couleur).



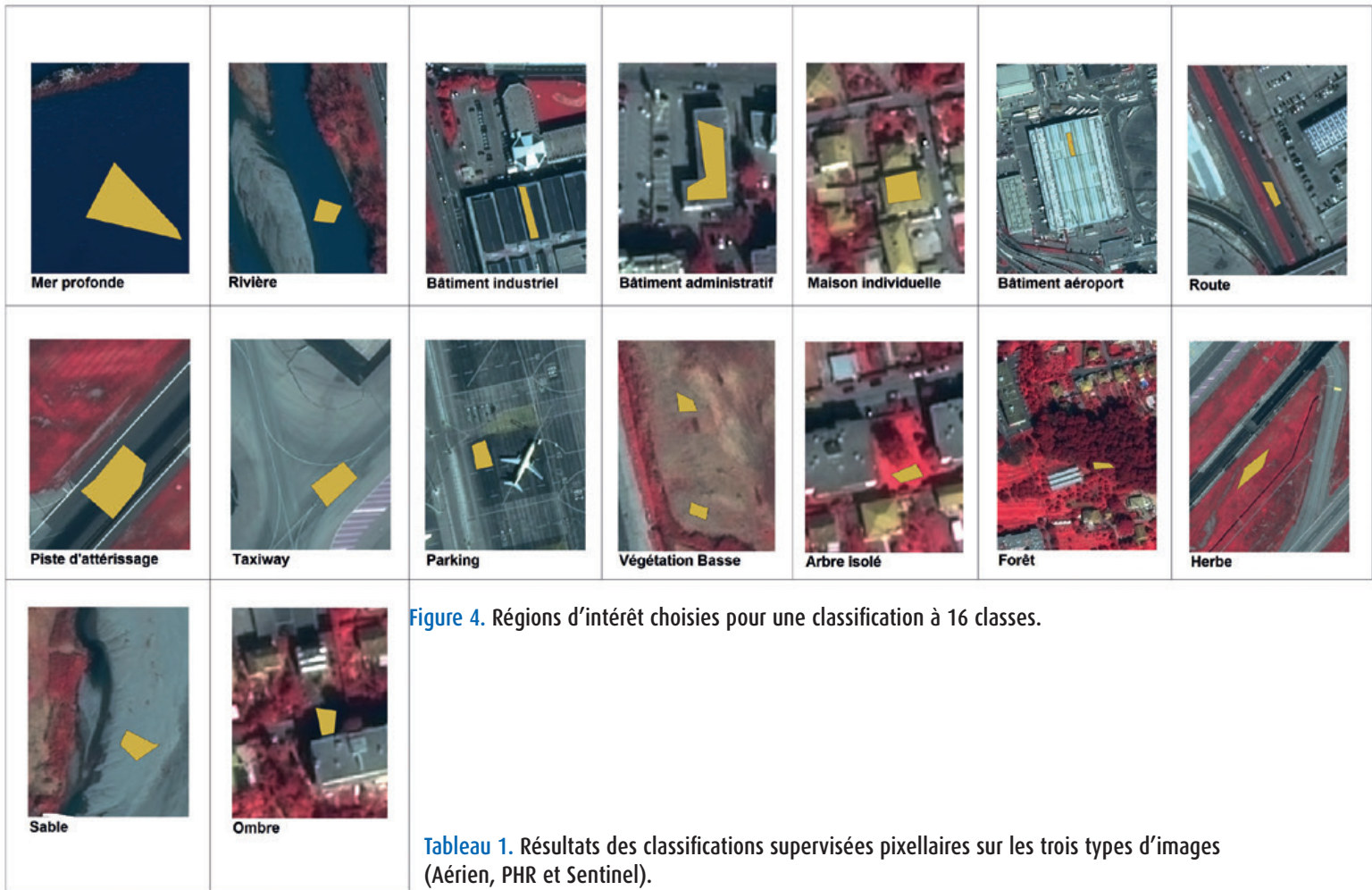
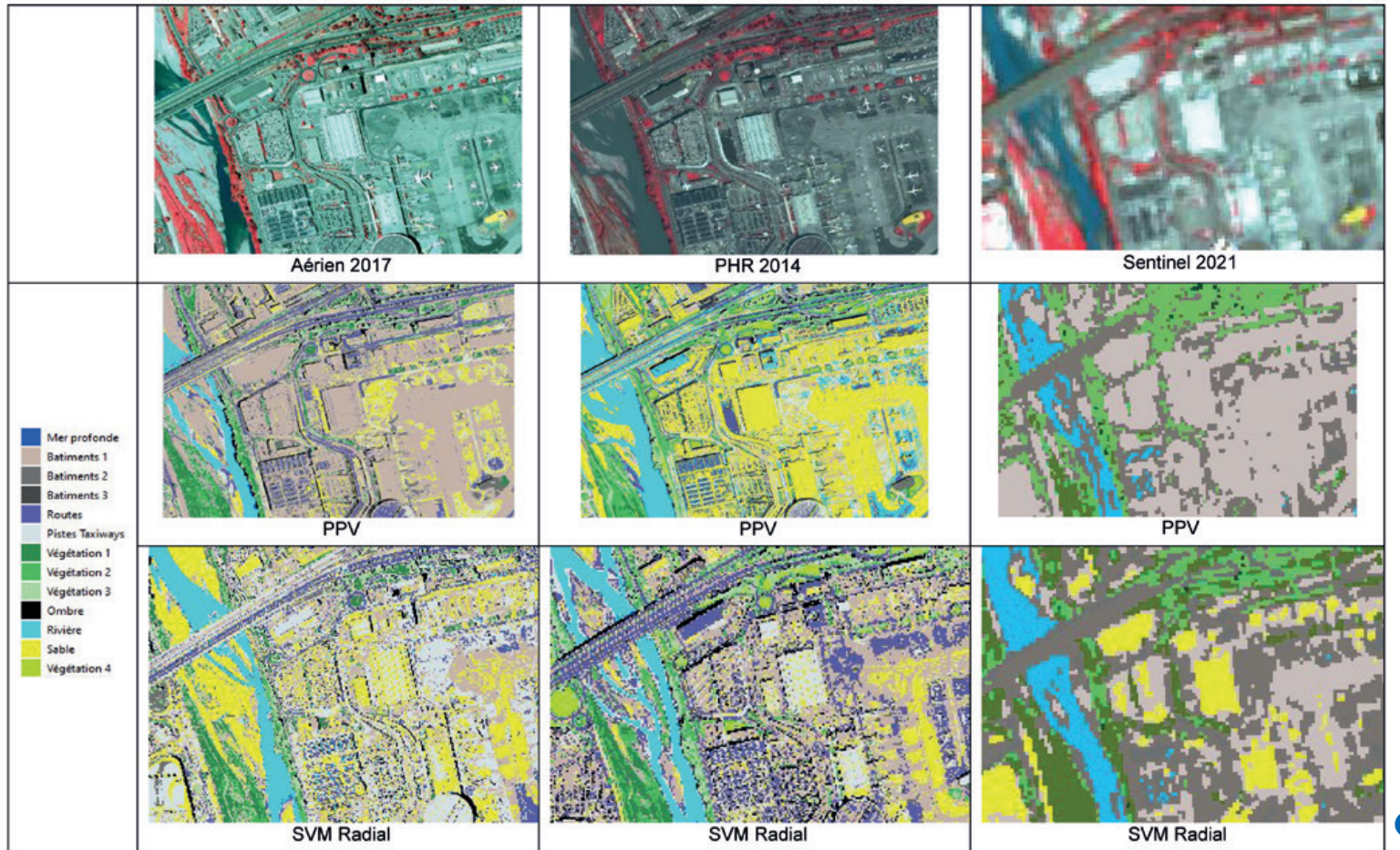


Figure 4. Régions d'intérêt choisies pour une classification à 16 classes.

Tableau 1. Résultats des classifications supervisées pixellaires sur les trois types d'images (Aérien, PHR et Sentinel).





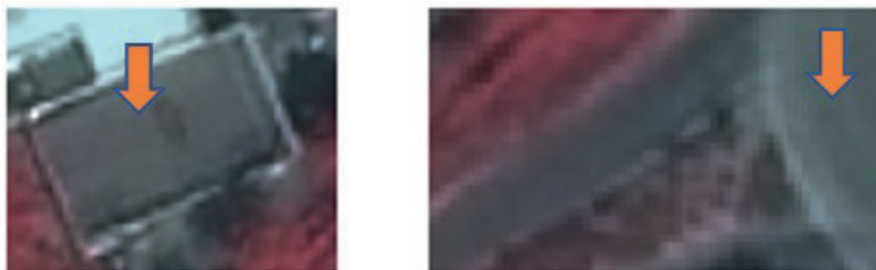


Figure 6. Confusion bâtiment - route sur image PHR 2018.



tection de bâtiments partout dans la classification, la végétation est également bien détectée, mais de multiples fausses alertes sont visibles sur les taxiways et baissent la qualité de cette classification.

Suite à cette étude, nous pouvons dire que les résultats les plus performants sur la détection de la végétation concernent les images PHR. Ceci a été confirmé visuellement en superposant des zones de végétation détectées par calcul de NDVI (*Normalised Detection Vegetation Index*, en blanc sur la figure 5). Nous constatons que les zones de végétation NDVI correspondent bien aux zones de végétation de la classification SVM Radial PHR 2014.

Une confirmation chiffrée par comparaison avec la BDTopo® a été effectuée au paragraphe sur le contrôle de la qualité. Concernant les bâtiments, ils sont souvent surdétectés, car confondus avec d'autres objets comme dans la figure 6 où nous constatons que la réflectance entre le toit du bâtiment et la route sont quasiment semblables.

## Les classifications orientées objet

### ■ Concept

La classification orientée objet repose au préalable sur une segmentation des images, c'est-à-dire que l'on agrège les pixels de l'image en régions homogènes en termes de radiométrie, mais aussi de formes et de textures<sup>1</sup> [De Joinville, 2011].

L'algorithme de segmentation choisi dans la librairie OTB (appelé *MeanShift*) repose sur une croissance de région basée sur la moyenne des radiométries des pixels pris en compte dans le voisinage étudié.

Cette méthode est *a priori* bien adaptée à la détection des obstacles surfaciques végétation et bâtiments à condition toutefois que la radiométrie de ces deux types d'objets soit suffisamment homogène.

<sup>1</sup> La librairie OTB ne nous a permis d'effectuer les tests de segmentation que sur des critères de radiométrie.

### ■ Chaîne de traitement

La figure 7 décrit les différents traitements effectués lors de la réalisation de la classification orientée objet. Le classifieur utilisé était le SVM et les ROIs

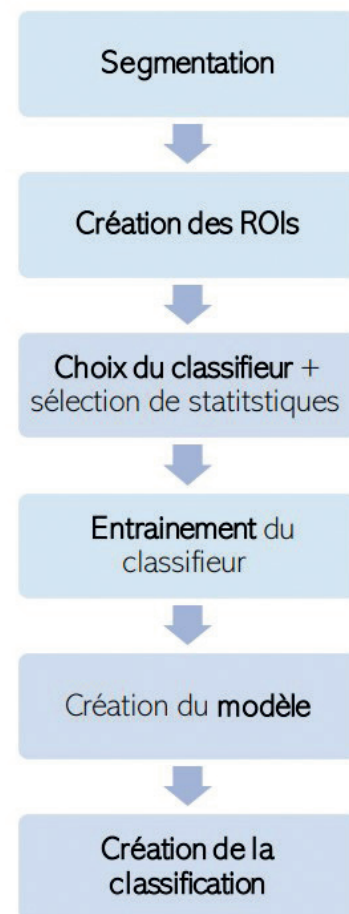


Figure 7. Chaîne de traitement d'une classification orientée objet sous OTB.

<p>Aérien 2017</p>	<p>PHR 2014</p>	<p>Sentinel 2021</p>
<p>SVM Linéaire</p>	<p>SVM Polynomial</p>	<p>SVM Linéaire</p>

Tableau 2. Résultats des classifications supervisées orientées objet sur les 3 types d'images (Aérien, PHR et Sentinel).



étaient des régions présélectionnées correspondant aux mêmes classes que celles identifiées dans la classification pixellaire.

## Résultats

Le *tableau 2* fournit les résultats des classifications orientées objet sur trois types d'images : images aériennes, images satellite PHR et images satellite Sentinel.

## Discussions, difficultés rencontrées

Des matrices de confusion ont montré que l'on observe une majorité des confusions entre les classes taxiway, routes, bâtiments.

Ces confusions peuvent s'interpréter tout d'abord par la forte variabilité des radiométries au sein des ROIs en raison de la haute résolution des images PHR et aériennes qui rend difficile la présence de surfaces homogènes.

En effet, les algorithmes de segmentation proposés par OTB ne tiennent compte que de facteurs radiométriques, contrairement à des algorithmes utilisés dans d'autres logiciels qui tiennent compte de critères de formes et de textures. Les indices statistiques sont alors insuffisants ou trop peu judicieux et ne permettent pas une bonne classification.

Pour Sentinel, la moins bonne résolution spatiale facilite la classification sur des surfaces comme la végétation, mais rend impossible la détection correcte de certains objets d'emprise surfacique restreinte comme des maisons individuelles, des arbres isolés ou des bâtiments industriels de petite taille.

## Utilisation de données altimétriques pour extraire la végétation et les bâtiments

La détection des obstacles végétation et bâtiments par classification supervisée n'est pas associée à une notion d'altitude au-dessus du niveau de la mer.

Nous avons donc dû filtrer ces données en fonction de ce critère par exploitation d'un MNS (Modèle numérique de surface) de corrélation fourni par l'IGN. Ce sont en effet les zones élevées de végétation ou de bâtiments qui peuvent

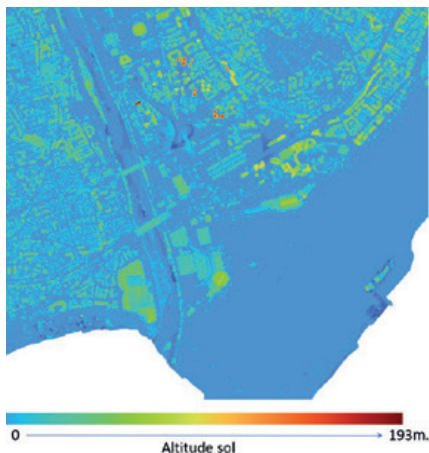


Figure 8. MNS de corrélation sur le site de l'aéroport de Nice.

représenter un danger potentiel pour les avions.

## La végétation

La détection des obstacles végétation par classification supervisée a montré ses limites en termes de distinction entre la végétation basse et la végétation haute.

Le MNS de corrélation fourni par l'IGN nous a permis de filtrer la végétation



Figure 9. PHR 2018.

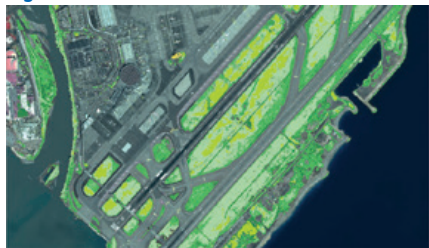


Figure 10. PHR 2018 avec végétation détectée par SVM Polynomial.

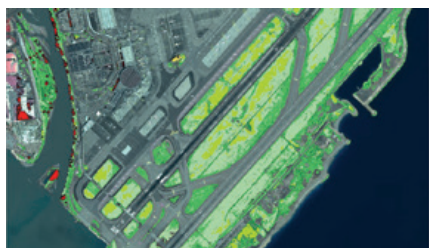


Figure 11. Végétation de plus de 5 m d'altitude-sol (en rouge).



Figure 12. PHR 2018.

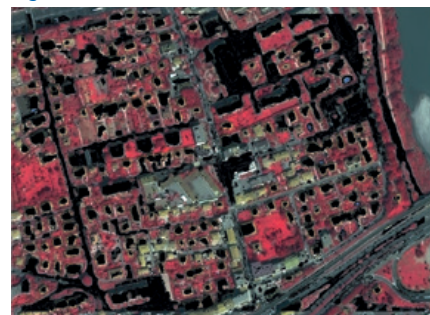


Figure 13. PHR 2018 avec bâtiments détectés par SVM Polynomial.



Figure 14. Bâtiments de plus de 10 m d'altitude-sol.

détectée par classification supervisée pixellaire (SVM noyau Polynomial) au voisinage de la piste dont l'altitude par rapport au sol était supérieure à 5 m (en rouge dans la *figure 11*).

## Les bâtiments

Nous avons suivi la même procédure pour les bâtiments. Nous avons extrait ceux qui sont à plus de 10 m. d'altitude (en noir dans la *figure 14*) sur une zone à proximité de l'aéroport où la classification pixellaire SVM (noyau Polynomial) a correctement fonctionné sur ce type d'objets.

## Contrôle qualité

### Méthode adoptée

Pour évaluer notre classification, nous avons choisi la BDTopo® comme vérité terrain en mesurant sur une zone située au voisinage de l'aéroport de Nice le



pourcentage de recouvrement entre la classe végétation issue de la classification de l'image PHR 2018 et la couche végétation de la BDTopo®.

## Résultats obtenus

**Sentinel 2021 :**

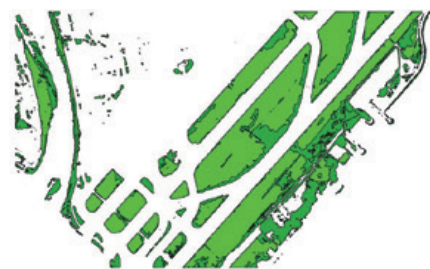
Pourcentage de recouvrement : 58 %



**Figure 15.** Superposition zones de végétation intersectées (vert clair) - zones de végétation détectées (vert foncé) pour Sentinel.

**PHR 2018**

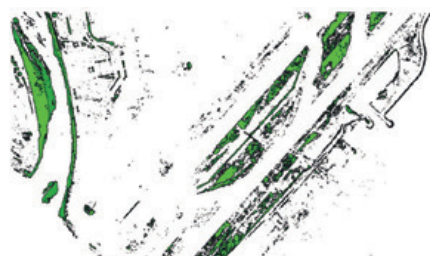
Pourcentage de recouvrement : 63 %



**Figure 16.** Superposition zones de végétation intersectées (vert clair) - zones de végétation détectées (vert foncé) pour PHR.

**Aérien 2020 :**

Pourcentage de recouvrement : 61 %.



**Figure 17.** Superposition zones de végétation intersectées (vert clair) - zones de végétation détectées (vert foncé) pour l'aérien.

Les résultats montrent que ce sont les images PHR qui sont les plus fiables en termes de détection de la végétation par



**Figure 18.** Superposition BD Topo® sur l'image PHR 2018.

classification SVM (noyau Radial). Cela confirme les résultats acquis avec les matrices de confusion (cf. paragraphe sur les classifications pixellaires).

Cependant, cette méthode de contrôle par rapport à la BDTopo® ne nous a paru pas totalement fiable car, comme le montre la *figure 18*, il y a certaines zones de végétation (en rouge dans l'image PHR 2018 IRC) qui ne sont pas couvertes par la BDTopo®.

## Mise à jour des relevés d'obstacles

### Principe

Le principe de la détection de changement est fondé sur l'identification des différences des états d'un objet, d'une surface ou d'un processus en l'observant à différents instants [Lambin, E. F., 1994 ; Chang, 2013 ; Lu, et al., 2004 ; Radke, R., et al., 2005 ; Hussain, et al., 2013 ; Almutairi, A., 2000 ; Nemmour, H., 2016].

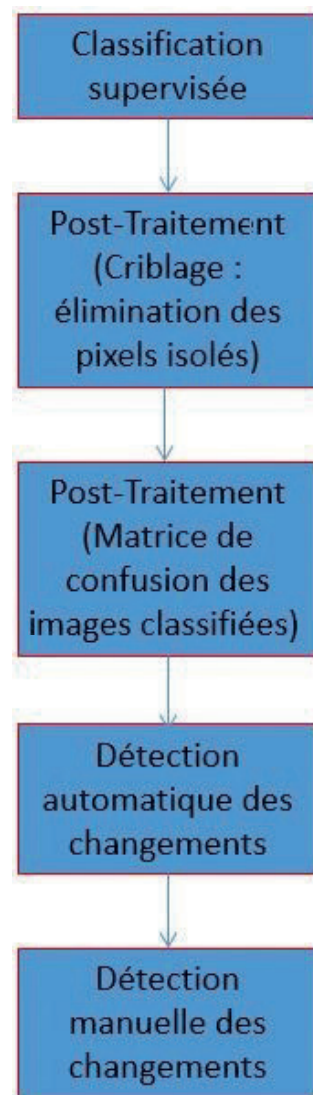
De par leur temps de revisite de plus en plus court, les images satellite sont souvent utilisées pour la détection de changement [Durrieu, S., Deshayes, M., 1994 ; Lacaze, B., 2010. ; Bah Mamadou, D. 2016].

### Détection de changements par classification

Nous avons comparé la végétation acquise par classification PPV entre elles sur les images PHR et aériennes de 2014 et de 2018.

**Chaîne de traitement (cf. figure 19) :**

Nous avons donc appliqué les classifications PPV et nous avons utilisé un outil de post-classification, (Criblage)



**Figure 19.** Chaîne de traitement utilisée pour la détection des changements.

afin d'éliminer les pixels isolés et donc "nettoyer" la classification.

Pour détecter les changements, nous avons comparé les classifications entre elles :

- classification Image satellite 2014 - Image satellite 2018 ;
- classification Image aérienne 2014 - Image aérienne 2018.

Ces comparaisons se sont faites manuellement (analyse visuelle entre les deux classifications) et automatiquement avec l'outil "Changement d'occupation des sols".

### Résultats

La *figure 20* nous donne un exemple de détection de changement sur la végétation sur une zone proche de l'aéroport de Nice entre les images PHR 2014 et PHR 2018.



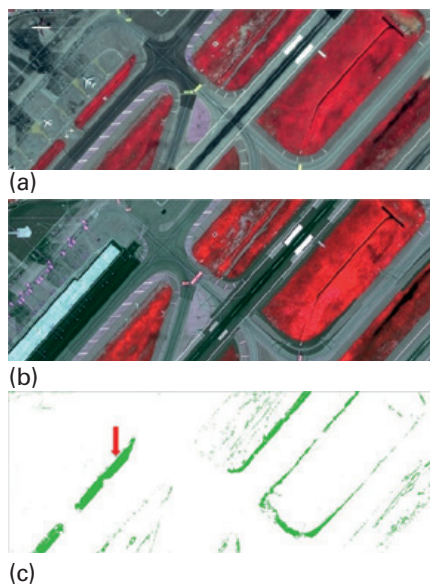


Figure 20

(a) Image satellite 2014, en composition colorée Proche Infra Rouge couleur.  
(b) Image satellite 2018, en composition colorée Proche Infra Rouge couleur.  
(c) Carte de détection de changement de la végétation, en vert, la végétation qui existait en 2014 et qui n'existe plus en 2018. La flèche rouge montre une bande de végétation existant en 2014 remplacée par un bâtiment en 2018.

## Détection de changements par utilisation de l'indice NDVI

### ■ Principe

Nous avons appliqué l'algorithme NDVI aux images satellite et aux images aériennes et nous avons fait une différence entre les deux images NDVI pour détecter un changement de ce dernier pouvant traduire une modification de la végétation entre 2014 et 2018. Les résultats (figure 21) sont encourageants.

### ■ Résultats

- en jaune est représentée toute la végétation qui existait en 2014, mais disparue en 2018 ;
- en blanc les zones de non-changement ;
- en vert la végétation apparue en 2018 et qui n'existait pas en 2014.

## Conclusion et perspectives

L'objectif du travail présenté dans cet article était de mener une étude comparative entre des images satellite et des

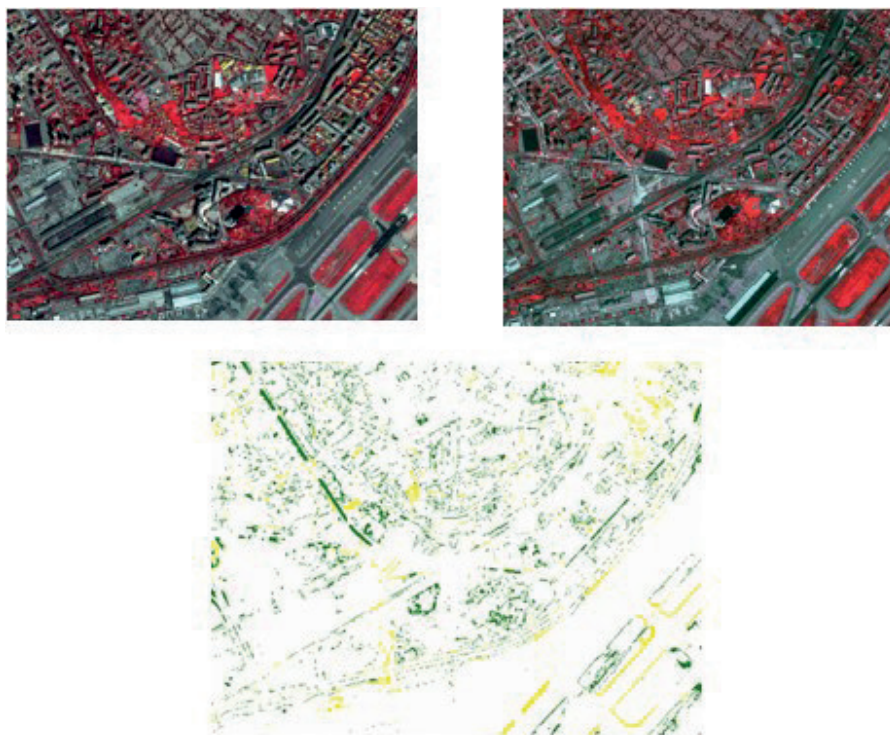


Figure 21. Détection des changements sur les NDVI.

images aériennes dans l'optique de l'amélioration de la qualité des relevés des obstacles à la navigation aérienne et de leur mise à jour (essentiellement la végétation et les bâtiments), cette fonction s'avérant cruciale pour la sécurité des vols.

En termes de détection des zones de végétation par classification pixellaire, les résultats sont légèrement meilleurs pour les images satellite PHR avec un algorithme SVM.

Les classifications orientées objet pourtant porteuses d'espoir, n'ont pas fourni les résultats escomptés du fait que la segmentation proposée par l'OTB ne repose que sur des critères radiométriques. Il conviendrait à l'avenir d'utiliser des algorithmes de segmentation fonctionnant sur des critères de texture et de formes. L'image Sentinel a cependant fourni de bons résultats pour la classification orientée objet du fait de la relative homogénéité de la radiométrie de ses pixels dans les trois bandes spectrales (Proche Infrarouge, Rouge, Vert) par rapport aux images haute résolution (Pléiades ou Aériennes).

Concernant la détection des bâtiments, les deux types de classifications (pixelaires et orientées objet) ont clairement montré leurs limites (fortes confusions

avec d'autres objets comme les routes). Là aussi, la classification orientée objet avec prise en compte d'un critère forme apporterait une nette évolution car la majorité des bâtiments ont des formes rectangulaires.

Le tri des obstacles avec un MNS a été efficace et assez simple à mettre en œuvre, nul doute que les futures données du projet LiDAR HD de l'IGN (<https://www.ign.fr/institut/lidar-hd-vers-une-nouvelle-cartographie-3d-du-territoire>) permettront de sélectionner les obstacles en fonction de leur altitude avec une bien meilleure précision et d'en détecter de nettement plus fins comme des arbres isolés, voire même des antennes.

Des travaux de détection de changement d'obstacles (végétation et bâtiments) entre 2014 et 2018 sur les images satellite et aériennes ont été menés également. Les résultats acquis sur la végétation restent corrects, mais de fausses alarmes, essentiellement sur les bâtiments, sont apparues du fait des confusions détectées dans les algorithmes de classification. Pour compléter le processus de détection de changement, nous avons choisi de travailler sur des images de NDVI pour mieux visualiser l'évolution de la végétation et nous avons noté que cette approche était particulièrement intéressante. ●



## Contacts

Olivier de Joinville<sup>1</sup>, Chloé Marcon<sup>2</sup>,  
Moumina Idriss Daoud<sup>3</sup>

1 DGAC, Service de l'Information  
Aéronautique, 33700 Mérignac  
olivier.de-joinville@aviation-civile.gouv.fr

2 IGN, Service de l'Imagerie Aérienne,  
60000 Beauvais

3 Université Paris, 75013 Paris

## Références

Almutairi, A. 2000. "Monitoring land cover change detection in an arid urban environment: a comparison of change detection techniques". M.SC Thesis, college of Arts and Sciences, West Virginia University. USA.

Bah Mamadou, D., 2016., Rapport de stage M2 Géomatique SIGMA, "Mise en place d'un outil de suivi de la végétation à partir de données de télédétection à basse résolution spatiale", pp. 1-70.

Bersini, H., Kevers, L., Mantrach, A., Fairon, C., Marco Saerens. M., 2020, *Classification supervisée hybride par motifs lexicaux étendus et classificateurs SVM*.

Cariou, V., Qannari, E. M., Verdun, S., 2010. "Discrimination et Classification supervisée en référence à des prototypes", 42<sup>es</sup> Journées de Statistique, pp. 2-6.

Chang, C.-I., *Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis*, Wiley, 2013.

De Joinville, O., Bouad N., Tadjian N., Alajouanine A., Toth G., Labarre S., Campmas L., 2021, Article XYZ n° 169 pp. 25-32.

De Joinville. "Classification orientée objet supervisée d'une forêt avec une sélection guidée d'attributs personnalisés". Revue de la SFPT (RFPT), n° 195, Septembre 2011.

Durrieu, S., Deshayes M., 1994 "Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements milieu forestier. Application aux monts de Lacau", Ann. For. Sci. 51 (1994) pp. 147-161.

Guadat, S., 2013, *Classification par plus proches voisins, Optimalité sous hypothèse de marge*, Institut de Mathématiques de Toulouse, Université Paul Sabatier.

Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., and Stanley, D., 2013. *Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, n° 80. pp. 91-106.

Keshk, H., Yin, X. C., 2020, *International Journal of Sensors Wireless Communications and Control*, Volume 10, Number 1, 2020, pp. 37-46 (10).

Lacaze, B., 2010. "Comparaison des données des satellites grand champ pour le suivi des variations saisonnières de l'état de la végétation en Afrique de l'Ouest".

Lambin, E. F., Strahler, A. H., 1994. "Change vector analysis in multitemporal space : a tool to detect and categorize land cover change processes using height temporal resolution satellite data", pp. 191-198.

Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., and Moran, E., 2004. *Change detection techniques*. International Journal of Remote Sensing, n° 25(12). pp. 2365-2401.

Nemmour, H., 2016. "Méthodes de Détection de Changement dans les Images Optiques de Télédétection".

Radke, R., Andra, S., Al-Kofahi, O., and Roysam, B., 2005. *Image change detection algorithms: a systematic survey*. IEEE Transactions on Image Processing, 14(3): pp. 294-307.

SIA, Service de l'information aéronautique, <https://www.sia.aviation-civile.gouv.fr/>, [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/1\\_Services\\_info\\_aero\\_IAIP.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/1_Services_info_aero_IAIP.pdf).

## ABSTRACT

**Key words:** *aeronautical obstacles, change detection, satellite images, aerial images, Pléiade, DEM, DMS, pixel and object-oriented classification, 3D rendering, QGIS.*

*The Aeronautical Information Service (SIA) belongs to DGAC (General Direction of Civil Aviation) which publishes and operates obstacles to air navigation in order to increase aerial security around the airports.*

*The article offers a comparative study between aerial image data and satellite image data in both following topics: aerial navigation obstacles detection (especially vegetation and buildings) and updating.*

*This study shows that satellite images, thanks to their radiometric and geometric quality, offer a slightly better potential for AIS. Future studies using other optical, Lidar and Radar sensors should be carried out to confirm this trend.*

## COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

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

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

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

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

**KOEHL Mathieu**,  
maître de conférences, INSA  
Strasbourg

**LEQUEUX James**,  
astronome émérite à l'Observatoire  
de Paris

**MAINAUD DURAND Hélène**,  
ingénieur topographe, CERN Genève

**MISSIAEN Dominique**,  
ingénieur topographe, CERN Genève

**MOPIN Irène**,  
ingénieur recherche, ENSTA Bretagne,  
Brest

**MOREL Laurent**,  
professeur des universités, ESGT Le  
Mans

**PANTAZIS N. Dimos**,  
professeur, TEI Athènes

**POLIDORI Laurent**,  
directeur du CESBIO, Toulouse

**REIS Olivier**,  
ingénieur, traducteur, Sarreguemines

**ROCHE Stéphane**,  
professeur, Université Laval, Québec

**TOUZÉ Thomas**,  
dr. ingénieur géomètre, EDF,  
Grenoble

**TROUILLET Michel**,  
ingénieur topographe, Lyon

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



# Illustration par un exemple pratique de l'utilisation de méthodes d'ajustement robustes en topographie

■ Stéphane DURAND

*Dans la méthode des moindres carrés, la présence de fautes dans les mesures impacte directement la solution ajustée et les résidus sur les observations. En particulier, du fait de la corrélation entre les résidus, une faute sur une observation peut être indétectable sur le résidu correspondant, mais affecter les résidus associés aux autres observations, ce qui complique fortement le processus de détection et d'identification des fautes. Il est parfois préférable d'utiliser des méthodes robustes d'ajustement qui possèdent deux principaux atouts : la solution ajustée est très peu affectée par la présence de fautes, et les valeurs des résidus permettent de mieux faire ressortir les observations portant les fautes. Dans cette contribution, nous utilisons un exemple pratique pour montrer, d'une part, l'impact des fautes sur la solution des moindres carrés et la technique classiquement employée pour détecter et identifier les mesures portant les fautes et, d'autre part, les avantages que peut présenter l'utilisation d'estimateurs robustes.*

## Introduction

En topographie où les notions de contrôle et de redondance des observations sont reines, la méthode des moindres carrés est la méthode privilégiée pour l'ajustement des observations. Flexible, relativement simple à mettre en œuvre, d'autant plus efficace que les observations sont surabondantes par rapport aux inconnues, elle permet, en plus d'obtenir des valeurs ajustées pour les inconnues cherchées, de calculer leur précision formelle et d'estimer les erreurs de mesures.

La méthode des moindres carrés suppose des observations exemptes de fautes et uniquement affectées d'erreurs accidentelles. Néanmoins, si, malgré toutes les précautions prises lors de l'acquisition des mesures, il reste des fautes dans les observations, la solution ajustée obtenue est directement affectée par ces fautes, sous la forme d'un biais faussant sa valeur, parfois de manière inacceptable pour l'utilisateur.

Afin d'étudier la sensibilité d'une méthode d'ajustement aux données

aberrantes, on exploite la notion de fonction d'influence, ou courbe d'influence, introduite par Hampel (1974), associée à la solution ajustée considérée comme une variable statistique. La sensibilité aux erreurs aberrantes est alors définie comme la borne supérieure de la norme de sa fonction d'influence. Dans le cas de la méthode des moindres carrés, en supposant une distribution gaussienne des erreurs, cette fonction d'influence n'est pas bornée, d'où une sensibilité aux valeurs aberrantes infinie et une non-robustesse de la méthode.

Il est donc essentiel, lors de la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés, de s'assurer qu'aucune faute n'est présente dans les mesures, ou au minimum, que les fautes restantes ont un impact négligeable, ou acceptable pour l'utilisateur, sur la solution ajustée.

Une première approche est d'exploiter les propriétés statistiques de la solution des moindres carrés, associées à l'hypothèse supplémentaire d'un comportement gaussien des erreurs accidentelles de mesures. Il est alors possible de mettre en œuvre des tests

statistiques permettant, dans une certaine mesure, et avec un certain seuil de probabilité, de détecter la présence de fautes (test de validation globale dit test du  $\chi^2$  [chi-deux ou chi-carré]) et d'identifier la ou les observations portant des fautes (test individuel sur la valeur du résidu normé). Il est également possible de quantifier l'ordre de grandeur d'une faute ainsi que l'impact des fautes non détectables par nos tests sur la solution ajustée (notion de fiabilité externe). La dépendance des résidus de mesures dans la méthode des moindres carrés complique malheureusement les choses et oblige le topographe à adopter une méthodologie particulière pour l'identification des fautes et l'analyse de leurs causes.

Une seconde approche consiste à délaisser la méthode des moindres carrés au profit de méthodes moins sensibles à la présence de fautes. Ces méthodes, dites robustes, sont caractérisées par une fonction d'influence bornée et permettent de disposer d'une solution ajustée peu impactée par la présence de fautes, d'identifier plus facilement les observations portant des fautes, ainsi que l'ordre de grandeur de la faute, directement en étudiant les résidus de mesures.

Il faut néanmoins garder à l'esprit que ces méthodes robustes n'ont pas que des avantages. Elles ne permettent souvent que de calculer la solution ajustée au problème, sans permettre d'obtenir de précision formelle associée. Elles sont également souvent plus complexes à mettre en œuvre et plus gourmandes en calculs que la méthode des moindres carrés. Et surtout, elles possèdent toutes un point d'effondrement (ou de rupture), c'est-à-dire un niveau de contamination des observations par des fautes au-delà duquel elles



perdent leur robustesse : quantité trop importante, valeurs trop fortes ou localisation sur certains types d'observations à certains endroits du réseau.

En pratique, les méthodes robustes sont généralement exploitées comme étape préliminaire et supplémentaire à l'ajustement des observations par la méthode des moindres carrés, dans des situations où l'on dispose d'une quantité importante d'observations avec des interrogations sur leur qualité.

L'objectif de cette contribution est d'illustrer, à partir d'un exemple pratique, l'impact de la présence de fautes sur la solution classique des moindres carrés et l'intérêt que peuvent avoir les méthodes robustes dans certains cas. Cet article est basé sur une partie du cours dispensé depuis plusieurs années aux étudiants en dernière année du cycle ingénieur de l'École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes du Cnam (ESGT).

Il existe de très nombreuses méthodes d'ajustement robustes, développées au cours du temps pour répondre à des besoins dans différents domaines : transformée de Hough [Hough, 1959], M-estimateurs [Huber, 1964] moindres carrés médians [Rousseeuw, 1984], méthodes de type RANSAC [*Random Sample Consensus* dérivées de Fischler and Bolles, 1981] et bien d'autres. L'idée de cet article n'est pas de proposer une revue exhaustive des méthodes robustes et des concepts associés, mais de mettre en application, sur un exemple concret, certaines d'entre elles. Le lecteur intéressé par plus d'informations sur les aspects théoriques et une liste plus complète de méthodes robustes pourra se tourner vers des documents tels que [Morineau, 1978; Jajo, 2005; Banaś, 2012].

## Jeu de données test

Afin d'illustrer cet article, nous avons besoin d'observations et de fautes sur ces observations. Considérons donc le problème suivant : dans le plan horizontal, nous disposons d'un ensemble de points  $P_1, \dots, P_5$  de coordonnées connues, et d'un point  $M$  dont on cherche à déterminer les coordonnées, à partir d'observations de distances

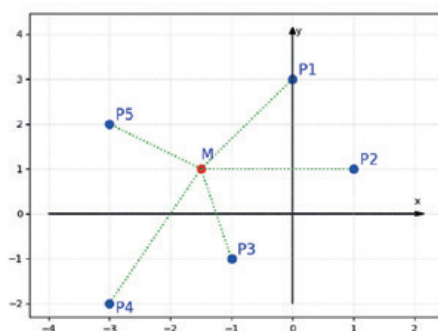


Figure 1. Localisation des points du réseau de multilatération.

horizontales réalisées depuis le point  $M$  sur chaque point  $P_i$ . La figure 1 illustre la répartition des points et la forme de notre réseau test : en bleu les points connus en coordonnées, en rouge le point avec les coordonnées à ajuster. Pour fabriquer un jeu d'observations associé à ce problème, considérons les coordonnées locales planes théoriques pour les points indiquées dans la table 1.

Point	Coordonnées locales	
	Est (m)	Nord (m)
$P_1$	0	3
$P_2$	1	1
$P_3$	-1	-1
$P_4$	-3	2
$P_5$	-3	2
$M$	-1.6	1.1

Tableau 1. Coordonnées planes locales théoriques des points du réseau.

Ces coordonnées théoriques permettent de calculer les distances horizontales théoriques entre le point  $M$  et chaque point  $P_i$ . En considérant une précision *a priori* pour chaque mesure de  $\sigma = 2$  mm, et un comportement gaussien des erreurs de mesures, nous pouvons facilement générer des observations de distances horizontales entre le point

$M$  et chaque point  $P_i$  par addition de la distance théorique à une valeur d'erreur accidentelle tirée aléatoirement de la loi normale centrée d'écart-type  $\sigma$ . La colonne "jeu sans faute" du tableau 2 indique les valeurs des observations ainsi générées.

Afin de disposer d'un second jeu d'observations, cette fois possédant des fautes, ajoutons, comme indiqué dans la colonne "jeu avec fautes" du tableau 2, une faute de 5 cm sur la mesure de distance entre  $M$  et  $P_1$  ainsi qu'une faute de 2 cm sur la mesure de distance entre  $M$  et  $P_3$ .

Nous pouvons maintenant utiliser les deux jeux d'observations du tableau 2 pour réaliser l'ajustement des coordonnées planes du point  $M$ , en utilisant la méthode des moindres carrés et quelques méthodes d'ajustement robustes, et comparer les résultats obtenus.

## Ajustement par la méthode des moindres carrés

Une formalisation classique de la résolution d'un problème par la méthode des moindres carrés est de considérer un ensemble de  $n$  observations  $l_i$  regroupées dans un vecteur  $L$  et de ( $m \leq n$ ) inconnues  $x_i$ , regroupées dans un vecteur  $X$ . On peut relier chaque observation  $l_i$  à l'ensemble des inconnues par une équation d'observation de la forme :

$$l_i = f_i(X) + v_i \quad (1)$$

Expression dans laquelle  $f_i$  correspond à la fonction mathématique exprimant la relation théorique entre la mesure et les inconnues et  $v_i$  à l'erreur accidentelle sur la mesure.

En regroupant l'ensemble des équations d'observation sous la forme

Station	Point visé	Distance horizontale théorique (m)	Jeu sans faute (distance en m)	Faute (m)	Jeu avec fautes (distance en m)
M	$P_1$	2.48395	2.484	0.05	2.534
M	$P_2$	2.60192	2.599		2.599
M	$P_3$	2.18403	2.183	0.02	2.203
M	$P_4$	3.40147	3.399		3.399
M	$P_5$	1.66433	1.669		1.669

Tableau 2. Distances horizontales théoriques, jeu d'observations sans faute, fautes et jeu d'observations avec fautes



d'une fonction  $f$  de  $\mathbb{R}^m$  dans  $\mathbb{R}^n$ , on peut exprimer le modèle fonctionnel sous la forme vectorielle :

$$L = f(X) + V \quad (2)$$

La résolution par la méthode des moindres carrés d'un tel problème passe par sa linéarisation (développement de Taylor au premier ordre) autour de valeurs approchées  $X_0$  des inconnues sous la forme :

$$B = A(X - X_0) + V \quad (3)$$

Expression dans laquelle  $B = L - L_0$  est le vecteur des différences entre observation  $L$  et valeur théorique des observations  $L_0 = f(X_0)$  calculée à partir des équations d'observation et de la valeur approchée des inconnues, et  $A$  la matrice des dérivées partielles des équations d'observation par rapport à chaque inconnue calculées en  $X_0$ . Le défaut de linéarité impliqué par la linéarisation est pris en compte par itération sur la solution approchée, jusqu'à convergence du système [Mikhail and Ackermann, 1976; Caspary and Rüeger, 2000].

En sciences de la mesure, on souhaite en général tenir compte de la précision de la mesure pour pondérer les observations. On utilise alors la matrice de covariance  $s_0^2 Q_L$  sur les observations, avec  $Q_L$  la matrice de covariance *a priori*, qui indique les précisions relatives des mesures les unes par rapport aux autres et  $s_0^2$  appelé facteur unitaire de variance, qui fait le lien entre précision relative et absolue. On forme alors la matrice de pondération des mesures  $P = Q_L^{-1}$  et on peut calculer la solution des moindres carrés, notée  $\hat{X}$  par la suite, par :

$$\hat{X} - X_0 = (A^T P A)^{-1} (A^T P B) \quad (4)$$

À l'issue d'un traitement par la méthode des moindres carrés, on obtient également une estimation des erreurs accidentelles sur les mesures, donnée par le vecteur des résidus de mesures :

$$\hat{V} = B - A(\hat{X} - X_0) \quad (5)$$

Ce vecteur des résidus est un indicateur essentiel pour juger de la qualité du traitement réalisé et permettre d'identifier d'éventuelles fautes sur les observations.

Comme indiqué dans [Caspary and Rüeger, 2000], dans le processus de détection de fautes associé à la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés, une première étape est la réalisation d'un test de validation globale, aussi appelé test du  $\chi^2$ . Il s'agit de vérifier l'hypothèse d'un comportement de loi normale centrée, de matrice de covariance  $s_0^2 Q_L$  pour le vecteur  $V$  des erreurs accidentelles de mesures, à partir de la statistique :

$$T = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{s_0^2} \sim \chi_{n-m}^2 \quad (6)$$

Si l'hypothèse  $V \sim N(0, s_0^2 Q_L)$  est vérifiée, alors la statistique  $T$  suit une loi du chi-carré à  $(n-m)$  degrés de liberté, ce qui permet de construire un intervalle de validation de sa valeur pour un seuil de confiance donné. L'échec de ce test de validation globale permet de détecter la présence de fautes potentielles dans les mesures. La stratégie aujourd'hui la plus largement employée pour identifier les observations portant des fautes lorsque les erreurs sont normalement distribuées est celle proposée par [Baarda, 1968]. Elle fait l'hypothèse d'un facteur de variance  $s_0^2$  connu et utilise comme statistique la valeur du résidu normé (aussi appelé résidu "studentisé" ou normalisé), associé à chaque observation, défini par :

$$\forall i = 1, \dots, n, \quad \hat{w}_i = \frac{\hat{v}_i}{s_0 \sqrt{q_{v_{ii}}}} \quad (7)$$

Expression dans laquelle  $q_{v_{ii}}$  est l'élément  $(i,i)$  de la matrice de covariance  $Q_V$  associée au vecteur  $\hat{V}$  des résidus de mesures définie par :

$$Q_V = Q_L - A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (8)$$

Sous l'hypothèse que l'erreur accidentelle  $v_i$  associée à la  $i$ -ème observation suit une loi normale centrée de précision  $s_0 q_{L_{ii}}$  (notée  $N(0, s_0 q_{L_{ii}})$ ), avec  $s_0$  connu, le résidu normé suit

une loi normale centrée réduite. Pour un seuil de confiance donné, on peut ainsi construire un intervalle de validation de la valeur du résidu normé et tester la présence de faute sur une observation à la vue de son résidu. On parle ainsi de validation individuelle des observations à partir de son résidu normé.

Dans le cas de notre exemple, notre problème est constitué de  $n = 5$  observations, les distances horizontales mesurées entre les points et  $m = 2$  inconnues, les coordonnées planes du point  $M$ . Les équations d'observation liant les coordonnées  $(x_M, y_M)$  du point  $M$  ainsi que les coordonnées  $(x_i, y_i)$  des points  $P_i$  aux observations de distance horizontale  $Dh_i$  entre  $M$  et  $P_i$  sont de la forme :

$$Dh_i = \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2} \quad (9)$$

La linéarisation de ces équations nécessite de disposer de coordonnées approchées pour le point  $M$  qui peuvent s'obtenir de différentes manières, l'une d'elles étant l'utilisation d'un opérateur de calcul topographique (multilatération) sur un sous-ensemble des observations. Il est également possible de recourir à des opérateurs topographiques "robustes" pour déterminer ces coordonnées approchées, comme proposé par [Tracol, 2012] dans son projet de fin d'études à l'Insa Strasbourg. Dans notre exemple, nous considérerons les coordonnées approchées du point  $M$  données par le *tableau 1*.

Il nous faut également fixer un seuil d'arrêt du processus itératif, appelé critère de convergence  $\theta$ , dont la valeur est indiquée dans le *tableau 3*. Ce faisant, le processus itératif sur la solution approchée dans les moindres carrés s'arrêtera dès lors que la différence entre la solution ajustée obtenue et la solution approchée sera inférieure en valeur absolue au critère de convergence utilisé.

Paramètre de traitement	Valeur
Coordonnées approchées du point $M$	$(x_M = -1.6 \text{ m}, y_M = 1.1 \text{ m})$
Critère de convergence	$\theta = 0.1 \text{ mm}$

**Tableau 3.** Paramètres de traitement utilisés dans la méthode des moindres carrés.

	Jeu sans faute	Jeu avec fautes
<b>Coordonnées ajustées (en m)</b>		
$\hat{x}_M$	-1.5973	-1.6161
$\hat{y}_M$	1.0976	1.0911
<b>Résidus (en mm)</b>		
(Distance de $M$ vers $P_1$ ) $\hat{v}_1$	0.0	34.8
(Distance de $M$ vers $P_2$ ) $\hat{v}_2$	-0.2	-15.7
(Distance de $M$ vers $P_3$ ) $\hat{v}_3$	2.0	23.9
(Distance de $M$ vers $P_4$ ) $\hat{v}_4$	-1.4	11.0
(Distance de $M$ vers $P_5$ ) $\hat{v}_5$	1.1	10.8

**Tableau 4.** Résultats du traitement par la méthode des moindres carrés des jeux d'observations sans faute et avec fautes.

Le *tableau 4* indique les coordonnées ajustées en mètres, pour les coordonnées du point  $M$  ainsi que les valeurs des résidus (en millimètres), pour le jeu de mesures sans faute (colonne 2) et le jeu de mesures avec fautes (colonne 3).

Si l'on s'intéresse aux résultats du jeu de mesures sans faute, on constate que la solution ajustée obtenue ne correspond pas aux vraies coordonnées du point, même en tenant compte de notre critère de convergence de  $\theta = 0.1$  mm. Ce résultat est tout à fait normal : l'estimateur des moindres carrés étant un estimateur sans biais, nous obtiendrions les coordonnées théoriques du point  $M$  si nous utilisions les distances théoriques et non des mesures incluant des erreurs accidentelles. On constate également des valeurs de résidus faibles, inférieures à la précision  $a$

*priori* considérée pour nos mesures de  $\sigma = 2$  mm.

Regardons maintenant les résultats obtenus pour le jeu de mesures avec fautes. On constate déjà un impact important des fautes sur les coordonnées ajustées : presque 20 mm de décalage sur la coordonnée  $x_M$  et 7 mm sur la coordonnée  $y_M$ . Ce résultat illustre bien la forte sensibilité de la solution des moindres carrés à la présence de fautes dans les mesures. Au niveau des résidus obtenus, on constate que pour toutes les observations, la valeur du résidu, en valeur absolue, dépasse à chaque fois les 10 mm, alors que seules les mesures numéro 1 et 3 contiennent effectivement une faute. Ce résultat illustre le fait que, dans la méthode des moindres carrés, du fait de la dépendance des résidus, une faute

sur une mesure peut impacter la valeur du résidu associé à une autre mesure. Dans certaines situations également, le résidu associé à une mesure possédant une faute peut ne pas être impacté par cette faute. La notion de fiabilité locale associée à une observation, introduite par [Baarda, 1968], permet de quantifier cet impact.

Les valeurs des résidus données dans le *tableau 4* pour le jeu de mesures avec fautes nous poussent naturellement à envisager la présence effective d'une ou plusieurs fautes. En suivant le processus classique de détection et d'identification de fautes associé à la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés, nous choisissons un seuil de confiance classique de 95 %, et réalisons les tests de validation globale et individuelle (avec un facteur unitaire de variance connu  $s_0^2 = 1$ ). Les valeurs des différentes statistiques utilisées, ainsi que les intervalles de validation des tests sont indiqués dans le *tableau 5*. On constate, sans surprise, pour le jeu de mesures sans faute, la validation du test global ainsi que des tests individuels sur chaque observation au seuil de 95 %.

Pour le jeu de mesures avec fautes, le test de validation globale échoue, nous permettant de détecter la présence potentielle de fautes dans nos observations. Le test de validation individuelle des observations échoue pour nos cinq observations, les résidus normés associés étant tous en dehors de l'intervalle de validation. Pour autant, cela ne signifie pas que nous sommes en présence de cinq fautes, une sur chaque observation. Nous constatons simplement le fait que, du fait de la corrélation entre les résidus, les résidus associés à des mesures saines sont impactés par la présence de fautes sur d'autres mesures.

Afin d'identifier la ou les mesures portant effectivement des fautes, on fait l'hypothèse que pour la mesure portant la faute de module le plus important, le résidu normé associé aura également un module important. Cette hypothèse n'est malheureusement pas toujours vérifiée, l'impact effectif de la faute sur le résidu associé à la mesure dépendant de la valeur de la fiabilité locale

	Jeu sans faute	Jeu avec fautes
<b>Validation globale</b>		
Seuil de confiance utilisé :	95 %	
Valeur de la statistique :	1.809	566.402
Intervalle de validation :	[0.216 ; 9.348]	
Résultat du test :	Validé	
<b>Validation des résidus normés</b>		
Seuil de confiance utilisé :	95 %	
Intervalle de validation	[-1.96 , 1.96]	
$\hat{w}_1$	0.018	-22.125
$\hat{w}_2$	0.101	10.330
$\hat{w}_3$	-1.265	-15.336
$\hat{w}_4$	0.900	-6.983
$\hat{w}_5$	-0.751	-7.109

**Tableau 5.** Tests de validation globale et de validation individuelle pour le traitement par la méthode des moindres carrés des jeux de mesures sans et avec fautes.



sur la mesure. Avec cette hypothèse, on peut mettre en œuvre la méthodologie suivante :

- On s'intéresse en priorité à la mesure pour laquelle le résidu normé possède le module le plus important ;
- On réalise un nouvel ajustement en supprimant temporairement cette observation. Si cette mesure était incohérente avec les autres, son absence doit permettre d'obtenir, pour le test de validation globale, une valeur de la statistique du test plus proche des bornes de l'intervalle de validation du test (en tenant compte d'une variation du degré de liberté associé à la loi du  $\chi^2$  du fait de la mesure supprimée) ;
- Si cela est le cas, la mesure supprimée temporairement semble bien être source d'incohérence dans le traitement, et on cherche à identifier les causes de la présence d'une faute : erreur de retranscription de la mesure, erreur dans la correction préalable d'erreurs systématiques (réfraction, constante de prisme...), erreur dans la hauteur de station ou de prisme... Il est en particulier possible de calculer, à partir de la valeur du résidu et de la fiabilité locale de l'observation, un ordre de grandeur associé à la faute potentielle, qui peut être un bon guide pour identifier la nature de la faute en présence et permettre sa correction. On peut également être amené à supprimer ou repondérer la mesure, si une faute est avérée sans qu'il soit possible d'en comprendre la cause ;
- Si cela n'est pas le cas, c'est que le résidu normé associé à cette mesure était impacté par une faute associée à une autre mesure. On réintègre donc la mesure dans le traitement et on s'intéresse à la mesure possédant le résidu normé en second par ordre d'importance de son module.

Dans le cas de notre exemple, où le type d'observation est toujours le même et le nombre peu important, cette méthodologie est effectivement efficace :

- En enlevant la 1<sup>re</sup> observation (distance entre  $M$  et  $P_1$ ), le test de validation globale échoue toujours, mais avec une valeur de la statistique qui diminue fortement ;
- Sans information permettant de comprendre les causes de la faute, elle ne peut être que supprimée et

on réalise un ajustement sans cette mesure ;

- On identifie ensuite l'observation entre  $M$  et  $P_3$  comme celle ayant le résidu normé avec le module le plus important. En l'enlevant du traitement, le test de validation globale réussit et on a bien enlevé les deux mesures où nous avons inséré des fautes.

Cette méthodologie ne permet malheureusement pas toujours d'identifier à coup sûr les fautes présentes dans un jeu d'observations. Tout dépend en pratique de la quantité et de la diversité des mesures en présence, du nombre d'inconnues ainsi que des causes potentielles de fautes dans ces mesures. L'expérience de l'utilisateur et sa connaissance de la méthodologie de mesure employée jouent également un rôle important. La cause principale de cette complexité est la dépendance entre les résidus dans la méthode des moindres carrés, qui ne facilite pas l'identification des mesures portant des fautes.

## Ajustement robuste par M-estimateurs robustes

Dans la méthode des moindres carrés, on cherche à minimiser l'écart en distance, au sens de la norme induite par la matrice de pondération, entre les observations et leur valeur théorique calculée à partir du modèle fonctionnel et de la solution ajustée. Déterminer la solution des moindres carrés de l'équation (2), revient donc à déterminer la solution au problème de minimisation :

$$\min_{X \in \mathbb{R}^m} \|L - f(X)\|_P^2 = \min_{X \in \mathbb{R}^m} V^T P V \quad (10)$$

En considérant que le vecteur  $V$  des erreurs de mesures suit une loi normale centrée, de matrice de covariance  $\sigma_0^2 \Sigma_L$ , la solution des moindres carrés correspond, d'un point de vue statistique, à l'estimateur du maximum de vraisemblance, c'est-à-dire à la valeur des inconnues permettant d'obtenir les valeurs d'erreurs les plus probables (maximisant la probabilité d'occurrence).

En 1964, Peter J. Huber a proposé une généralisation de la notion d'estimateur par maximum de vraisemblance en introduisant la notion de M-estimateur

[Huber, 1964]. Un M-estimateur correspond à la solution du problème :

$$\min_{X \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^n \rho(v_i) \quad (11)$$

Expression dans laquelle la fonction  $\rho$  est positive, symétrique et possède un minimum en zéro. La solution des moindres carrés est donc un M-estimateur particulier, avec  $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \rho(v_i) = \sum_{j=1}^n q_{Lij} v_i v_j$  dans le cas général et avec  $\forall i \in \{1, \dots, n\}, \rho(v_i) = q_{Lii} v_i^2$  dans le cas d'observations indépendantes.

Parmi les M-estimateurs robustes, certains sont exploités comme méthode principale ou secondaire d'ajustement, dans des logiciels spécialisés dans l'ajustement de mesures topographiques comme LTOP<sup>1</sup>, JAG3D<sup>2</sup>, Move3<sup>3</sup> ou CoMeT<sup>4</sup>. Deux M-estimateurs en particulier sont exploités, que nous mettrons donc en œuvre dans cette étude :

Le M-estimateur associé à l'ajustement en norme L1 :

$$\rho(u) = |u| \quad (12)$$

Le M-estimateur de Huber, défini par :

$$\rho(u) = \begin{cases} \frac{u^2}{2} & \text{si } |u| \leq k \\ k|u| - \frac{k^2}{2} & \text{si } |u| > k \end{cases} \quad (13)$$

Dans cette équation, le paramètre  $k$  est fixé par l'utilisateur. [Rey, 1983] propose la valeur  $k = 1.345$  correspondante à une efficacité asymptotique de l'estimateur de 95 % dans le cas d'erreurs normalement distribuées.

Supposons des observations indépendantes et de même poids. Alors, comme illustré par la figure 2, dans la méthode des moindres carrés, une erreur ayant un module important aura un rôle prédominant par rapport aux autres (car élevée au carré par  $\rho(u) = u^2$ ). Alors que pour les autres méthodes basées sur les M-estimateurs de la norme L1 ( $\rho(u) = |u|$ ) ou de Huber

1 <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/applications/geosoftwares/ltop.html>

2 <https://software.applied-geodesy.org/en/>

3 <https://move3software.com/>

4 <https://comet.esgt.cnam.fr/>

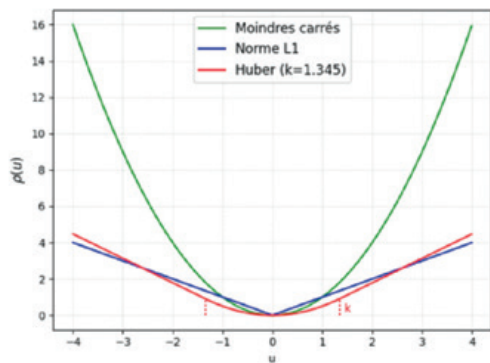


Figure 2. Illustration de la fonction  $\rho$  associée à différents M-estimateurs.

( $\rho(u) = k|u| - \frac{k^2}{2}$  dès que  $|u| > k$ ), son influence sur la solution sera moindre.

Intéressons-nous à la mise en œuvre pratique, pour l'ajustement de mesures topographiques, des M-estimateurs de la norme L1 et de Huber.

## Mise en œuvre de l'ajustement en norme L1

L'objectif est ici de déterminer la solution  $\hat{X}_{L1}$  du problème de minimisation en valeur absolue :

$$\min_{X \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^n |v_i| \quad (14)$$

Une première approche de mise en œuvre est de ramener le problème de minimisation en valeur absolue à la résolution d'un problème de programmation linéaire dont la forme canonique pure est :

$$\begin{cases} \text{Maximiser : } f^T Y \\ \text{sous les } p \text{ contraintes : } CY \leq D \\ \text{avec : } Y \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Expression dans laquelle  $Y$  est le vecteur des  $q$  inconnues à déterminer,  $f$  est un vecteur réel de taille  $q$ ,  $D$  est un vecteur réel de taille  $p$  et  $C$  une matrice réelle possédant  $p$  lignes et  $q$  colonnes. Comme indiqué dans [Morineau, 1978; Bonnel, 1999; Durand, 2021], les éléments  $Y, f, C, D$  peuvent s'exprimer en fonction des matrices  $X, B, A$  classiques associées à la résolution d'un problème par la méthode des moindres carrés, au prix d'une augmentation du nombre des inconnues à déterminer. Il est également possible d'intégrer une pondération des observations, en modifiant les valeurs du vecteur  $f$ .

De nombreuses méthodes existent aujourd'hui pour résoudre un problème de programmation linéaire, avec principalement deux approches. La première consiste à tester les sommets du polyèdre défini par les  $p$  contraintes, illustré par la fameuse méthode du simplexe [Dantzig, 1948, 2016]. La seconde consiste à partir d'un point à l'intérieur de ce polyèdre et à se diriger progressivement vers le sommet solution, comme pour la méthode de Karmarkar (1984).

Pour l'application numérique présentée dans cet article, la résolution du problème de programmation linéaire est réalisée à travers la librairie `Ip_solve`<sup>5</sup>, disponible sous licence LGPL, et facile à interfacer avec différents langages de programmation.

Une autre approche pour la résolution du problème de minimisation en valeur absolue est d'utiliser la technique *IRLS-Iteratively Reweighted Least Squares* [Rice and Usow, 1968; Holland and Welsch, 1977]. L'idée est ici de reformuler le problème de minimisation en valeur absolue sous la forme :

$$\min_{X \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^n |v_i| = \min_{X \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^n |v_i|^{-1} |v_i|^2 \quad (16)$$

On considère alors que  $r_i = |v_i|^{-1}$  est un poids associé au problème de minimisation par les moindres carrés, et on peut déterminer la solution en norme L1 en utilisant la méthode des moindres carrés classique, et en réalisant des itérations sur la matrice de poids utilisée.

## Mise en œuvre de l'ajustement par M-estimateur de Huber

À la connaissance de l'auteur, deux méthodes numériques peuvent être utilisées pour calculer une solution au problème d'ajustement par le M-estimateur de Huber : la méthode de Newton [Chen and Pinar, 1998; Guo, 2003] et la technique IRLS.

Pour produire les résultats présentés dans cette étude, la technique IRLS est utilisée, ainsi qu'une valeur  $k = 1.345$  pour le paramètre de la fonction de

Huber. Avec la technique IRLS, le problème de minimisation est reformulé sous la forme :

$$\min_{X \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^n \alpha(v_i) v_i^2 \quad (17)$$

Avec  $\alpha(v_i)$  considéré comme un poids dans la méthode des moindres carrés d'expression :

$$\alpha(u) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{si } |u| \leq k \\ k|u|^{-1} - \frac{k^2}{2} u^2 & \text{si } |u| > k \end{cases} \quad (18)$$

## Ajustement robuste par algorithme de type RANSAC

Initialement proposé par [Fischler and Bolles, 1981] l'algorithme RANSAC se décline aujourd'hui en toute une famille d'algorithmes, adaptés à différentes situations et besoins d'optimisation des caractéristiques de l'original [Choi, Kim and Yu, 2009]. Largement utilisés dans les domaines de la vision par ordinateur, les algorithmes de type RANSAC peuvent également être utilisés pour réaliser l'ajustement robuste de mesures en topographie [Tarsha-Kurdi et al., 2007].

Comme expliqué par exemple dans [Simonetto, 2021], dans un problème où l'on dispose de  $n$  observations et  $m$  inconnues, l'algorithme RANSAC consiste à sélectionner  $N$  échantillons de  $m$  mesures parmi les  $n$  disponibles, et à calculer  $N$  solutions ajustées. Pour chaque solution, on calcule le nombre  $n_i$  de mesures compatibles, c'est-à-dire pour lesquelles l'écart entre la mesure et sa valeur théorique calculée à partir de la solution ajustée est inférieure en absolue à une tolérance  $t$  fixée. Si une solution comptabilise suffisamment de mesures compatibles (i.e.  $n_i > T$ ), la solution est validée. Schématiquement, il consiste en la réalisation des étapes suivantes :

- déterminer ou choisir les valeurs des paramètres  $N, t$  et  $T$
- répéter  $N$  fois ;
- sélectionner aléatoirement un échantillon de  $m$  mesures,
- calculer la solution ajustée à partir de cet échantillon,

<sup>5</sup> <http://lpsolve.sourceforge.net>





- calculer le nombre  $n_i$  de mesures compatibles avec cette solution, suivant la tolérance  $t$ ,
- (valider le modèle si  $n_i > T$ , l'algorithme pouvant être stoppé dès que cette condition est atteinte),
- sélectionner la solution comptabilisant le plus de mesures compatibles avec elle ;
- recalculer éventuellement une solution ajustée à partir de l'ensemble des mesures compatibles avec la solution sélectionnée.

Plusieurs paramètres sont donc à choisir avant d'utiliser l'algorithme RANSAC :

- la tolérance  $t$  pour considérer une mesure compatible avec la solution calculée à chaque itération ;
- le nombre  $T$  de mesures compatibles avec la solution permettant de considérer la solution valide et d'arrêter le calcul itératif ;
- le nombre  $N$  d'itérations réalisées sur l'algorithme, calculé par la formule :

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-\varepsilon)^m)} \quad (19)$$

Expression dans laquelle  $p$  est la probabilité de tirer aléatoirement parmi les  $N$  échantillons au moins un échantillon ne contenant pas de fautes et  $\varepsilon$  le pourcentage de fautes dans les mesures.

Dans le cas qui nous intéresse en topographie, où le pourcentage de fautes dans les mesures est inconnu, l'algorithme RANSAC adaptatif proposé par [Hartley and Zisserman, 2004] est plus adapté :

- choisir les paramètres  $t$  et  $T$ , fixer  $N = +\infty$  et  $N_{min} = 0$  ;
- répéter tant que  $N > N_{min}$ 
  - sélectionner aléatoirement un échantillon de  $m$  mesures,
  - calculer la solution ajustée à partir de cet échantillon,
  - calculer le nombre  $n_i$  de mesures compatibles avec cette solution, suivant la tolérance  $t$ ,
  - (valider le modèle si  $n_i > t$  et éventuellement stopper le processus itératif),
  - calculer le paramètre  $\varepsilon$  par la formule :

$$\varepsilon = 1 - n_i/n \quad (20)$$

- calculer le paramètre  $N$  associé avec la formule de l'équation (19),

- incrémenter la valeur  $N_{min} = N_{min} + 1$ ,
- sélectionner la solution comptabilisant le plus de mesures compatibles avec elle ;
- recalculer éventuellement une solution ajustée à partir de l'ensemble des mesures compatibles avec la solution sélectionnée.

C'est cet algorithme adaptatif que nous avons utilisé pour notre étude :

- le calcul des coordonnées du point  $M$  à partir de  $m = 2$  observations est réalisé par la méthode des moindres carrés en tenant compte des précisions des mesures. Il n'y a alors aucune surabondance d'observations. À l'itération  $k$  de l'algorithme, on obtient une solution  $\hat{X}_{ransac}^{(k)}$  ;
- le critère utilisé pour vérifier la compatibilité des mesures avec la solution ajustée est la valeur du résidu, c'est-à-dire l'écart entre la mesure et sa valeur théorique  $f_i(\hat{X}_{ransac}^{(k)})$  ;
- pour qu'une observation soit considérée compatible avec la solution ajustée, on considère une tolérance de  $t = 1.96 \times \sigma$  soit, pour des erreurs distribuées suivant la loi normale centrée d'écart type  $\sigma = 2 \text{ mm}$ , un intervalle de confiance de 95 % sur les valeurs ;
- la valeur de la probabilité d'avoir au moins un échantillon sans faute est considérée à  $p = 0.99$  ;
- le nombre d'observations dans notre exemple étant faible, nous avons choisi ne pas stopper le processus itératif lorsqu'un certain nombre de mesures compatibles avec une solution était trouvé ;

- à partir des mesures compatibles avec la solution sélectionnée, un ajustement est réalisé par la méthode des moindres carrés. Pour les mesures non compatibles avec la solution sélectionnée, des résidus sont également calculés.

## Résultats obtenus avec les méthodes robustes sur le jeu sans faute

L'objectif est ici, dans un premier temps, de comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes d'ajustement testées sur le jeu de mesures sans faute (moindres carrés, norme L1, Huber et RANSAC adaptatif). Le *tableau 6* résume, pour chaque méthode, la solution ajustée obtenue sur les coordonnées du point, en mètres, ainsi que les valeurs des résidus en millimètres. On constate que les valeurs de la solution ajustée et des résidus pour la méthode des moindres carrés, du M-estimateur de Huber et RANSAC sont identiques. En effet, sans présence de faute, la fonction de Huber de l'équation (13) correspond à celle utilisée dans les moindres carrés, à un coefficient 0.5 près. Il est donc normal d'obtenir les mêmes résultats que pour la méthode des moindres carrés. Dans le cas de l'algorithme RANSAC, puisqu'aucune faute n'est présente, toutes les observations de notre jeu de mesures sont considérées comme compatibles avec tout échantillon de deux mesures sélectionnées aléatoirement parmi les cinq. La dernière étape de la méthode



	Moindres carrés	Norme L1	Huber	RANSAC
<b>Coordonnées ajustées (en m)</b>				
$\hat{x}_M$	-1.5973	-1.5972	-1.5973	-1.5973
$\hat{y}_M$	1.0976	1.0976	1.0976	1.0976
<b>Résidus (en mm)</b>				
(Distance de $M$ vers $P_1$ ) $\hat{v}_1$	0.0	0.0	0.0	0.0
(Distance de $M$ vers $P_2$ ) $\hat{v}_2$	-0.2	0.0	-0.2	-0.2
(Distance de $M$ vers $P_3$ ) $\hat{v}_3$	2.0	2.1	2.0	2.0
(Distance de $M$ vers $P_4$ ) $\hat{v}_4$	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4
(Distance de $M$ vers $P_5$ ) $\hat{v}_5$	1.1	1.0	1.1	1.1

**Tableau 6.** Coordonnées ajustées et résidus obtenus par les différentes méthodes d'ajustement sur le jeu de mesures sans faute.



RANSAC utilisée consistant en un ajustement par moindres carrés à partir de l'ensemble des mesures compatibles avec la solution retenue, nous obtenons logiquement la solution des moindres carrés.

Dans le cas de la méthode d'ajustement en norme L1, des écarts parfois supérieurs au critère de convergence utilisé peuvent être constatés sur les valeurs ajustées et les résidus par rapport à la méthode des moindres carrés. Les deux méthodes s'appuient sur des M-estimateurs, donc avec un minimum de la fonction  $\rho$  associée en zéro, mais le critère d'optimisation est légèrement différent : minimisation de la somme des carrés des écarts (moindres carrés) ou de la somme des valeurs absolues (norme L1), conduisant à des valeurs optimales différentes.

## Résultats obtenus avec les méthodes robustes sur le jeu avec fautes

Intéressons-nous maintenant aux valeurs ajustées et résidus obtenus par les différentes méthodes sur le jeu de mesures avec deux fautes présentes (1<sup>re</sup> et 3<sup>e</sup> observations). Le *tableau 7* résume ces valeurs et indique également pour chaque méthode, la différence entre les solutions ajustées obtenues en utilisant le jeu avec et sans fautes, en millimètres.

Nous avons déjà discuté le cas de la méthode des moindres carrés et constaté le fort impact de ces fautes sur la solution ajustée et les résidus. Dans le cas des méthodes robustes, on constate que la solution ajustée est peu impactée par la présence des fautes, avec au maximum 2 à 3 mm d'écart sur la coordonnée  $x_M$  dans le cas de la méthode du M-estimateur de Huber. Ceci illustre bien la capacité des méthodes robustes à fournir un résultat cohérent même en présence de fautes.

L'autre intérêt de ces méthodes robustes est leur capacité à fournir des résidus permettant d'identifier plus facilement les observations pouvant contenir des fautes, et estimer l'ordre de grandeur de la faute. Dans ces méthodes, les résidus associés aux mesures portant les fautes sont très proches de la valeur de la faute : 48,8 mm, 48,8 mm et 47,7 mm au lieu de 50 mm sur la première observation pour respectivement la norme L1, RANSAC et la méthode de Huber. On constate également que pour les autres mesures, les valeurs des résidus sont très faibles : moins d'un millimètre pour la norme L1 et RANSAC. Dans le cas de la méthode du M-estimateur de Huber, les résidus obtenus sur les mesures sans faute sont légèrement plus élevés de l'ordre de 2-3 mm, et également plus

importants que sur la solution sans faute, montrant une légère influence des fautes. En effet, le M-estimateur de Huber est un compromis entre la méthode classique des moindres carrés et l'ajustement en norme L1, comme le montre la fonction de Huber de l'équation 13.

Les résultats du *tableau 7* montrent bien l'intérêt que peuvent avoir les méthodes robustes d'ajustement pour la détection et l'identification de fautes dans les mesures, mais également pour déterminer une solution ajustée robuste, même en présence de fautes. Il faut cependant garder à l'esprit quelques points importants.

Comme cela a déjà été indiqué, les méthodes robustes possèdent un point de rupture, c'est-à-dire une quantité de fautes au-delà de laquelle elles perdent leur robustesse, et qui peut dépendre de différents paramètres : degré de liberté du système, quantité et module des fautes, type de mesures, etc. (cf. par exemple [Meer *et al.*, 1991; Zhang and Li, 1998]).

Le calcul de la solution ajustée dans le cas des méthodes robustes est souvent plus compliqué (pas de solution algébrique) et gourmand en opérations de calcul que dans le cas de la méthode des moindres carrés, et ce d'autant plus que le nombre d'observations et d'inconnues augmente. De plus, pour certaines, il n'est pas possible d'estimer, en plus de la solution, la précision formelle associée. Dans cette étude, l'ajustement en norme L1 est un cas où l'on ne peut pas calculer la précision associée à la solution ajustée. Au contraire, dans la méthode du M-estimateur de Huber et RANSAC, telle que mise en œuvre ici, il est possible d'obtenir cet élément.

## Conclusion

L'objectif de cet article est d'illustrer sur un exemple simple, mais concret, l'intérêt potentiel de remplacer la méthode des moindres carrés par des méthodes d'ajustement robustes pour la détection et l'identification de fautes. Après avoir présenté les jeux de mesures utilisés, l'impact des fautes sur la solution des moindres carrés est illustré, et la

	Moindres carrés	Norme L1	Huber	RANSAC
<b>Coordonnées ajustées (en m)</b>				
$\hat{x}_M$	-1.6131	-1.5972	-1.5996	-1.5971
$\hat{y}_M$	1.0911	1.0960	1.0966	1.0960
<b>Écarts à la solution sans faute (mm)</b>				
Sur $\hat{x}_M$	-18.8	0	-2.3	0.2
Sur $\hat{y}_M$	-6.5	-1.6	-1	-1.6
<b>Résidus (en mm)</b>				
(Distance de $M$ vers $P_1$ ) $\hat{v}_1$	34.8	48.8	47.7	48.8
(Distance de $M$ vers $P_2$ ) $\hat{v}_2$	-15.7	0.0	-2.4	0.1
(Distance de $M$ vers $P_3$ ) $\hat{v}_3$	23.9	23.5	22.4	23.6
(Distance de $M$ vers $P_4$ ) $\hat{v}_4$	11.0	0.0	0.5	0.0
(Distance de $M$ vers $P_5$ ) $\hat{v}_5$	10.8	0.2	2.4	0.1

**Tableau 7.** Coordonnées ajustées et résidus obtenus par les différentes méthodes d'ajustement sur le jeu de mesures avec fautes.



méthodologie classiquement adoptée pour la détection et l'identification des fautes avec cette méthode est présentée. Nous nous sommes ensuite intéressés à trois estimateurs robustes particuliers : l'ajustement en norme L1, le M-estimateur de Huber et une méthode de type RANSAC adaptative et avons illustré par l'exemple les capacités de ces méthodes à obtenir, malgré les fautes, des solutions ajustées pas ou peu impactées et à faciliter la détection et l'identification de fautes par étude des résidus associés aux mesures. ●

## Contact

Stéphane Durand

stephane.durand@lecnam.net

## Bibliographie

- Baarda, W. (1968) *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks*. Netherlands Geodetic Commission (Netherlands Geodetic Commission: Publications on Geodesy).
- Banaś, M. (2012) 'A review of robust estimation methods applied in surveying', *Geomatics and Environmental Engineering*, 6, p. 13. doi:10.7494/geom.2012.6.4.13.
- Bonnel, T. (1999) *Combinaisons de jeux de coordonnées de stations terrestres en norme L1*. Mémoire de fin d'études ESGT. ESGT.
- Caspary, W. and Rüeger, J.M. (2000) *Concepts of network and deformation analysis*. 3rd (corrected) impression. Sydney, N.S.W. : School of Geomatic Engineering, University of New South Wales.
- Chen, B. and Pinar, M.C. (1998) 'On Newton's method for Huber's robust M-estimation problems in linear regression', p. 11.
- Choi, S., Kim, T. and Yu, W. (2009) *Performance evaluation of RANSAC family*, *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2009*. doi:10.5244/C.23.81.
- Dantzig, G. (2016) *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press. Available at: <https://doi.org/10.1515/9781400884179>.
- Dantzig, G.B. (1948) 'Programming in a Linear Structure'. Comptroller, USAF, Washington, D.C.
- Durand, S. (2021) *Topométrie de Précision*. 2. Support de cours. Cycle ingénieur ESGT, 5<sup>e</sup> année.
- Fischler, M.A. and Bolles, R.C. (1981) 'Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography', *Commun. ACM*, 24(6), pp. 381-395. doi:10.1145/358669.358692.
- Guo, Y. (2003) *Application and computation of Huber's M-estimator in the global positioning system*. Master of Science. School of Computer Science.
- Hampel, F.R. (1974) 'The Influence Curve and its Role in Robust Estimation', *Journal of the American Statistical Association*, 69(346), pp. 383-393. doi:10.1080/01621459.1974.10482962.
- Hartley, R.I. and Zisserman, A. (2004) *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.
- Holland, P.W. and Welsch, R.E. (1977) 'Robust regression using iteratively reweighted least-squares', *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 6(9), pp. 813-827. doi:10.1080/03610927708827533.
- Hough, P.V.C. (1959) 'Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures', *Conf. Proc. C*. Edited by L. Kowarski, 590914, pp. 554-558.
- Huber, P.J. (1964) 'Robust Estimation of a Location Parameter', *The Annals of Mathematical Statistics*, 35(1), pp. 73-101.
- Jajo, N. (2005) 'A Review of Robust Regression and Diagnostics Procedures', *Acta Mathematicae Applicatae Sinica-English series*, 21, pp. 209-224.
- Karmarkar, N. (1984) 'A new polynomial-time algorithm for linear programming', *Combinatorica*, 4(4), pp. 373-395. doi:10.1007/BF02579150.
- Meer, P. et al. (1991) 'Robust regression methods for computer vision: A review', *International Journal of Computer Vision*, 6(1), pp. 59-70. doi:10.1007/BF00127126.
- Mikhail, E.M. and Ackermann, F. (1976) *Observations and least squares*. New York: IEP.
- Morineau, A. (1978) 'Régressions robustes méthodes d'ajustement et de validation', *Revue de Statistique Appliquée*, 26(3), pp. 5-28.
- Rey, W.J.J. (1983) 'Introduction to Robust and Quasi-Robust Statistical Methods', in: Rice, J.R. and Usow, K.H. (1968) 'The Lawson Algorithm and Extensions', *Mathematics of Computation*, 22(101), pp. 118-127. doi:10.2307/2004769.
- Rousseeuw, P.J. (1984) 'Least Median of Squares Regression', *Journal of the American Statistical Association*, 79(388), pp. 871-880. doi:10.1080/01621459.1984.10477105.
- Simonetto, E. (2021) 'Cours Traitement numérique des images IG4'.
- Fayez Tarsha-Kurdi, Tania Landes, Pierre Grussenmeyer. *Hough-Transform and Extended RANSAC Algorithms for Automatic Detection of 3D Building Roof Planes from Lidar Data*. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Sep 2007, Espoo, Finland. pp.407-412. halshs-00264843
- Tracol, M. (2012) *Intégration du logiciel de compensation LTOP aux méthodes de travail de TPLM-3D pour les chantiers spéciaux*. PFE de l'INSA Strasbourg.
- Zhang, J. and Li, G. (1998) 'Breakdown properties of location M-estimators', *The annals of statistics*, 26(3), pp. 1170-1189.

## ABSTRACT

*In the least squares adjustment method, the existence of gross errors in the measurements impacts both the adjusted values and the residuals. In particular, due to the correlation between the residuals, an error on a particular observation may be undetectable on the corresponding residual but may affect residuals on other observations, complicating the detection and identification process. It is sometime better to use robust adjustment methods that have two main advantages: the adjusted values are very little affected by the presence of gross errors, and the residuals enable to better detect and identify the errors and their values. In this contribution, we use a practical example to show both the impact of gross errors on the least squares adjustment method and the classical methodology used to detect and identify the faulty observations, and the advantages of using robust estimators.*

# 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](http://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)**







# Développement d'une solution de numérisation 3D temps réel via smartphone

■ Raphaël HAENEL

*À l'heure où les smartphones et tablettes se démocratisent en tant qu'outil de travail, le monde des travaux publics se modernise. Simplifier le quotidien des chefs de chantier, est l'objectif que s'est fixé l'entreprise SYSLOR. Dans son objectif d'amélioration continue sur le thème de la création de jumeaux numériques, la start-up Messine a souhaité cristalliser ses recherches autour du développement d'une solution algorithmique privilégiant la rapidité et l'autocontrôle. Sur la base de photos RGB-D géoréférencées à l'aide de l'antenne GNSS conçue par SYSLOR, cette étude propose une approche calculatoire innovante permettant de concevoir un nuage de points très rapidement.*

## MOTS-CLÉS

Numérisation 3D, carte de profondeurs, GNSS, smartphone.

- une optimisation du processus de calcul pour atteindre une productivité en temps réel ;
- une accessibilité de l'acquisition pour tout un chacun.

## État de l'art

Avec le développement des technologies, la reconstruction 3D connaît un essor fulgurant depuis ces dernières années. En effet, que ce soit par le biais d'une stéréo binoculaire ou plus généralement multivues, la reconstruction 3D est devenue un point de recherche prédominant à travers différents domaines d'utilisation. Dans notre cas, la reconstruction d'une scène en temps réel est souvent associée au domaine de la vision par ordinateur et de l'apprentissage machine qui représente deux secteurs évoluant très rapidement, notamment avec un apport très régulier de nouveaux algorithmes de plus en plus performants.

Pour être en mesure de pouvoir correctement synthétiser les différentes approches de reconstruction, il a été nécessaire, comme l'ont fait [Seitz et al., 2006], de définir des critères d'évaluation et de comparaison des méthodes. Tout d'abord, il est possible d'envisager une différenciation des approches en matière de représentation de la scène, puisque la géométrie d'un objet peut aisément être décrite selon :

- une grille d'occupation voxel (équivalent 3D du pixel), utilisée pour sa simplicité et sa faculté à se rapprocher de n'importe quelle surface ;
- un maillage polygonal (généralement triangulaire), très populaire pour des questions de simplicité de stockage et de praticité de visualisation des données ;

## Contexte de l'étude

D'après les chiffres fournis par la FNEDRE (Fédération nationale des entreprises de détection de réseaux enterrés) pas moins de 100 000 accidents sont recensés chaque année en France, lors de travaux d'excavation, à cause d'une localisation imprécise des réseaux ou d'une mauvaise lecture de plans. C'est en ce sens que SYSLOR a développé ses solutions pour offrir aux acteurs du chantier une visualisation efficiente des données (en réalité augmentée notamment) et ainsi minimiser les risques d'accident, notamment en comprenant mieux la disposition des réseaux existants. Outre la visualisation, l'une des applications SYSLOR offre également la possibilité aux chefs de chantier d'effectuer eux-mêmes l'acquisition des tranchées, par voie photographique ou vidéo. L'objectif est de favoriser l'autonomie du chef de chantier pour des travaux simples et de réaliser plus rapidement le remblaiement des tranchées sur site. La problématique rencontrée est que le récolement des réseaux enterrés repose sur une procédure photogramétrique usuelle, qui bien qu'étant tout à fait légitime et fonctionnelle, se trouve être chronophage. Le temps d'envoi des données de même que le temps de calcul sont significatifs, et

constituent un réel frein pour ces utilisateurs. Ainsi, SYSLOR envisage de pallier cette problématique en développant une solution innovante de numérisation 3D des réseaux enterrés sous des contraintes temporelles qui viendront qualifier le système de "temps réel". Cette démarche de développement offrirait la possibilité de réduire drastiquement les risques relatifs à une mauvaise acquisition pouvant rendre le récolement de la tranchée complexe, voire irréalisable. En effet, la finalité affichée est de pouvoir proposer à un chef de chantier une solution lui permettant d'avoir un suivi permanent de la digitalisation pour qu'il soit en mesure de juger immédiatement de l'exhaustivité des données et de la qualité du modèle généré. Il pourrait en particulier directement procéder au remblaiement de la tranchée. Cela induit implicitement que le processus d'acquisition doit être relativement accessible pour un utilisateur non aguerri.

En résumé, les développements mis en œuvre au cours de ce projet ont dû être mis en adéquation avec un cahier des charges défini par les contraintes suivantes :

- une fiabilité calculatoire du processus soutenue efficacement par les performances offertes par les smartphones actuels ;





- une carte de profondeurs qui permet de se soustraire à un éventuel rééchantillonnage de la géométrie 3D.

De manière plus générale, il est également possible de subdiviser les approches de reconstruction en quatre classes selon la manière dont elles sont entreprises :

**1<sup>re</sup> classe** : extraction et mise en correspondance de points caractéristiques qui serviront à ajuster une surface aux entités générées ;

**2<sup>e</sup> classe** : calcul d'une fonction de coût associée à un volume 3D, puis extraction d'une surface à partir de celui-ci ;

**3<sup>e</sup> classe** : évolution récurrente d'une surface pour minimiser une fonction de coût ;

**4<sup>e</sup> classe** : calcul d'un ensemble de cartes de profondeurs.

Nous avons tenté, dans le cadre de notre étude, de synthétiser de manière la plus exhaustive possible les solutions existantes dans la littérature scientifique en couvrant tous les horizons possibles. Le cahier des charges défini dans le cadre de la problématique de notre sujet nous a permis de hiérarchiser les différentes méthodes recensées. Cette structuration d'intérêt a pour mission d'extraire les approches qui semblent être les plus intéressantes au regard de notre thématique. Ainsi, nous saurons vers où orienter nos futurs développements. Le récapitulatif de la mise en coïncidence

entre les méthodes étudiées et lesdits critères est présenté dans le **tableau 1**. Parmi l'ensemble des algorithmes que l'on retrouve dans la littérature scientifique, certains ont d'ores et déjà été implémentés sur smartphones et tablettes. Ce constat est rassurant et confirme qu'un traitement 3D est potentiellement embarquable sur ce type d'appareil. Néanmoins, la principale inconnue qui subsiste réside dans l'adaptabilité de ces applications dans notre contexte de numérisation des réseaux enterrés. En effet, jusqu'ici nous ne pouvons que conjecturer que ces solutions peuvent correctement s'accorder à ces objets linéaires particuliers.

Nous avons décelé au cours de cette étude bibliographique l'intérêt majeur que portent les cartes de profondeurs pour la compréhension générale d'une scène. Ainsi, au vu de la synthèse générale menée, la méthode du "planesweep" et l'API d'ARCore semblent être tout à fait pertinentes pour la génération de cartes de profondeurs. De même, la méthode "marching cubes" paraît convenir pour une fusion adéquate des données.

## Production des données de profondeur

Une carte de profondeurs, ou plus communément en anglais "depth map", est une image où chacun des pixels ne va pas contenir une information de



Figure 1. Illustration d'une carte de profondeurs.

couleurs, mais une donnée relative à la distance des surfaces des objets d'une scène à partir d'un point de vue particulier (figure 1). Elle caractérise une pseudo-reconstruction de l'espace qui ne représente pas directement une surface, mais plutôt un échantillon de valeurs discrètes qui permet de comprendre la géométrie de l'environnement capturée selon une certaine position de caméra.

La production de cartes de profondeurs peut provenir de l'utilisation de capteurs spécifiques LiDAR ou temps de vol (ToF). Mais, en l'absence de tels capteurs, ces données peuvent également provenir de l'étude d'une similitude colorimétrique, que l'on désigne aussi par critère de photo-consistance, entre les pixels d'une paire stéréoscopique. Différentes approches existent selon la méthode utilisée.

L'implémentation de la méthode du "planesweep" n'ayant pas abouti à l'obtention de résultats suffisamment pertinents pour une utilisation en temps réel, nous nous sommes très vite orientés vers l'API disponible sous ARCore.

### API Depth d'ARCore

Le développement des technologies mobiles, notamment en matière de capteurs d'odométrie ou encore de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) a permis l'émergence et la démocratisation des applications de réalité augmentée. Les services Google, souhaitant toujours offrir une meilleure expérience à ses utilisateurs, ont développé une API intégrant les mesures d'une carte de profondeurs issue d'une caméra monoculaire [Valentin et al., 2019] à une cadence de 30 Hz. Ces données particulières permettent notamment de gérer les effets d'occlusion entre le monde réel et les éléments

	Temps réel	Optimisation des calculs	Adaptabilité au contexte des réseaux enterrés	Qualité de la reconstitution
3D-R2N2	*	*	*	*
Depth API ARCore	***	***	**	**
DORN	*	*	*	*
GEOMetrics	*	*	*	***
KinectFusion	***	***	**	*
Marching cubes	**	**	*	***
Mesh R-CNN	*	*	**	***
MobileFusion	*	*	**	***
MonoFusion	*	*	**	***
PatchMatch	***	**	*	*
Pix2Mesh	*	*	**	***
Planesweep	***	***	**	***
MVSNet	*	*	**	***
Raycasting	***	***	*	**
RoutedFusion	**	*	*	*
SurfelMeshing	*	**	**	***
Tétraédisation de Delaunay	*	**	*	*
TGV	**	**	*	**
Visual hull constraints	***	***	*	**

\* : Mauvaise cohérence, \*\* : concordance acceptable, \*\*\* : adéquation particulière aux critères

Tableau 1. Mise en correspondance entre les méthodes présentées et les critères liés à notre étude.



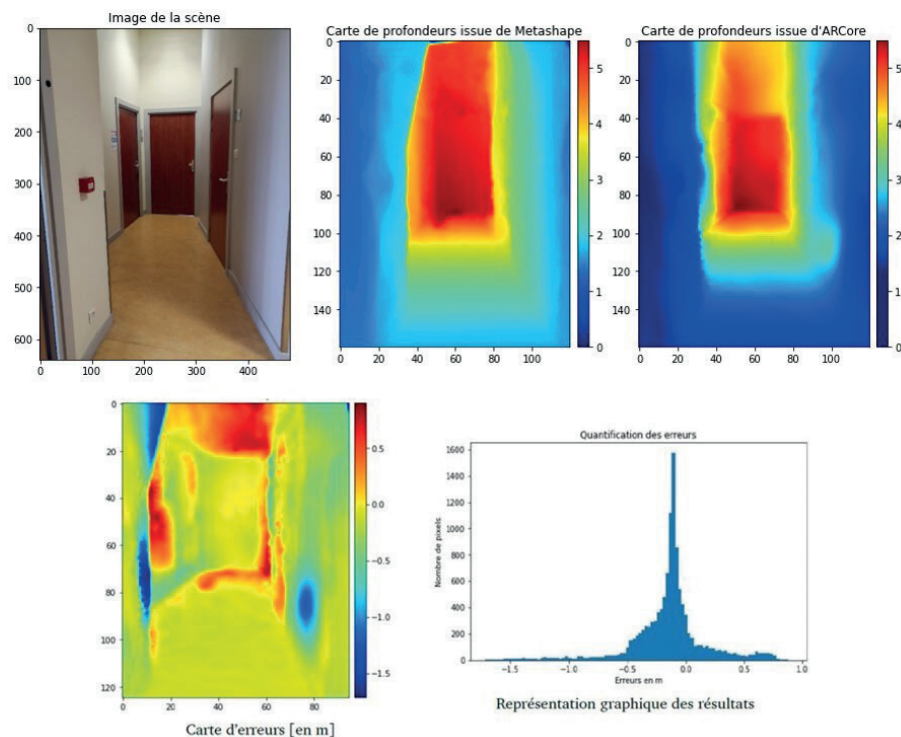


Figure 2. Analyse des résultats établis à partir d'ARCore.

virtuels. Cependant, il conviendra de noter que l'utilisation de cette application est soumise à une spécification d'ordre technique : le smartphone doit supporter ARCore.

Afin de comprendre comment sont générées les cartes de profondeurs de Google, il est nécessaire de s'intéresser au principe de fonctionnement global d'ARCore. Cette application repose sur trois concepts fondamentaux : le suivi de mouvement, la compréhension de l'environnement ainsi que l'estimation de la lumière.

À partir d'une approche similaire au SLAM conventionnel, des points caractéristiques sont détectés tout au long du déplacement afin de situer le smartphone dans l'espace. Grâce à une méthodologie analogue à RANSAC, ces points serviront ensuite à déterminer des plans moyens qui vont assurer la compréhension de l'environnement alentour. Ces différentes informations vont ensuite permettre de construire une carte de profondeurs à partir de l'optimisation hybride de deux algorithmes PatchMatch [Bleyer et al., 2011] et HashMatch [Fanello et al., 2017]. L'idée est d'alterner entre la génération d'une valeur de profondeur isolée (associée à une probabilité d'apparition), et sa propagation aux pixels avoisinants sous

l'hypothèse qu'une image est constituée de régions de profondeur constante. Comme pour la première méthode, nous avons analysé l'exactitude des résultats obtenus à partir de cartes de profondeurs extraites depuis le logiciel commercial Agisoft Metashape. Se basant uniquement sur des informations colorimétriques pour déterminer les valeurs de profondeur, une scène avec des surfaces homogènes et relativement peu texturées va induire des résultats moins précis. Quand bien même, notre étude a permis

de mettre en lumière des résultats très intéressants (figure 2) avec une bonne concordance des cartes. L'erreur constatée est de l'ordre d'une dizaine de centimètres pour un point de vue particulier.

Finalement, au terme de cette étude, nous sommes arrivés à la conclusion que l'API fourni par ARCore répond plus favorablement à nos attentes tant au niveau de la qualité des résultats que la cadence de production des données. C'est donc cette méthode qui a été privilégiée dans le cadre de nos développements.

## Présentation de la preuve de concept développée

Grâce à l'intégralité des recherches menées, nous avons été à même de concevoir une chaîne de traitement optimale qui essaye d'intégrer simultanément les souhaits de l'entreprise, mais également les contraintes matérielles liées à l'utilisation d'un smartphone. Concrètement, la preuve de concept se décompose en six étapes majeures scindées en deux parties : la création des données 3D sous la forme d'un nuage de points (figure 3) et l'assemblage en un unique modèle (figure 6). En effet, chaque point de vue correspondant à une image, un unique nuage de points lui sera associé. Comme l'acquisition comptera plusieurs images, il conviendra alors d'assembler l'ensemble des nuages

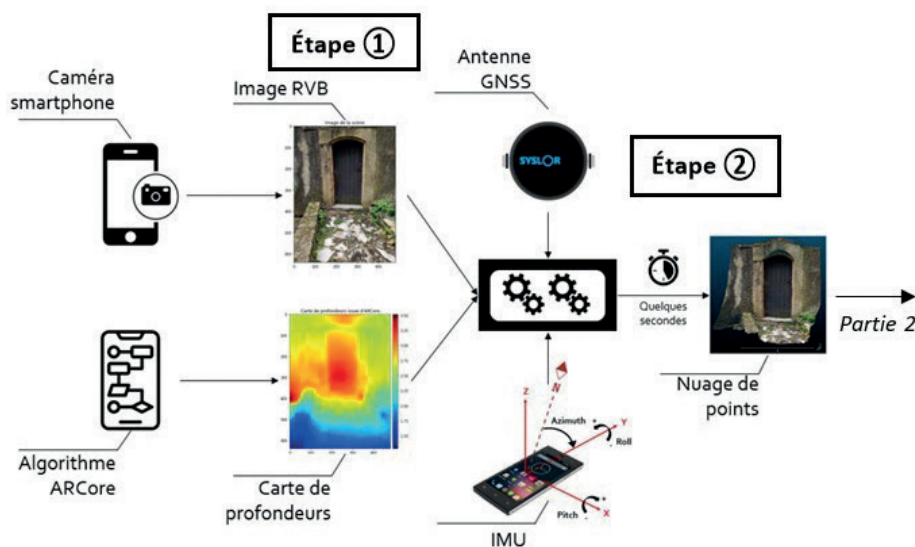


Figure 3. Organigramme de la première partie : création des données 3D.



entre eux tout en gérant les problématiques liées à la fusion.

## ■ Création des données 3D

**Étape 1 :** Cette première phase consiste à rassembler l'ensemble des données nécessaires au futur calcul. La première source de données provient de l'acquisition des données RGB-D, autrement dit, l'association entre l'image couleur extraite depuis la caméra d'un smartphone et la carte de profondeurs associée à la vue calculée à partir de l'API d'ARCore.

Pour géoréférencer directement le nuage de points, nous avons utilisé l'antenne GNSS SYSLOR, qui allie ergonomie et efficacité. Elle permet de géoréférencer les images avec une précision de l'ordre de 2 à 5 cm. Néanmoins, ce géoréférencement caractérise véritablement l'antenne GNSS et non pas directement la caméra du smartphone. Ce faisant, une transformation a été mise en œuvre afin de passer efficacement des coordonnées du centre de l'antenne aux coordonnées au centre de l'optique via des constantes appareils (figure 4).



Figure 4. Antenne GNSS SYSLOR.

À cela, nous venons ajouter des mesures angulaires produites par les capteurs inertiels présents dans un smartphone. Grâce à la combinaison d'un accéléromètre trois axes, d'un gyroscope ainsi que d'un magnétomètre, nous pouvons décrire l'orientation du smartphone dans l'espace au moyen d'une représentation eulérienne des angles, à savoir tangage, roulis et azimut.

**Étape 2 :** Une fois toutes les données nécessaires à notre disposition, il est possible de constituer un nuage de points géoréférencé à l'échelle. Il faut

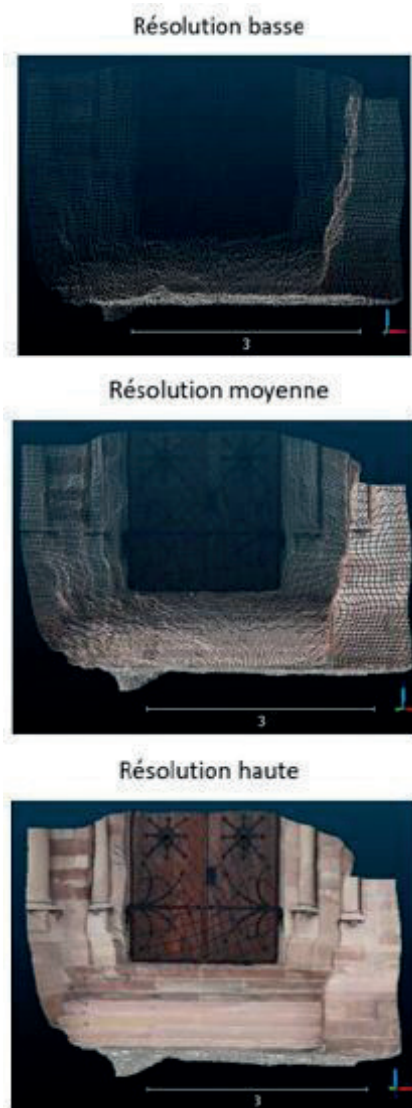


Figure 5. Impact de la résolution des images RGB-D sur le nuage créé.

savoir que les caractéristiques de ces nuages sont tributaires de la résolution des images RGB-D, qui varie généralement entre 160x120 et 640x480 pixels. Une résolution élevée va induire une

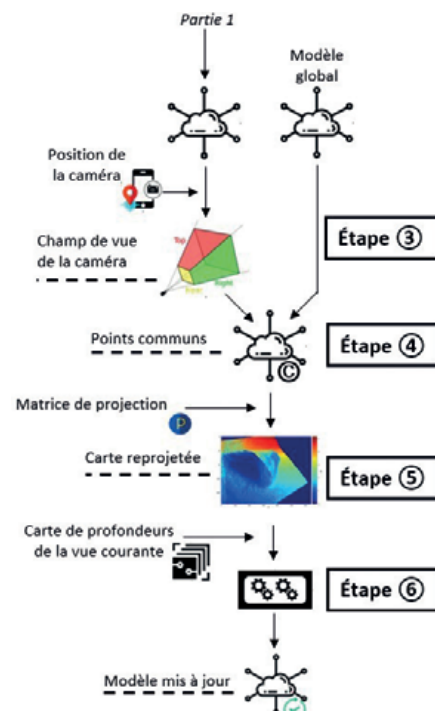


Figure 6. Organigramme de la seconde partie : assemblage en un unique modèle.

plus grande densité du nuage puisqu'à chaque pixel, sera attribué une projection 3D. Cela va induire une bien meilleure représentation visuelle des données avec un détail plus fin des éléments constitutifs d'une scène telle que représentée en figure 5.

Cependant, le temps de production se verra légèrement rallongé. Un compromis devra ainsi être trouvé afin de combiner un temps de traitement optimal et une représentation visuelle efficace. Sur l'aspect qualitatif, les modèles créés avec cette méthode sont intéressants puisque nous obtenons un écart moyen de 7 cm avec un écart-type de 6 cm par rapport à un modèle généré

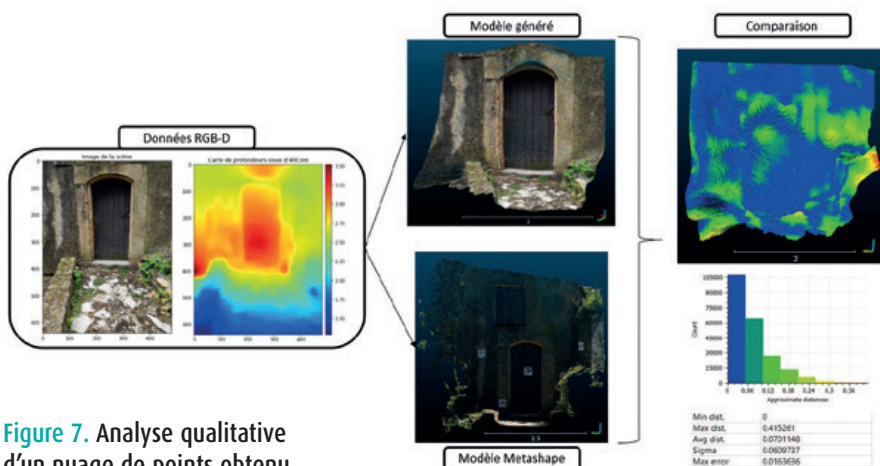


Figure 7. Analyse qualitative d'un nuage de points obtenu.





depuis Metashape (figure 7). Pour une première esquisse de résultat, ce dernier est assez prometteur d'autant plus que la génération de ce modèle s'effectue quasiment en temps réel.

### ■ Assemblage des données en un unique modèle

**Étape 3 et 4 :** Le recouvrement des images induit nécessairement une détermination multiple de certains points. Ainsi, l'objectif de ces étapes est d'extraire ces points particuliers afin d'être mis à jour par la suite. Pour cela, nous commençons par calculer le champ de vision associé à la caméra (*viewing frustum* en anglais). C'est une entité géométrique qui va contenir en son sein tous les éléments 3D observables depuis la caméra. Ensuite, l'étape 4 va tout simplement consister à réaliser une segmentation topologique des différents points à partir de la géométrie construite durant l'étape précédente.

**Étape 5 :** Avant de passer au processus de mise à jour en tant que tel, il est nécessaire de mettre en place l'environnement de comparaison. Un environnement 2D a été privilégié, car le traitement est moins complexe. Ainsi, les points extraits depuis l'étape 4 sont reprojétés sur le plan image de la vue physique en cours formant ainsi une carte reprojétée aussi appelée pseudo-carte de profondeurs.

**Étape 6 :** La mise à jour du modèle à construire dépend de la comparaison pixel à pixel entre la pseudo-carte de profondeurs et la carte associée à la vue courante. Il sera en particulier possible de venir compléter le modèle en cours de formation lorsqu'une zone inédite de la scène vient d'être couverte. Puis, dans les zones de redondance, des modifications seront entreprises selon différentes possibilités : mesure qui obstrue le modèle, conflit de visibilité ou encore raffinement du modèle lorsque les profondeurs associées aux deux cartes coïncident.

### ■ Exposition de résultats

En l'absence de chantier avec des réseaux enterrés visibles, nous avons cherché à concevoir une preuve de concept qui se veut généralisable à plusieurs environnements. La portée

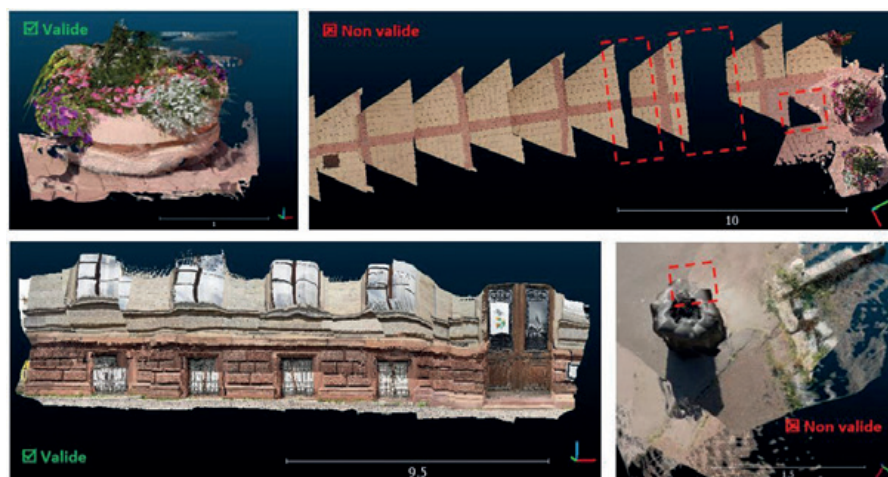


Figure 8. Modèles reconstruits témoignant de la qualité de l'acquisition.

d'acquisition devra néanmoins se limiter à 3-4 m. En effet, l'erreur d'estimation des données de profondeur croît quadratiquement avec la distance, ainsi au-delà de ce seuil, des déformations non négligeables sont observables dans le modèle 3D.

Quelques exemples de modèles reconstruits sont fournis en figure 8. Il apparaît clairement que l'exhaustivité des données dépend implicitement de la qualité de l'acquisition qui est bien illustrée sur l'ensemble des modèles permettant ainsi assez aisément de valider ou non le récolement effectué. Ce constat illustre les objectifs remplis au cours de cette étude. Néanmoins, pour l'heure, la productivité de tels modèles ne satisfait pas encore la notion de temps réel. De plus, des défauts persistent dans notre preuve de concept. En effet, on peut observer sur chaque nuage de points, des déformations importantes ou encore un assemblage approximatif. Ces deux phénomènes ont deux origines principales. D'une part, l'imprécision relative à la détermination des cartes de profondeurs causée soit par un suivi de mouvement pas assez appuyé ou une surface non propice à l'obtention de résultats viables. D'autre part, une dérive des capteurs inertiels du smartphone. Bien que ces derniers fournissent des données angulaires assez intéressantes, elles ne sont pas suffisamment robustes. Il conviendra donc, pour finaliser cette chaîne de traitement, d'améliorer ces points de même qu'optimiser certains traitements encore trop chronophages pour un applicatif en temps réel.

### Conclusion

Concevoir une preuve de concept n'est pas chose aisée, encore moins lorsque l'on dispose de contraintes matérielles assez importantes. Ce projet de fin d'études a été l'occasion de se confronter à une problématique d'envergure qui traduit les ambitions d'innovation de start-up comme SYSLOR. Grâce à toutes les recherches et les essais menés, nous avons abouti à une première chaîne de traitement qui fonctionne. Globalement, les objectifs initiaux de ce projet ont été remplis puisque nous sommes capables de fournir un modèle 3D satisfaisant qui illustre de manière assez pertinente l'exhaustivité des données et atteste donc de la conformité de l'acquisition. Bien que le temps réel n'ait pas encore été concrètement atteint, la démarche pour y parvenir a été bien esquissée.

Perfectible, cette preuve de concept ne constitue que les prémices d'une future application clé en main qui verra le jour avec l'apport de matériels plus performants. Par matériel, nous entendons en particulier un capteur de profondeur qui, combiné aux mesures GNSS et aux mesures inertielles du smartphone, viendra annuler la dérive angulaire grâce à un recalage via l'environnement mesuré, mais également une meilleure description de la scène avec des données de profondeur plus précises.

### Remerciements

Je souhaite remercier l'entreprise SYSLOR et plus particulièrement



► l'ensemble de ses collaborateurs, de m'avoir accordé leur confiance pour mener à bien ce projet d'envergure. Malgré la problématique de taille, nous avons réussi, grâce à un travail collaboratif, à esquisser de nouveaux outils de récolement qui, je l'espère, pourront être utilisés dans le futur. ●

## Contact

Raphaël HAENEL  
raphael.haenel@syslor.net

## Bibliographie

- Bleyer, M., Rhemann, C., and Rother, C. (2011). 'PatchMatch Stereo - Stereo Matching with Slanted Support Windows'. In Proceedings of the British Machine Vision Conference 2011, pages 14.1-14.11, Dundee. British Machine Vision Association. doi : 10.5244/C.25.14
- Collins, R. (1996). 'A space-sweep approach to true multi-image matching'. In Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 358-363, San Francisco, CA, USA. IEEE. doi : 10.1109/CVPR.1996.517097
- Fanello, S. R., Valentin, J., Kowdle, A., Rhemann, C., Tankovich, V., Ciliberto, C., Davidson, P., and Izadi, S. (2017). 'Low Compute and Fully Parallel Computer Vision with HashMatch'. In 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pages 3894-3903, Venice. IEEE. doi : 10.1109/ICCV.2017.418
- Seitz, S., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., and Szeliski, R. (2006). 'A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms'. In 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1 (CVPR'06), pages 519-528, New York, NY, USA. IEEE. doi : 10.1109/CVPR.2006.19
- Semler, Q., Mangin, L., Moussaoui, A., and Semin, E. (2019). 'Development of a low-cost centimetric GNSS Positioning solution for android applications'. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, XLII-2/W17 :309-314.
- Valentin, J., Kowdle, A., Barron, J. T., Wadhwa, N., Dzitsiuk, M., Schoenberg, M., Verma, V., Csaszar, A., Turner, E., Dryanovski, I., Afonso, J., Pascoal, J., Tsotsos, K., Leung, M., Schmidt, M., Guleryuz, O., Khamis, S., Tankovitch, V., Fanello, S., Izadi, S., and Rhemann, C. (2019). 'Depth from motion for smartphone AR'. ACM Transactions on Graphics, 37(6) :1-19. doi: 10.1145/3272127.3275041

## ABSTRACT

**Key words:** 3D scanning, depth map, GNSS, smartphone, on-the-fly reconstruction

*When smartphones and tablets are becoming more and more popular as working tools, the world of public works is modernizing. Simplify the daily life of the site managers, is the objective that SYSIOR company has set. In its objective of continuous improvement on the theme of the creation of digital twins, the start-up Metzine wished to crystallise these researches around the development of an algorithmic solution privileging speed and self-control. On the basis of RGB-D photos georeferenced with the GNSS antenna designed by SYSIOR, this study proposes an innovative computational approach allowing to design a point cloud very quickly.*

# RIEGL VQ-840-G

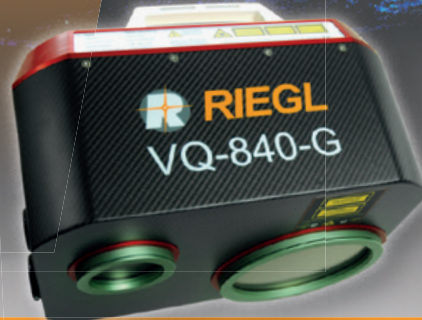
## SCANNER LASER TOPO-BATHYMÉTRIQUE

DESTINÉ À L'EXPLOITATION SUR UN DRONE OU SUR TOUT TYPE D'AÉRONEF DÉPLOYÉ À BASSE ALTITUDE

Regardez cette vidéo pour en savoir plus sur le système :



The RIEGL VQ-840-G Airborne Laser Scanner for Topo-Bathymetric Surveying



nuage de points topo-bathymétrique des rochers « Les Deux Frères », Cap Sicié, Toulon

POUR DES LEVÉS DE HAUTE RÉOLUTION DES ZONES LITTORALES OU EN EAUX PEU PROFONDES

- parfaitement adapté à l'intégration sur un drone ou un hélicoptère
- utilisation d'un laser vert permettant de pénétrer dans l'eau jusqu'à plus de 2 profondeurs Secchi
- fréquence de mesure 50 kHz - 200 kHz
- centrale inertielle (INS) et appareil photo numérique intégrés

Visitez-nous à Nice



ISPRS Congress 2022 | Juin 6-11, 2022

Participez à notre présentation consacrée à la bathymétrie dans la session Technology Track : High-Resolution LIDAR Bathymetry from Different Platforms

Découvrez l'ensemble de la gamme de capteurs et systèmes RIEGL LIDAR [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

newsroom.riegl.international



Austria | USA | Japan | China | RIEGL WORLDWIDE | Australia | Canada | United Kingdom





# Évaluation des apports de l'apprentissage profond au sein d'un service dédié à la numérisation du patrimoine

■ Maxime MÉRIZETTE

*Les scanners laser terrestres permettent d'acquérir beaucoup de données tout en présentant une rapidité et une facilité d'acquisition. Mais ceci est terni par le manque d'automatisation des traitements de nuages de points. La segmentation de nuage de points, consistant à extraire les éléments constitutifs d'un nuage, pâtit notamment de ce manque. Ce travail de fin d'études d'ingénieur, mené chez Quarta, se concentre sur les apports de l'apprentissage profond pour la réalisation d'une segmentation de nuage de points. Elle se propose de lister les différentes méthodes d'apprentissage profond permettant de travailler sur les nuages de points et teste différents algorithmes permettant de traiter les nuages de points volumineux.*

## ■ MOTS-CLÉS

Apprentissage profond, nuage de points, segmentation, jeux de données, 3D, BIM, scanner laser terrestre.

## Introduction

Au fil des années, les technologies d'acquisition de données tridimensionnelles se sont développées afin de permettre une rapidité et une simplicité d'acquisition. Mais ceci est terni par le temps de traitement nécessaire pour valoriser cette donnée (sous forme de maquette 3D ou de plan 2D) et par un manque d'automatisation. Aujourd'hui, l'utilisation de ces données tridimensionnelles n'est plus seulement réservée aux professionnels de la géomatique et de l'architecture, mais de plus en plus de corps de métier y ont recours. Ces dernières sont notamment au cœur du développement des véhicules autonomes afin de permettre aux algorithmes et donc aux véhicules de mieux comprendre l'environnement. Bien que les technologies d'acquisition de données tridimensionnelles se démocratisent et s'ouvrent aux non-initiés (BLK360, Apple LiDAR...), les traitements de ces nuages de points sont encore trop peu souvent automatisés et accessibles à ces mêmes non-initiés. La segmentation et la modélisation 3D sont aujourd'hui des tâches réservées à un public plus averti.

L'intelligence artificielle, depuis sa consécration en tant que science en 1956, n'a eu de cesse de se développer et de révolutionner certains domaines scientifiques, mais aussi notre quotidien (la prédiction automatique de texte, les assistants personnels intelligents, la reconnaissance faciale...). L'intelligence artificielle, poussée par les GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft), les BATX (Baidu, Alibaba, Tencent, Xiaomi) et de nombreux laboratoires, est en pleine évolution et impacte

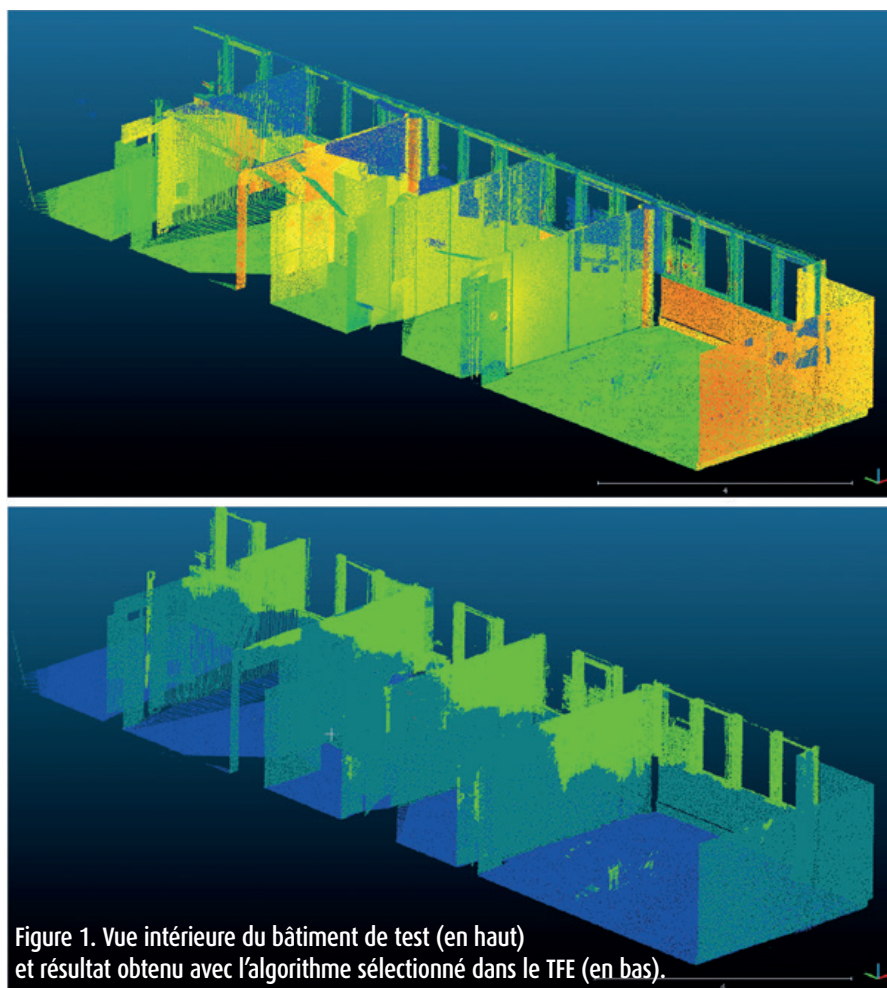


Figure 1. Vue intérieure du bâtiment de test (en haut) et résultat obtenu avec l'algorithme sélectionné dans le TFE (en bas).





de nombreux domaines. L'apprentissage profond a connu un développement fulgurant à partir de 2010 avec notamment des avancées dans le domaine de la vision par ordinateur, la compréhension du langage, la reconnaissance de la parole... Pendant des décennies, l'apprentissage profond était réservé aux personnes avec des connaissances techniques dans le domaine de l'intelligence artificielle. De plus, ces personnes devaient avoir de très bonnes connaissances sur les données qu'elles traitaient pour pouvoir créer des extracteurs de caractéristiques [LECUNY. et al., 2015]. L'apprentissage profond n'est donc pas un domaine de recherche nouveau, mais il se démocratise. En effet, depuis quelques années des outils libres de droits (*TensorFlow*, *PyTorch*, *Caffe*...) ainsi que de nombreux algorithmes préentraînés ont fait leur apparition, permettant de rendre plus accessible l'apprentissage profond. Les professionnels de la numérisation 3D cherchent donc à s'approprier l'apprentissage profond en déterminant les différentes avancées que ce domaine pourrait apporter à leur métier. À défaut d'être portée par le monde de la numérisation 3D, la recherche sur l'apprentissage profond, appliquée aux nuages de points, est poussée par le développement de la voiture autonome.

Ce travail de fin d'études s'est ainsi concentré sur l'évaluation des apports de l'apprentissage profond au sein d'un service dédié à la numérisation du patrimoine.

Pour cela, nous nous sommes intéressés à la segmentation de nuages de points et aux limites des outils existants. Pour ensuite étudier l'apprentissage profond et son application aux nuages de points. Avant de passer aux différents tests et entraînements.

## Segmentation de nuage de points

La segmentation de nuage de points facilite les traitements et la reconstruction 3D de scènes, car elle permet de déterminer les éléments constitutifs d'un nuage de points [POUX F., 2013]. Elle est définie comme "un partage/subdivision de l'ensemble des points 3D en sous-

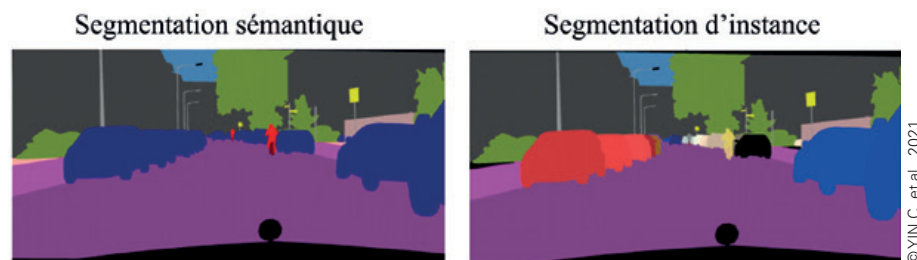


Figure 2. Différence entre la segmentation sémantique (à gauche) et la segmentation d'instance (à droite) dans le cadre d'une image.

ensembles (sous-nuages de points) homogènes, suivant des critères prédéfinis" [LANDEST. et al., 2011]. L'objectif étant de traiter de la même manière des points appartenant à un même objet. Il existe deux types de segmentation : la segmentation sémantique (qui consiste à regrouper les points par classes) et la segmentation d'instance (qui consiste à regrouper les points par objets). La segmentation d'instance est donc plus difficile, car il faut séparer des objets appartenant à une même classe, c'est pour cela que nous nous sommes focalisés sur la segmentation sémantique lors de ce travail de fin d'études.

Mais les méthodes de segmentation traditionnelles telles que la segmentation par reconnaissance de formes géométriques et la segmentation par croissance de régions présentent des limitations [POUX F., 2013]. La principale limite des techniques actuelles est le réglage des paramètres et leurs impacts sur la qualité de la segmentation. Cette limite rend compliquée l'utilisation de ces méthodes, de ces outils existants pour des non-initiés. Au vu de ces dernières, des algorithmes de segmentation basés sur l'apprentissage profond ont vu le jour avec pour objectif d'obtenir de meilleures performances et de réduire le nombre de paramètres à choisir lors d'une segmentation de nuage de points.

## Apprentissage profond

L'apprentissage profond est un sous-domaine de l'apprentissage automatique (domaine qui concentre les algorithmes pouvant apprendre à partir de données d'entraînement) (cf. figure 3). L'apprentissage profond est basé sur la notion de neurones artificiels inspirés des neurones humains.

L'association de plusieurs couches de neurones permet de créer un réseau de neurones artificiels. Lors de la phase d'apprentissage, un réseau de neurones va réaliser une prédiction que l'on va comparer à la vérité terrain. Afin de tenir compte de cette erreur, les poids internes aux neurones vont être modifiés (c'est ce que l'on appelle la rétropropagation des erreurs). L'objectif de cette phase d'apprentissage est d'obtenir un modèle qui sera utilisé pour prédire de nouvelles données.

Il existe différentes formes d'apprentissage profond comme l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé. Selon Lecun Y. et al. (2015), "la forme la plus commune de l'apprentissage automatique, qu'il soit profond ou non, est l'apprentissage supervisé". Dans cet ouvrage, les auteurs prennent comme exemple un classifieur d'images. En effet, pour entraîner un algorithme à reconnaître des objets, il faut d'abord collecter de nombreuses images et les labelliser. L'apprentissage supervisé nécessite de nombreuses données étiquetées en entrée, ce qui n'est pas le cas de l'apprentissage non supervisé. Selon ces auteurs, cet apprentissage non supervisé est un des défis à résoudre pour le développement de l'apprentissage profond, défi qui reste d'actualité en 2021.

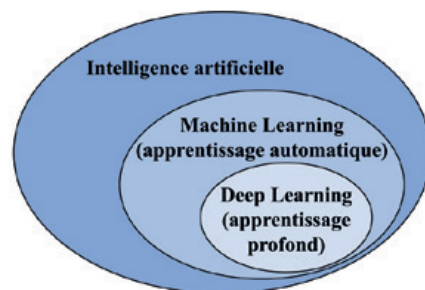


Figure 3. : Lien entre l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond.





## Nuages de points : structures et défis

Nous pouvons distinguer deux grands désavantages à l'utilisation de données 3D en entrée d'algorithmes d'apprentissage profond, hormis le fait que les nuages de points représentent un volume de données important. Les nuages de points sont irréguliers (c'est-à-dire que certaines régions du nuage peuvent contenir plus de points que d'autres) et ils sont non ordonnés (si on permute les lignes dans le fichier de points le nuage va rester le même).

Pour faire face à ces difficultés, les chercheurs utilisent différentes façons de représenter le nuage de points (cf. figure 4). En effet, un nuage de points (cf. figure 4.1) peut être reprojeté sur des plans pour synthétiser des images (cf. figure 4.2). Il peut aussi être représenté à l'aide de voxels (cf. figure 4.3), d'un ensemble permettant les convolutions (cf. figure 4.4), d'un ensemble non ordonné de points (cf. figure 4.5) ou des graphes (cf. figure 4.6). À ces différentes méthodes, nous pouvons aussi rajouter les approches qui utilisent directement les images. Dans ce cas, les algorithmes segmentent d'abord les images avant de projeter les résultats dans le nuage de points. L'objectif des méthodes utilisant des images étant de tirer parti des performances des réseaux de neurones convolutifs.

Lors de ce travail de fin d'études, nous avons observé que le développement des méthodes basées sur les images pour la segmentation de nuage de points est plus ancien. Les méthodes travaillant sur les nuages de points sont

arrivées plus tardivement (2017). Mais aujourd'hui, ces méthodes sont très présentes dans l'état de l'art et fournissent de bonnes performances.

Les différentes représentations du nuage de points (cf. figure 4) ont amené au développement de différentes méthodes pour segmenter les nuages de points comme la représentation sphérique, la représentation de discrétisation dense, les méthodes permettant l'utilisation de réseaux de neurones récurrents (RNN)... Ces méthodes permettent de segmenter (par apprentissage profond) un nuage de points, mais elles peuvent faire apparaître un certain nombre d'inconvénients comme : un coût élevé en termes de ressources de calculs, une perte d'information, des difficultés à extraire l'interaction mutuelle entre les points...

## Identification des algorithmes et des jeux de données permettant la segmentation de nuages de points

La finalité de ce travail de fin d'études est de prédire, à terme, des nuages de points volumineux relevés par Quarta. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur les algorithmes développés dans ce sens lors de l'état de l'art. Il existe plusieurs algorithmes basés sur l'apprentissage profond pour réaliser une segmentation de nuage de points, mais beaucoup d'entre eux sont destinés à des nuages peu volumineux. De cet état de l'art, six algorithmes sont ressortis et nous en avons finalement choisi trois. Ces trois algorithmes utilisent trois façons de représenter le nuage de points : un algorithme est basé

sur des graphes, un autre est basé sur la notion de convolution et un autre utilise le nuage de points en tant qu'ensemble non ordonné.

Dans le cadre de l'apprentissage profond supervisé pour entraîner les algorithmes nous avons besoin de données annotées ou "labellisées". Concernant les nuages de points, l'annotation est un processus qui demande beaucoup de temps afin de classer les points dans différentes catégories. Lors de ce TFE, nous avons listé les jeux de données ouverts permettant d'entraîner des algorithmes de segmentation de nuage de points. Il en existe plusieurs, contenant un nombre différent de points (allant d'un million à un milliard de points) et relevés de différentes manières. Mais beaucoup d'entre eux concernent l'extérieur des bâtiments (arbres, routes, voitures...), ce qui est en accord avec le développement de la voiture autonome. Nous avons finalement sélectionné un jeu de données conforme aux besoins du service BIM de Quarta.

## Tests et entraînements

Les trois algorithmes que nous avons choisis disposent de modèles préentraînés sur le jeu de données ouvert. C'est-à-dire que les auteurs des algorithmes ont entraîné ces derniers sur le jeu de données ouvert et ont ensuite mis leurs modèles à disposition. Nous avons donc lancé les modèles préentraînés sur le jeu de données afin d'essayer de retrouver les performances des auteurs et ainsi valider ou non notre installation. À l'issue de ce test et au vu des résultats, deux algorithmes sur les trois ont été conservés.

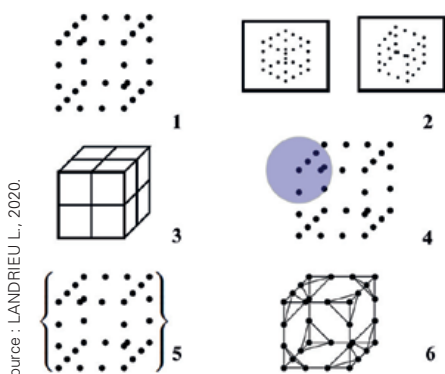


Figure 4. Présentation de différentes structures permettant l'apprentissage profond sur les nuages de points.

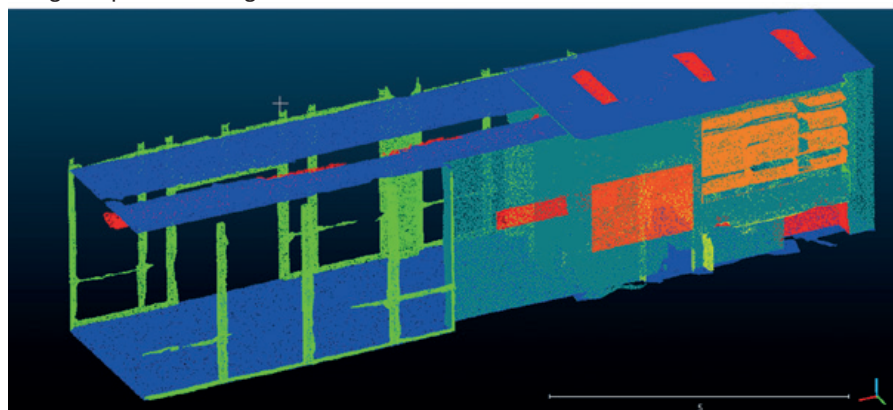


Figure 5. Vue d'une pièce du jeu de données ouvert sélectionné lors de ce TFE.



Cette phase d'utilisation des modèles préentraînés nous a aussi permis d'avoir une notion du temps de traitement nécessaire pour réaliser une segmentation. Tout d'abord un temps de préparation (processus automatisé) de la donnée est nécessaire et celui-ci ne dépasse pas trente minutes pour les trois algorithmes que nous avons testés. Le temps de segmentation, quant à lui, va varier en fonction des algorithmes, mais aussi de l'infrastructure informatique. Mais il ne dépassera pas quelques heures sur un ordinateur dimensionné pour un service de modélisation du patrimoine.

Une fois l'installation validée, nous avons testé ces modèles préentraînés sur un nuage de points relevé par Quarta. Pour cela nous avons décidé d'utiliser un nuage de points relevé par Quarta à Rennes et composé de deux bâtiments. Un des bâtiments de ce nuage de points a été choisi comme bâtiment de test et le deuxième bâtiment a été utilisé durant la phase d'entraînement.

Nous avons choisi ce nuage de points car l'architecture de ce bâtiment est similaire à d'autres bâtiments que Quarta pourra relever dans le futur. En effet, les deux bâtiments sont rectangulaires et sans formes complexes. Ce nuage de points a été acquis début 2021 par un levé RTC360 (sur une surface de 5 000 m<sup>2</sup> de bureaux). Dans un souci de performance, nous avons sous-échantillonné ce nuage à un point tous les centimètres.

Lors de cette étape, nous avons pu observer que ces modèles préentraînés permettent d'obtenir des résultats corrects sur certaines classes (cf. figure 6). Mais les résultats sont plus mitigés sur d'autres classes (cf. figure 7 à gauche) et nous pouvons noter qu'il y a beaucoup de confusions entre la classe fenêtre

(vert clair) et la classe "non classé" (rouge).

Cette étape de test nous a permis de voir que les modèles préentraînés (mis à disposition par la communauté) ne permettent pas en l'état de segmenter efficacement les nuages de points relevés par Quarta. À l'issue de cette étape, nous avons donc décidé d'augmenter légèrement la taille de ce jeu de données mis à disposition par la communauté (en "open source") en rajoutant des exemples issus de nuages de points de Quarta.

### Augmentation du jeu de données et entraînement des algorithmes

Avant de rajouter des données à notre jeu de données ouvert, nous avons décidé d'entraîner les deux algorithmes sur le jeu de données ouvert. L'objectif étant de retrouver les performances des modèles préentraînés fournis par les auteurs et ainsi de valider notre processus d'entraînement. Durant cette phase d'entraînement, nous avons pu noter qu'un certain nombre de paramètres des algorithmes peuvent être à modifier pour s'adapter à l'infrastructure informa-

tique. Cette phase d'entraînement nous a permis d'estimer le temps nécessaire afin d'obtenir un modèle de segmentation des nuages de points. Ce temps d'entraînement est impacté par le fait de travailler sur processeur ou sur carte graphique, par les algorithmes utilisés (et donc par la façon de représenter le nuage de points), mais aussi par le nombre d'époques d'entraînement choisi. Ce temps d'entraînement peut aller d'une dizaine d'heures à quelques jours sur carte graphique (le temps nécessaire sur processeur étant plus long). Cette étape nous a permis d'éliminer un algorithme (au vu du temps d'entraînement et de ses performances).

Afin de tester l'impact de l'entraînement et de l'adapter aux données de Quarta nous avons décidé de rajouter des données au jeu de données ouvert. Pour cela, nous avons segmenté manuellement un bâtiment d'un nuage de points (le deuxième bâtiment du nuage de Quarta relevé à Rennes). L'objectif étant de fournir à l'algorithme des exemples similaires à ce qu'il aurait à prédire lors de la phase de test.

Nous avons ensuite entraîné l'algorithme restant sur notre nouveau jeu de données. Comme nous avons augmenté très légèrement le jeu de données, le temps d'entraînement n'a pas été considérablement modifié et est jugé parfaitement acceptable pour les contraintes opérationnelles d'un cabinet de géomètre-expert. Cet entraînement nous a permis d'obtenir un modèle. Une fois le modèle obtenu, nous sommes passés à la phase de prédiction du bâtiment de test. Là encore, le temps de

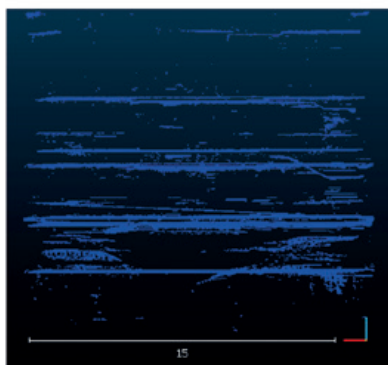
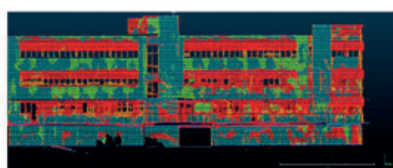
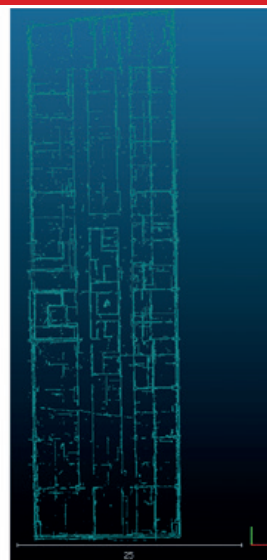


Figure 7. Vue de face du bâtiment de test avec les sols et plafonds (à gauche) et vue de dessus avec les murs (à droite). Résultats obtenus avec l'algorithme sélectionné lors de ce TFE.



Effet de  
l'augmentation

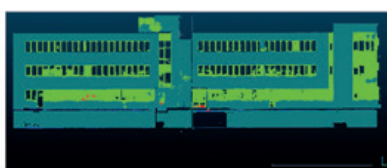


Figure 6. Vue intérieure d'une façade du bâtiment. Résultats obtenus avec l'algorithme sélectionné lors de ce TFE : avec le modèle préentraîné (à gauche) et après entraînement sur le jeu de données augmenté (à droite). (Fenêtre : vert clair, mur : vert foncé, non classé : rouge)





prédiction est similaire à celui concernant le jeu de données ouvert seul. À l'issue de cette segmentation, nous avons pu observer une amélioration de la prédiction de certaines classes et notamment des fenêtres (cf. figure 7 à droite).

Certaines classes restent encore difficiles à prédire pour l'algorithme et c'est notamment le cas des chaises (cf. figure 8). Sur la figure 8, une chaise est en rouge (non classé) alors qu'elle devrait être en jaune. De plus, nous avons pu noter des confusions entre certains objets, avec comme exemple les bureaux et les sols (cf. figure 8). De même, les escaliers qui ne sont pas présents dans le jeu de données d'apprentissage sont segmentés en tant que sols, meubles et non classés.

À l'issue de cette segmentation, nous avons pu noter que cet entraînement n'est pas parfait et qu'il reste encore de nombreuses confusions dues notamment à un manque en entrée de données annotées. De plus, nous avons choisi d'avoir un nuage de test en entrée sans formes trop complexes, mais celui-ci reste toutefois plus élaboré que les nuages issus du jeu de données ouvert.

Les différents entraînements réalisés démontrent bien l'importance du jeu de données fourni en entrée dans le cadre de l'apprentissage profond supervisé. Nous pouvons changer différents paramètres pour les algorithmes (nombre d'époques d'entraînement, taille des lots...), tester différents algorithmes,

mais au final la qualité de la segmentation dépend fortement de ce jeu de données.

## Conclusion

La segmentation de nuage de points est une étape essentielle pour la reconstruction 3D de scènes, mais les méthodes traditionnelles présentent des limites. Lors de ce TFE, différentes méthodes permettant de segmenter un nuage de points à l'aide de l'apprentissage profond ont été étudiées avant de choisir trois algorithmes pour les tests. Nous avons pu voir que la principale difficulté pour les algorithmes est de trouver un compromis entre qualité de la segmentation et consommation de ressources informatiques. À l'issue de ces tests, un algorithme fut sélectionné.

L'utilisation d'algorithmes basés sur l'apprentissage profond présente quelques difficultés, mais les performances de ces algorithmes sont supérieures à celles des méthodes traditionnelles. De plus, le processus de segmentation est totalement transparent pour l'utilisateur final : il n'y a plus aucun paramètre à régler lors de la segmentation. Les seuls paramètres à changer le seront pendant la phase d'entraînement (qui peut être réservée à un public plus averti).

Cette notion d'apprentissage automatique reste très spécifique et écartée du monde de la numérisation 3D. Mais, lors de ce TFE, nous avons pu observer que les temps d'entraînement et de prédiction (70 millions de points en cinq minutes) sont intégrables à une chaîne de traitement d'un service dédié à la numérisation du patrimoine et les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'apprentissage profond pour la segmentation de nuages de points.

De plus, nous avons vu la nécessité d'utiliser un jeu de données de qualité et représentatif de ce que l'on souhaite segmenter dans le cadre de l'apprentissage supervisé. Or les acteurs de la numérisation du patrimoine disposent d'un nombre important de données brutes (nuages de points, images) et ont donc leurs rôles à jouer dans le domaine de la segmentation de nuages de points par apprentissage profond. ●

## Contact

Maxime MÉRIZETTE  
m.merizette@quarta.fr

## Remerciements

Ce travail de fin d'études a été réalisé au sein du service BIM de Quarta. Ce travail a fait l'objet de nombreux échanges avec mon maître de stage M. GELDOLF Jean-Baptiste que je tiens à remercier pour le temps qu'il m'a accordé et les conseils qu'il m'a donnés.

## Bibliographie

LANDES T., GRUSSENMEYER P., BOULAASSAL H., 2011, *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications*, XYZ : revue de l'Association francophone de topographie, Association Francophone de Topographie, n° 129, pages 25-38

LANDRIEU L., 2020, *Deep Learning pour l'analyse automatique de donnée 3D*, conférence IGN

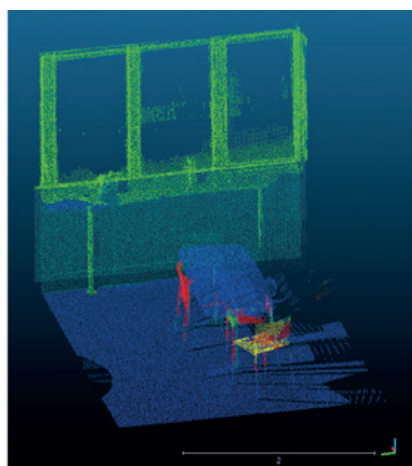
LECUN Y., BENGIO Y., HINTON G., 2015, *Deep learning*, Nature, 521, pp. 436-444. Disponible sur : <https://doi.org/10.1038/nature14539>, consulté en février-mars 2021

POUX F., 2013, *Vers de nouvelles perspectives lasergramétriques : optimisation et automatisation de la chaîne de production de modèles 3D*, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 87 p.

YIN C., TANG J., YUANG T., XU Z., WANG Y., 2021, *Bridging the Gap between Semantic Segmentation and Instance Segmentation*, in IEEE Transactions on Multimedia, doi: 10.1109/TMM.2021.311454, pp. 1-14

## ABSTRACT

*Terrestrial laser scanners enable to acquire huge amount of data quite fast and more and more easily. But this is tarnished by the lack of point cloud processing automation. Point cloud segmentation, which consists of extracting the constituent elements from a point cloud, suffers in particular from this lack. This study conducted by Quarta focuses on the contributions of deep learning for the achievement of a point cloud segmentation. It proposes to list the different deep learning methods developed for point clouds and test different algorithms for processing largest ones.*



**Figure 8.** Vue du bâtiment de test avec un bureau et des chaises. Résultat obtenu avec l'algorithme sélectionné lors de ce TFE entraîné sur le jeu de données augmenté.

# La Base de Plouescat, un maillon essentiel de la cartographie française

Une recherche personnelle qui débouche sur une autre découverte

■ Geneviève ROUSSEAU

*Depuis mon enfance, je savais, grâce à mon père, qu'une borne d'importance historique se trouvait dans un champ à l'entrée de Plounéour-Trez. Il m'avait dit aussi qu'il existait une borne semblable dans le cimetière de Plouescat ; ces deux bornes délimitaient "la Base de Plouescat". Cette Base figurait sur une carte dans un couloir chez mes parents ; je la regardais sans en comprendre grand-chose.*

*Les années passent, mon père vieillit, ne pouvant plus se déplacer, il me demande d'aller aux archives de Quimper pour tenter de trouver une explication à l'orientation de la digue de Goulven. Me voici partie pour explorer le dossier des archives de Tréflé, Goulven, Plouider et Plounéour-Trez à la recherche d'une éventuelle carte indiquant, par exemple, la présence d'une roche sur laquelle l'extrémité ouest de la digue aurait pu prendre appui. Mes recherches sont vaines mais... en fouillant dans tous ces vieux papiers, je tombe sur le plan en coupe des bornes de la Base. Mon intérêt est immense mais à l'époque, rien pour photographier, seule ma mémoire enregistre ce plan.*

*Des années plus tard, le temps de la retraite étant arrivé, je retourne à Quimper pour retrouver ce plan inconnu de tous mes proches. Plusieurs journées de vaines recherches. Je sollicite le conservateur et ses collaborateurs sans succès. Un jour, deux jours de recherche, des courriels, absolument rien.*

*Je décide alors d'aller aux archives de Vincennes et je trouve un dossier complet concernant la mission du colonel Bonne pour la définition de la "Base de Plouescat". Je me régale, feuillette, prends des notes, parfois des photos, tape le rapport, etc. jusqu'à trouver le projet de plan en coupe, celui qui était rangé dans ma mémoire : le voici, je n'avais donc pas rêvé (figure 11).*

*Ensuite, après avoir trouvé ce que je cherchais, il me fallait entrer plus avant dans la belle aventure du colonel Bonne. De fil en aiguille, je découvre peu à peu tout un pan de l'histoire de l'élaboration des cartes. J'ai tenté de comprendre puis de résumer les grands principes de ces démarches humaines et scientifiques qui ont, jusqu'il y a très peu de temps, servi de base à toute notre cartographie.*

## Petite histoire de l'élaboration des cartes

Depuis Ptolémée, géographe gréco-romain (II<sup>e</sup> siècle apr. J.-C.), les hommes ont tenté de représenter le monde. De tout temps, la forme de la terre était un sujet polémique : Newton affirmait qu'elle était aplatie aux pôles tandis que d'autres, dont les Cassini, penchaient pour une forme allongée aux pôles. Deux expéditions, l'une au pôle nord en Laponie (1736/1737), l'autre au Pérou (1735/1744) sur l'équateur quittent le royaume. Les résultats sont sans appel, la terre est aplatie aux pôles.

En France, la dynastie des quatre Cassini apporte une large contribution dans le domaine de l'élaboration des cartes. Puis, à la faveur de l'émulation entre ingénieurs civils (les Cassini et consorts) et ingénieurs militaires, de grands progrès sont réalisés.

Tous ces travaux se font sous les ordres et le contrôle de l'Académie des sciences, créée en 1666. Soutenus par les rois de France, spécialement Louis XV puis Louis XVI, les experts améliorent leur méthode. Enfin, dans la perspective des affrontements avec les pays voisins, notamment les Anglais, le roi ordonne que soient dressées au plus vite les cartes de France. Cassini III, appelé Cassini de Thury, en est chargé.

## Méthode d'élaboration des cartes

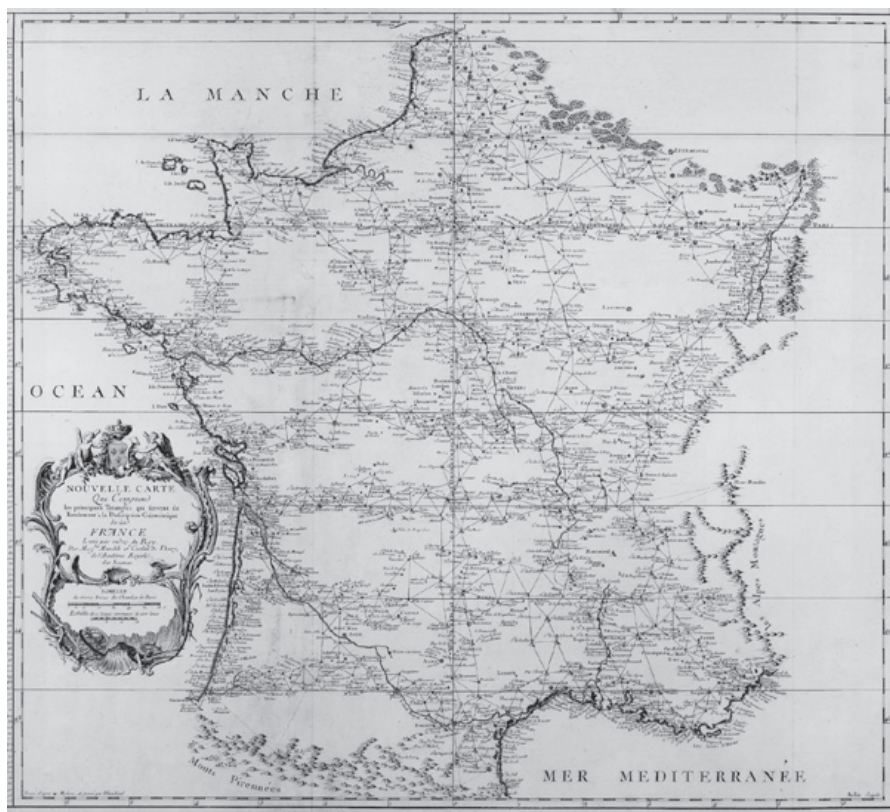
Le principe de l'établissement des cartes est basé sur la méthode de la triangulation. Cette méthode est initiée par Picard avec la mesure de la méridienne Paris-Amiens (1669-1671) afin de déterminer le rayon terrestre.

Il s'agit de constituer des chaînes de triangles accolés. Tous les angles de ces triangles sont mesurés. Afin de mettre à



Figure 1. Carte dans le couloir chez mes parents (cf. figure 14).





**Figure 2.** Carte de Cassini (triangulation) - 1744.

l'échelle la figure, on mesure, avec des règles de grande précision, la longueur de bases rectilignes d'une dizaine de kilomètres de côtés. Par un calcul trigonométrique, connaissant la longueur d'une base, on peut obtenir la longueur de tous les côtés du triangle. La figure est également orientée par des mesures astronomiques d'azimut.

Quelques bases et points astronomiques sont observés pour ajuster les erreurs d'observation qui se propagent de triangle en triangle. En se fixant les coordonnées d'un point de départ (point fondamental), à qui sont attribuées les coordonnées longitude et latitude par mesures astronomiques, on calcule de proche en proche les coordonnées des sommets de triangles qui sont évidemment choisis avec soin. En effet, chacun des sommets doit pouvoir être visible de loin (la longueur des côtés des triangles est de l'ordre de 30 km) et en particulier des sommets des triangles voisins pour effectuer les mesures d'angle. Pour ces raisons, les sommets de triangles retenus ont souvent été des points remarquables tels que clocher, tour de château, moulin, sommet de colline, montagne. Parfois, en l'absence de

signaux visibles de loin, des signaux ont été bâtis en bois, parfois aussi repeints pour accroître le contraste avec leur environnement (cf. rapport de mission de Delambre et Méchain...).

Le maillage du territoire est réalisé en plusieurs étapes. Le maillage du premier ordre (*figure 2*) consiste en un ensemble de triangles jointifs le long des frontières ainsi que de lignes nord-sud (les méridiennes) et est-ouest (les parallèles). Les vides entre les méridiennes et parallèles sont remplis peu à peu par des triangles complémentaires.

Le maillage ainsi réalisé, également appelé "châssis", sert de base à l'élaboration des cartes, les levés topographiques puis photographiques utilisant les points géodésiques pour se caler.

Cette méthode de triangulation a été utilisée depuis la Renaissance et surtout au XVIII<sup>e</sup> siècle. Les triangulations se succèdent – triangulation de Cassini, triangulation des ingénieurs géographes, nouvelle triangulation française – avec des améliorations instrumentales et calculatoires et prendront fin au XX<sup>e</sup> siècle avec l'apparition de la géodésie spatiale.

La méthode a été affinée en particulier

par Delambre et Méchain grâce à la précision des instruments nouveaux, conçus et fabriqués pour leurs travaux. Ainsi, les règles de Borda, fabriquées par Etienne Lenoir, et les cercles répéteurs ont permis des calculs de plus en plus précis.

En 1790, l'Assemblée constituante décide, dans le but d'établir une nouvelle unité universelle de distance, de créer le mètre. Pour cela, elle confie à l'Académie des sciences la mission de définir celui-ci : ce sera le dix-millionième du quart d'un méridien terrestre (le quart d'un méridien est la distance pôle-équateur). Pour faire correspondre la mesure astronomique avec une distance terrestre, il fallait procéder à une mesure réelle de distance sur une grande portion de méridien. Cette mesure a été faite sur une ligne de Dunkerque à Barcelone (env. 1 000 km) correspondant à une portion du quart de méridien, équivalent à  $9,5^\circ$ , angle qui sépare Dunkerque de Barcelone par rapport au centre de la Terre.

Delambre et Mechain ont été chargés de ce travail. Ils vont calculer le plus exactement possible cette longueur grâce à



**Figure 3.** Mesure de la méridienne, triangulation de Delambre et Méchain.



la méthode de triangulation expliquée ci-dessus. Il est maintenant possible par une simple règle de trois d'en déduire le rapport entre la toise et le mètre pour correspondre à la définition de ce dernier. Le mètre sera définitivement fixé en 1799 et sera formalisé par une règle en platine déposée à l'Observatoire de Paris.

Après cette digression donnant le contexte technique de l'époque, reprenons le fil de notre récit.

Le mètre étant défini, reste à reprendre le maillage de triangulation pour conti-

nuer à améliorer la cartographie de la France. C'est le travail des ingénieurs géographes militaires à partir du début du XIX<sup>e</sup> siècle.

La *figure 6* reproduit le schéma de cette triangulation de 1<sup>er</sup> ordre observée entre 1826 et 1841. Les angles des triangles sont mesurés avec un cercle répétiteur de Borda de 31 cm de diamètre (*figure 5*) et les bases avec la règle de Borda (*figure 4*). Les sept bases sont : Melun, Perpignan, Ensisheim, Plouescat, Bordeaux, Dax et Aix. Une dizaine de stations astronomiques sont



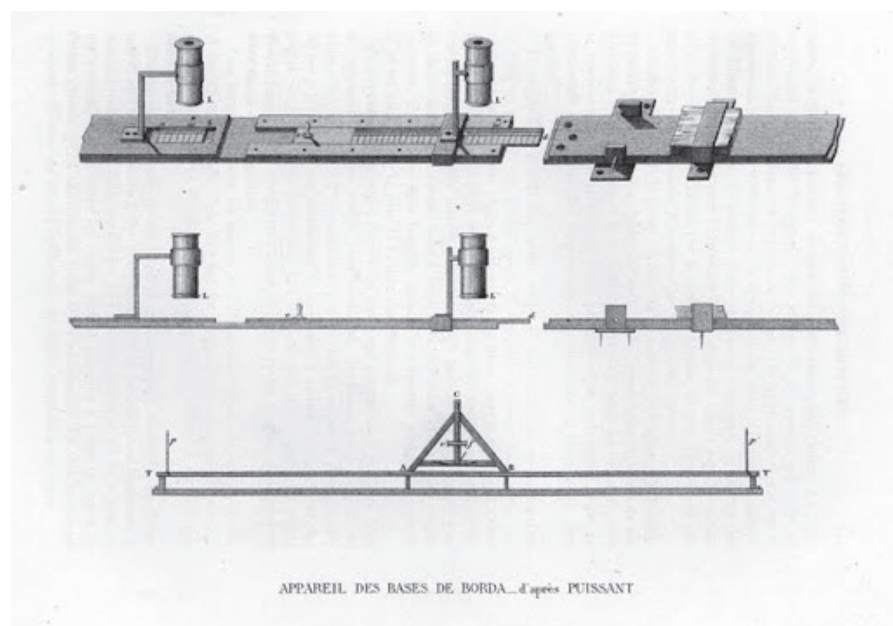
**Figure 6.** Chaîne des triangles de 1<sup>er</sup> Ordre (1818-1843).

déterminées dont l'une près de Brest. Le colonel Bonne fut l'un des observateurs des stations astronomiques. Cette triangulation a été la base de la carte d'état-major, avec l'échelle des minutes au 1/40 000. La projection cartographique utilisée a été inventée par Rigobert Bonne (1727-1794), père du colonel Bonne et porte son nom. Elle est équivalente, conserve les surfaces. Cette carte fut utilisée pendant plus d'un siècle.

## La mission du colonel Bonne

Et c'est ici qu'intervient notre petite histoire. La base occidentale est celle qui servira de base de vérification à l'ensemble de la triangulation démarrée à Strasbourg et passant par une base intermédiaire à Melun.

En début 1823, le ministre de la Guerre charge le colonel Bonne de définir et de mesurer la base occidentale, celle qui portera le nom de "Base de Plouescat". Dans la pratique, la tâche était un peu plus ardue que prévu puisqu'aucun des côtés des triangles ne présentait les caractéristiques nécessaires pour une base. En effet, compte tenu de la configuration de l'extrémité ouest de la Bretagne, constituée de plateaux vallonnés, entrecoupés de cours d'eau souvent profonds, le colonel Bonne a donc dû "déporter" la mesure de cette distance sur une portion la plus plane possible visible des deux sommets d'un des triangles du maillage.



**Figure 4.** Schémas des règles de Borda.

Sur les schémas du haut on peut voir les extrémités de deux de ces règles avec :

- un vernier (graduations) et sa lunette pour estimer la dilatation de la règle de platine. En fait, on mesure la dilatation différentielle de la réglette de cuivre située sur le dessus de la règle principale en platine.
- un vernier avec sa lunette pour mesurer, via une languette de platine, l'écartement de deux règles.

Sur le schéma du bas on peut voir la charpente en bois sur laquelle sont posées les règles. Cette charpente permet de viser les deux extrémités de la base, de régler et de mesurer l'horizontalité des règles.



**Figure 5.** Cercle répétiteur de Borda (collection CNAM). Cet instrument de mesure angulaire permet, en répétant plusieurs fois la même observation sans revenir au zéro, de diviser les erreurs de lecture et de graduation par le nombre d'observations.



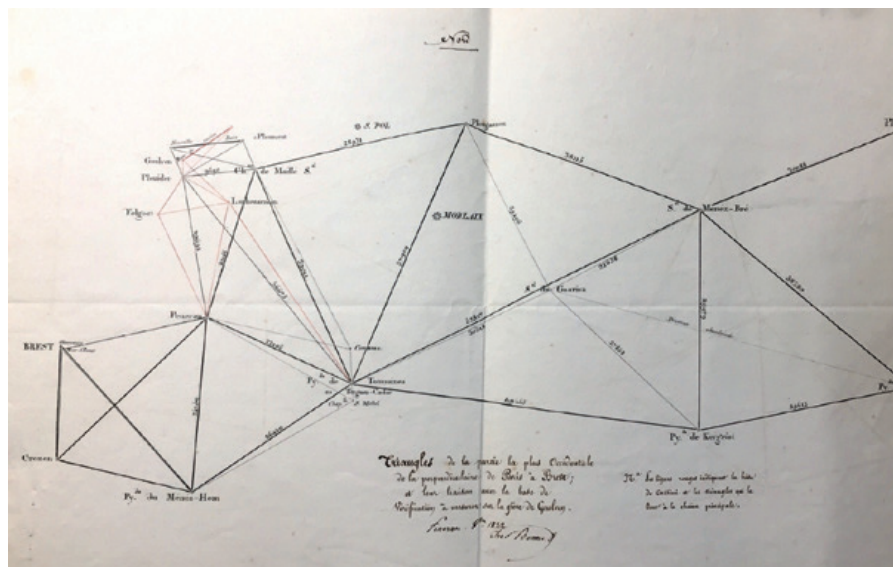


Figure 7. Carte des triangles du colonel Bonne avec mention de la Base de Cassini.

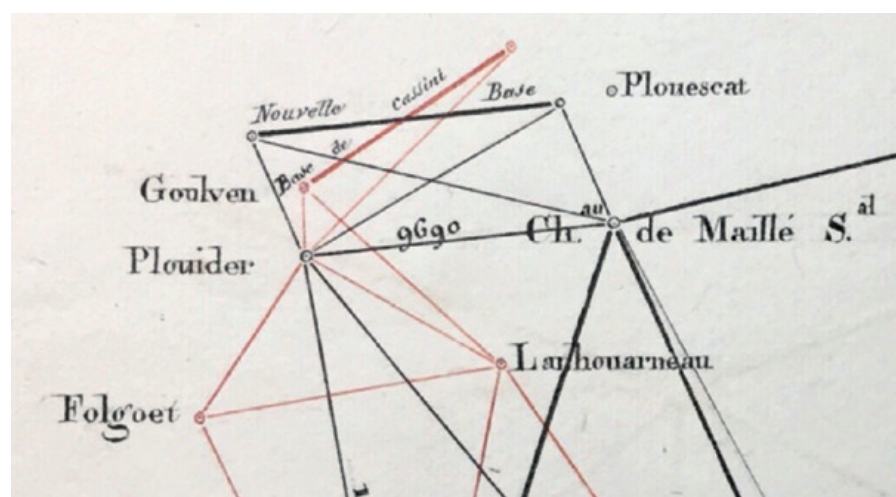


Figure 8. Agrandissement de la nouvelle Base de Plouescat et celle de Cassini (en rouge).

Après avoir cherché autour du Pontou et de Douarnenez, Bonne se retrouve à installer sa mission sur la Baie de Goulven, c'est-à-dire le même espace que celui où avait travaillé Cassini de Thury, célèbre astronome, chargé des levés de la Carte de France par Louis XV (figures 7 et 8).

Pour que la base serve de vérification pour la chaîne des triangles, comme il est dit ci-dessus, il fallait donc trouver deux points qui soient visibles du côté du triangle à vérifier. Les deux derniers points, ou signaux, sont le château de Maillé et le clocher de Plouider. La Baie de Goulven offrait des avantages certains : cet espace non cultivé, recouvert par les marées, n'offrait aucun obstacle entre Plounéour et Plouescat. Seuls deux cours d'eau, la Flèche et le Kerallé, présentaient

quelques difficultés de franchissement. Le reste de cet espace n'était que sable peu stabilisés. La digue de Goulven n'était pas encore construite (démarage des travaux en 1825) et les dunes n'étaient pas rehaussées. Rien ne s'opposait aux visées et aux mesures.

Le rapport de mission du colonel Bonne, conservé aux archives de Vincennes (carton n° 3, 21A9), nous apprend que celle-ci s'est déroulée du 27 août 1823 au 24 octobre de la même année, soit 59 jours.

Une fois le travail terminé, le colonel Bonne a voulu matérialiser la base en y faisant édifier une borne à chaque extrémité : l'une à Plounéour, appelée terme occidental (figure 10) et l'autre à Plouescat, appelée terme oriental (figure 9). Chaque borne, haute d'un mètre environ, se termine en forme



Figure 9. Borne du cimetière de Plouescat, terme oriental avec ses pyramidions (photo : août 2021).



Figure 10. La borne de Plounéour à Tréguelier, terme occidental (photo : août 2021).

pyramidale. Aujourd'hui les bornes sont entourées de quatre pyramidions. Ils ont probablement été installés lors de leur restauration en 1891 pour marquer la zone à préserver.

Nous apprenons dans ce rapport de mission, que : le soubassement des bornes, en dessous du niveau du sol, est en granit du pays et que la partie supérieure est en Kersanton, pierre facile à sculpter en sortant de carrière et qui se durcit à l'air libre. Un écusson, toujours parfaitement visible, est gravé sur chaque borne, avec la date de 1823 et l'inscription "terme oc" et "terme or".

En cherchant plus avant dans le dossier, je tombe enfin sur le fameux plan en coupe tant recherché (figure 11). Il s'agit d'un projet indiquant qu'à l'intérieur de la borne sera placé un cylindre en cuivre correspondant à l'axe exact de la base, au-dessus duquel se trouvera une petite cavité en plomb qui renfermera un parchemin.

Le projet de borne indiquerait l'objet de la mission, l'année, le nom du roi



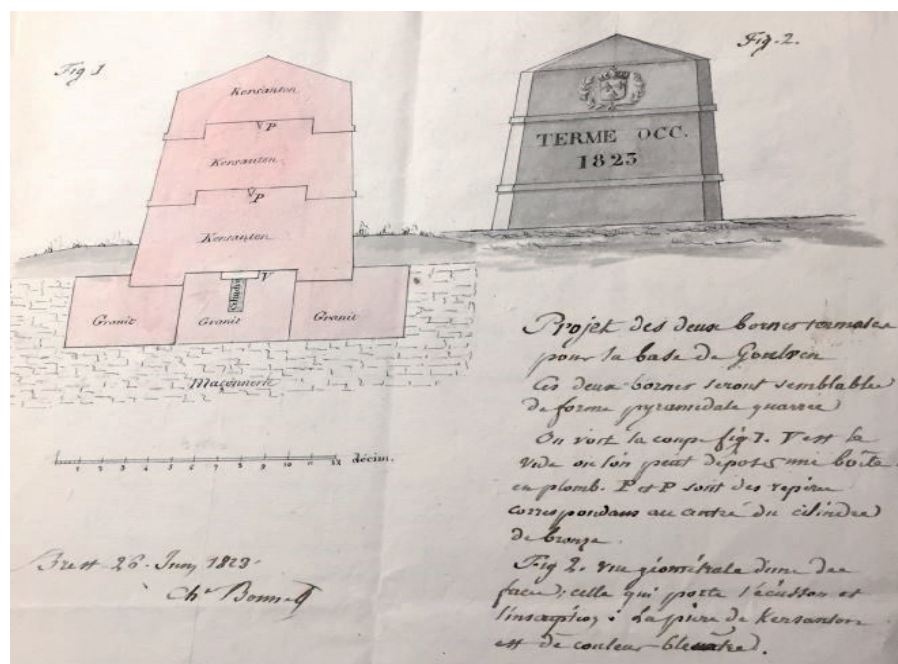


Figure 11. Plan en coupe des termes de Plouneour et de Plouescat (archives de Vincennes).

qui régnait à l'époque (Louis XVIII), du ministre de la Guerre, du directeur du Dépôt de la Guerre, du directeur des travaux de la Carte de France, du colonel Bonne et de l'entrepreneur des travaux maritimes à Brest, chargé de l'exécution de ces bornes.

En fait le rapport de mission ne mentionne plus tous les noms des responsables envisagés par le colonel Bonne... Il reste donc ici encore un mystère...

Dernière étape de mon enquête : comprendre comment et avec quelle précision les mesures de la base ont été faites pour arriver à la longueur de 10 526,91 m indiquée dans le "registre" du rapport.

À chaque extrémité de la future base sont implantées des mires. Entre ces deux mires, des règles posées sur des bâts de bois, sont emboîtées à l'horizontale. Chaque règle mesure environ 4 mètres ce qui correspond à 2 toises (toise = 1,94904 m). Trois règles ont été utilisées. Ce sont les mêmes règles numérotées qui avaient permis le calcul de la distance en toises du méridien et ainsi d'en déduire la mesure du mètre. Elles ont été prêtées pour mesurer la Base de Plouescat, par l'Observatoire de Paris où elles étaient conservées. Aujourd'hui, il semblerait que deux de ces règles existent toujours à

l'Observatoire. Une quatrième venant également de l'Observatoire servait de contrôle (règle module).

Tout était pris en compte, y compris la dilatation de la règle en platine (cf. règles de Borda, figure 4). Les nombreux instruments perfectionnés et parfois récents, cercle répéteur (calcul des angles), niveaux à bulle, fils

Les bases	Dax	Bordeaux	Ensisheim	Aix	Plouescat
Melun	12219.24	14119.65 14117.77 14117.82	19044.13	8067.17	10526.91
Perpignan	12220.77 12218.49			8066.93 8067.15	
Dax	12220.03			8066.44	
Bordeaux	12219.73	14119.08		8067.35 8067.70	
Ensisheim		14119.00 14118.17	19044.40		10527.08
Aix				8066.65	
Plouescat		14118.32 14119.06			10526.91

Figure 12. Les mesures encadrées correspondent aux longueurs mesurées sur le terrain. Les autres mesures sont le résultat des calculs par triangulation.

à plomb, lunettes des passages (lunette astronomique), tous ces instruments ont permis à l'équipe du colonel Bonne de faire de nombreuses visées successives et de calculer sa base avec une grande précision. La cohérence entre la mesure de la base de Plouescat, effectuée sur le terrain par le colonel Bonne et les mesures théoriques de cette même base, calculées par triangulation à partir de la Base de Ensisheim



Figure 13. Antenne GNSS posée au sommet de la borne. La position relative précise entre les deux bornes est obtenue grâce au système collaboratif Centipède (docs.centipede.fr).





Figure 14. Carte de la Base de Plouescat par le colonel Bonne (1823).

et celle de Melun, validait l'ensemble de la triangulation entre Strasbourg et Plouescat (figure 12).

Et enfin, voici la confirmation de l'extraordinaire précision des mesures. Grâce à un récepteur GNSS (*Global Satellite Navigation System* : terme générique englobant les systèmes américain GPS, russe GLONASS, chinois BEIDOU et européen GALILEO), nous avons pu vérifier avec une précision de l'ordre du centimètre, la longueur de la Base de Plouescat : 10 526,99 m (calculée à partir des coordonnées cartésiennes géocentriques RGF93 et réduite à l'altitude zéro) ; c'est-à-dire seulement 18 cm d'écart avec la mesure du colonel Bonne. La petite différence entre les deux chiffres peut être attribuée à une approximation de la mission de 1823, mais également à la méthodologie de comparaison puisque la mesure actuelle est faite sur le sommet de la borne qui, en raison de l'imprécision de la construction et de l'effet du temps (restauration en 1891), n'est pas nécessairement à l'aplomb exact du petit cylindre de cuivre qui, à l'intérieur de la borne, marque le point géodésique de référence. Notre admiration pour le travail de 1823 ne peut que grandir devant cette comparaison.

## Que reste-t-il de cette belle histoire ?

Concrètement, le travail du colonel Bonne a fait l'objet d'une carte montrant l'emplacement exact de la base ce qui permet de suivre parfaitement ses visées.

Ces travaux de cartographie, faits au début du XIX<sup>e</sup> siècle, ont permis l'élaboration des cartes d'état-major, éditées à partir de 1818 jusqu'en 1866. Elles ont servi de référence jusqu'en 1991 ce dont nous n'avons pas conscience à l'heure du positionnement par satellites.

Au final, comme nous l'avons découvert peu à peu, le travail du colonel Bonne et de ses aides est totalement remarquable ; les opérations de mesure sont spectaculaires compte tenu des moyens de l'époque et du terrain soumis aux flux et reflux de la mer. Il a fallu 59 jours au colonel Bonne pour mesurer la base. Avec un récepteur GNSS, 59 minutes, trajet automobile compris, ont suffi.

En outre, le soin apporté pour l'édification des bornes montre l'importance de ces mesures et explique leur conservation exceptionnelle.

Dans le rapport du colonel Bonne, il est noté : *"elles ont été particulièrement recommandées à la surveillance des autorités municipales de Plounéour et Plouescat"*. Puisqu'elles sont bien conservées, nous constatons que la surveillance a été efficace.

Aussi, comme le propose, dans le bulletin d'Environnement et Patrimoine de Kerlouan de septembre 2019, Louis Chauris, professeur émérite en géologie, nous pourrions imaginer sortir le colonel Bonne et ses acolytes de l'oubli de la mémoire locale. L'année 2023, année du bicentenaire de la mission du colonel Bonne, pourrait être l'occasion de les mettre à l'honneur en saluant leurs performances et en créant un événement entre Plouescat et Plounéour. ●

## Contact

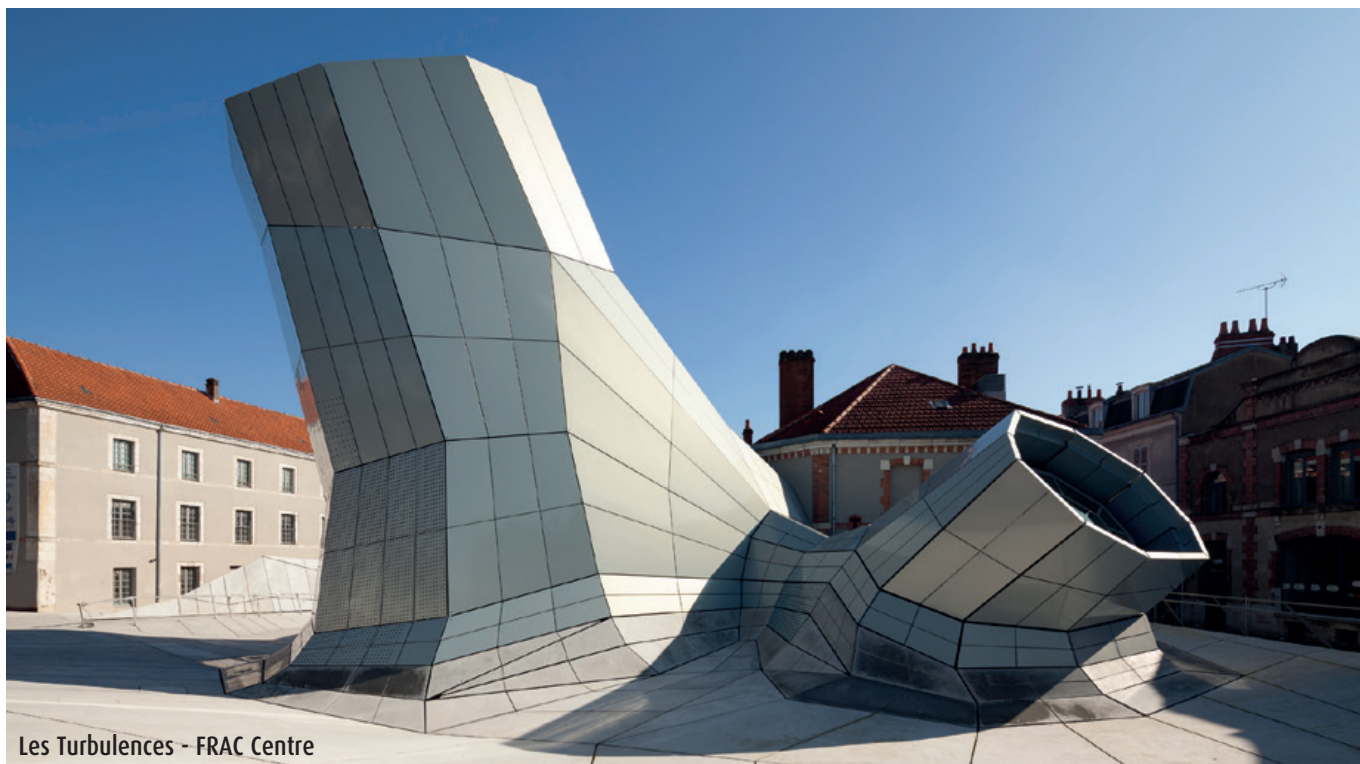
Geneviève Rousseau

## Remerciements

Avec l'aide de ses enfants (Ballu) : Valérie, Sylvain, Florent, spécialement Alexis, et la relecture avisée de Françoise Duquenne. Nous remercions également Julien Ancelin et le système Centipède pour la mesure actuelle de distance entre les bornes.

## Jacob + MacFarlane : les Turbulences Mathias Goeritz : écho zen

■ Jean-Pierre MAILLARD



Les Turbulences - FRAC Centre

© Jacob + MacFarlane. Photo : Nicolas Borel

*Les premiers fonds régionaux d'art contemporain (FRAC) fêtent en 2022 leur quarantième anniversaire. Ils sont à la croisée du public et des artistes vivants (sculpteurs, peintres, photographes et autres porteurs d'expression plastique en tout genre) puisque seules leurs œuvres peuvent entrer dans les collections. Celles-ci s'enrichissent au fil des années et sont la vitrine de la décentralisation artistique et culturelle dans toutes les régions. Mais ces créations ne sont pas les seules au service du rayonnement des FRAC puisque les bâtiments qui les reçoivent subissent aménagements et adaptations tout aussi contemporains ou encore sont l'objet de constructions neuves porteuses d'une volonté d'innovation architecturale. Il n'est donc pas surprenant que le FRAC Centre – Val de Loire, pour mieux affirmer sa mission de diffusion de l'art en phase avec son temps, soit remarqué par un nouveau bâtiment aux lignes audacieuses en phase avec une collection et une programmation principalement centrées sur le lien entre création artistique et architecture.*

### Le FRAC Centre – Val de Loire "Art et architecture"

Comme les autres fonds, le FRAC Centre, créé en 1983, constitue une collection en mettant l'accent sur la création nouvelle et sa diffusion accompagnée d'une sensibilisation en région, en France et à l'étranger. En

1991, l'institution a orienté cette collection sur "l'architecture de demain" en rapprochant plus particulièrement l'art contemporain et la partie expérimentale de la discipline, à compter des années 1950. Ce patrimoine contient des fonds exceptionnels grâce à de nombreuses donations. Son inventaire met en évidence, fin 2021, au moins

430 artistes et architectes, et comprend quelque 1 200 maquettes d'architecture, 1 000 œuvres d'artistes et plus de 17 000 dessins. Dans ce domaine, ses réserves sont équivalentes à celle du Centre Pompidou à Paris ou encore du MoMA à New York.

D'une surface développée de 3 300 m<sup>2</sup>, le FRAC régional est installé sur l'ancien site des subsistances militaires d'Orléans, un ensemble de bâtiments en "U". Désaffecté par le ministère des Armées dans les années 1980. Les constructions ont trouvé un remploi culturel. Ainsi, entre 1999 et 2006, le lieu a accueilli la manifestation internationale ArchiLab. Entre-temps, cet ensemble a été choisi pour abriter le FRAC Centre – Val de Loire et, en 2006, a fait l'objet d'un concours d'architecture dont les enjeux portaient sur la réhabilitation muséographique des bâtiments et la mise en place d'un "signal urbain".





## Les Turbulences

Lauréate du concours, l'agence Jakob + MacFarlane a proposé pour le signal une architecture originale décomposée en trois excroissances de verre et d'acier dénommées les "Turbulences". Elles sont le produit d'un travail numérique de déformation de la trame du bâtiment existant, qualifiée par les créateurs de paramétrique pour la déformation et d'extrusion pour la trame. La structure légère et préfabriquée des excroissances, composée de tubes métalliques, a été intégralement conçue au moyen d'outils numériques. Cette charpente est recouverte d'éléments tous uniques, chacun d'entre eux étant produit au vu d'un dessin industriel élaboré et coté : panneaux extérieurs en aluminium pleins ou perforés, et intérieurs en bois. À l'origine, les Turbulences abritaient le pôle d'accueil du public qui distribuait les flux de visiteurs vers les espaces d'exposition, situés dans les bâtiments préexistants. Elles sont aujourd'hui également affectées aux expositions, à la tenue de conférences et d'ateliers. Ouverte sur le boulevard, la cour intérieure est traitée comme une piazza, un espace ouvert au public qui renforce l'attrait visuel des Turbulences. Le principe d'émergence retenu a été étendu au proche environnement puisque la cour est traitée avec des reliefs, incidemment utiles aux accès handicapés, et, dans un mouvement d'expansion, paraît s'étirer jusqu'à la voie.

Conçue par les artistes associés *Electronic Shadow*, une peau de lumière enveloppe les Turbulences grâce à une texture de diodes où fusionnent image, matière et information. Véritable signal urbain, elles font également fonction de repère lumineux au service des Orléanais et un témoin des possibles mutations de l'architecture à l'ère numérique.

## Les architectes

Dominique Jakob et Brendan MacFarlane développent une architecture d'expérimentation misant sur l'outil numérique et les techniques de production non standard pour définir de nouvelles modalités constructives. Chacun de leurs projets se fonde sur un principe analytique d'insertion dans le

contexte pour créer une véritable interférence avec le site d'intervention.

Dominique Jakob, née à Paris en 1966, et Brendan MacFarlane, né à Christchurch en Nouvelle-Zélande en 1961, travaillent d'abord en agence à Los Angeles, avant de créer la leur à Paris en 1994. Parmi leurs principales réalisations, citons, à Paris le Restaurant Georges au sixième étage du Centre Pompidou ou encore Docks en Seine (le palais de la mode), et à Lyon le Cube Orange. Leurs projets toujours novateurs ont été exposés à New York (MoMA), à Tokyo (Mori Art Museum), à Venise dans le cadre de la biennale, à Paris (Pavillon de l'Arsenal, Parc de la Villette) et bien sûr à Orléans.

## El Eco I de Mathias Goeritz

El Eco I est une sérigraphie (70 cm x 94 cm, voir figure) dont la composition individualise dix polygones et utilise cinq couleurs. Au centre elle met en valeur un quasi rectangle, ocre, qui attire le regard. Par un effet de perspective on peut le percevoir comme le mur qui ferme un plaisant espace encadré par la forme noire, jusqu'à imaginer par exemple ledit espace possiblement investi par des danseurs. Cette impression est induite par l'aplat noir, en forme d'accent circonflexe, compris comme l'esquisse d'un toit dans un geste d'architecte bien habituel ou encore comme le saut d'un danseur étoile.

L'illustration montre que l'œuvre originale s'inscrit dans un format horizontal. Or, *in situ*, avec l'adjonction de deux bandes blanches, l'une au-dessus et l'autre en dessous, son agrandissement occupe le plan vertical d'un mur de l'intérieur des Turbulences, rendant ainsi presque toute la hauteur du mur. L'abstraction géométrique se prête bien à ce type d'adaptation qui offre une alternative à la simple pose d'une toile ou d'un cadre. Dès lors, on est comme baigné dans l'œuvre sans avoir besoin d'y entrer.

## Mathias Goeritz

Originaire d'Allemagne, Mathias Goeritz est né en 1915 à Dantzig

© François Laugnie - Collection Frac Centre-Val de Loire



El Eco I, 1970

(aujourd'hui Gdansk en Pologne). Il a obtenu un doctorat en philosophie et histoire de l'art à Berlin en 1937. Différents voyages en Europe et au Maroc l'ont imprégné dans sa jeunesse du langage des avant-gardes, de Dada au surréalisme et de l'expressionnisme au Bauhaus. En 1949, il s'est installé définitivement au Mexique. Entre sculpture et architecture, peinture et poésie, philosophie et critique des courants esthétiques de son temps, Goeritz a fondé l'expérience esthétique sur la nécessité d'une "élévation spirituelle". Celle-ci sera théorisée en 1952 par le "Manifeste de l'architecture émotionnelle", l'un des premiers textes appelant à un dépassement fondamental des préceptes fonctionnalistes. Puisant dans l'histoire, dans la culture, mais aussi dans l'échelle même du territoire mexicain d'inépuisables sources d'inspiration et d'expérimentation, l'artiste a démontré par ses dessins, ses sculptures et ses constructions architecturales un grand pouvoir d'invention. Mathias Goeritz est décédé à Mexico en 1990.

\*\*\*

Le 17 novembre prochain, le forum de la topographie invite à un déplacement près d'Orléans, précisément au lycée Gaudier-Brezeska de Saint-Jean-de-Braye. Le rendez-vous donne ainsi aux participants une opportunité de voir *in situ* une construction "Art et géométrie" originale, des murs peints qui valorisent des sérigraphies de Mathias Goeritz et les créations de bien d'autres artistes, autant d'œuvres qui participent désormais à l'identité de la capitale de la région Centre – Val de Loire. ●

## ■ 100 ans de géodésie française (1919-2019) Fascicule 2

### Contribution française aux modèles globaux de potentiel terrestre

Georges BALMINO

L'auteur passe en revue l'histoire des contributions de la France à la détermination des modèles globaux du champ de gravité de la Terre. Cette histoire se confond sur nombre de points avec celle du GRGS soutenu en particulier par le CNES, avec celle de ses acteurs également. Les activités se sont articulées depuis le début, et jusqu'à aujourd'hui avec les missions dédiées, autour d'une coopération franco-allemande qui n'a jamais faibli et qui reste un exemple de rapprochement exceptionnel entre des équipes européennes, même si l'évolution historique et économique a entraîné une certaine prédominance des collègues outre-Rhin dans ce domaine. Notre discipline est en plein essor : la qualité des modèles actuels, leur utilisation dans presque toutes les géosciences – en particulier les variations temporelles de gravité qui reflètent tous les transferts de masse aux échelles planétaire à régionale, font qu'ils sont incontournables, maintenant et à long terme, pour comprendre des phénomènes aux implications parfois dramatiques.

Les efforts consentis ont été importants, que ce soit dans les satellites (lancés par le CNES), les instruments conçus et fournis pour différentes missions spatiales (accéléromètres de l'ONERA en particulier), campagnes d'observation, ou le développement et le maintien de grands logiciels, ainsi que les traitements de données en augmentation exponentielle. L'auteur constate que les ressources humaines attribuées sont malheureusement insuffisantes au vu de la croissance de l'activité. Le vieillissement d'une frange des acteurs, les experts, fait craindre, s'ils ne sont pas remplacés et renforcés rapidement, une perte de cette tranche de savoir en France.

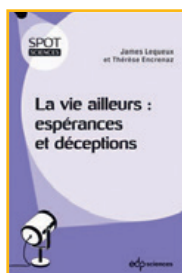
Si c'est inéluctable, l'auteur espère que ceci soit compensé à l'intérieur de l'Europe, mais souhaite que l'on retrouve une position à la hauteur de celle qui fut la nôtre au siècle dernier.

L'auteur appartient au Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale CNES et OMP - Toulouse.

► COLLECTION DU BUREAU DES LONGITUDES  
VOLUME 10

<https://site.bdlg.fr> - 48 pages

ISBN : 978-2-491688-08-0



## ■ La vie ailleurs : espoirs et déceptions spot sciences histoire

James LEQUEUX et Thérèse ENCRENAZ

Depuis la plus haute Antiquité, l'homme s'est demandé s'il y a de la vie ailleurs que sur la Terre. La possibilité d'existence d'autres mondes habités que le nôtre a suscité de tout temps des controverses passionnées, qui font l'objet de ce livre ; encore aujourd'hui, la fièvre s'empare des médias dès que le moindre indice peut laisser croire à une telle possibilité. Même d'éminents scientifiques comme Christian Huygens, Edmond Halley, William Herschell, Giovanni Schiaparelli ou maintenant Avi Loeb se sont livrés à des spéculations parfois insensées sur la vie dans l'Univers. La découverte controversée de phosphine sur Vénus et de méthane sur Mars alimente encore aujourd'hui de telles spéculations. L'existence de milliards de planètes autour des étoiles de notre Voie lactée ouvre d'immenses perspectives, mais il nous faudra encore attendre bien des années avant de savoir si elles sont peuplées ou si nous sommes seuls dans l'Univers. Finalement, notre bonne vieille Terre pourrait bien être un lieu unique pour la vie, que nous devons impérativement préserver.

James LEQUEUX a dirigé la Station de Radioastronomie de Nançay et l'Observatoire de Marseille, et a été pendant quinze ans rédacteur en chef de la revue européenne *Astronomy & Astrophysics*. Aujourd'hui, il se consacre principalement à l'histoire de l'astronomie et de la physique, sur laquelle il a écrit de nombreux ouvrages.

Thérèse ENCRENAZ est spécialiste de l'étude des planètes. Elle a dirigé le département de Recherche spatiale de l'Observatoire de Paris, puis a été vice-présidente du Conseil scientifique de l'Observatoire. Elle est l'auteure de nombreux livres spécialisés et d'ouvrages de vulgarisation, dont plusieurs avec James Lequeux.

► EDP SCIENCES

17 € - 151 pages

ISBN : 978-2-7598-2641-4



## ■ Fictions européennes Littérature et créations Revue ESPACE(S)

Alors que l'Union européenne est à l'honneur en France, les éditions de l'Observatoire de l'Espace vous proposent de découvrir *Fictions européennes*. Ce hors-série de la revue *Espace(s)*, édité en 2008 lors de la précédente présidence française de l'UE, prend pour thèmes l'aventure spatiale, l'imaginaire qu'elle engendre, et la notion d'Union.

Trente écrivains européens ont participé à cette édition spéciale, dont Colette Nys-Mazure (Belgique), Christos Chrysopoulos (Grèce), Lidia Jorge (Portugal) ou Boris Pahor (Slovénie). *Fictions européennes* est un recueil polyphonique où la pluralité des points de vue résonne avec les questionnements contemporains auxquels fait face l'UE.

Édités en version originale et dans leur traduction française, les textes de ces auteurs témoignent des spécificités de chaque langue, de chaque culture, tout en étant accessibles au public francophone. Ce hors-série, premier panorama européen d'une littérature inspirée par l'Espace, fait ainsi surgir les contours d'une culture commune de l'aventure spatiale.

► ÉDITIONS DE L'OBSERVATOIRE  
DE L'ESPACE DU CNES  
22 € - 424 PAGES  
ISBN : 978-2-85440-007-6

## ■ L'univers en 300 cartes, images satellite et infographies

Collectif

Un livre de référence pour tous les passionnés d'astronomie.

Conçu par un collectif d'auteurs scientifiques spécialistes de l'astrophysique, en collaboration avec la prestigieuse *Libreria Geografica*, ce livre est un outil de référence indispensable pour comprendre les mystères de l'Univers.





Le livre est structuré en trois sections distinctes. **Les infographies** : 25 planches infographiques thématiques en format double page constituées avec des représentations dynamiques de l'Univers à partir des bases de données spatiales les plus récentes. Parmi les thématiques abordées : le *Big Bang* et la naissance de l'Univers, le système solaire avec la taille et les distances des corps célestes, planisphères de la lune et de mars avec données géologiques, les exoplanètes, la Voie lactée, les étoiles, les galaxies, les trous noirs et les mystères de l'Univers.

**Les images satellite** : 200 photographies spectaculaires prises depuis les télescopes et les sondes spatiales de toutes dernières missions de la NASA, avec des images en très haute définition montrant les planètes, les comètes et météorites, les astéroïdes, et les galaxies avec des prises de vues rares de nébuleuses, supernovas, trous noirs et amas ouverts.

**Les cartes** : 76 cartes de toutes les constellations du ciel dont une vingtaine en grand format double page. Pour chaque constellation la carte indique la localisation dans l'espace ainsi que la magnitude stellaire. Galaxies, radiogalaxies, amas ouverts et globulaires, nébuleuses à émission et les confins des constellations sont également répertoriés sur les cartes.

► **GLÉNAT**  
39,95 € - 320 pages  
ISBN : 978-2-34-405028-6

## ■ Vélo !

**Sport, ville, nature, culture et aventure**  
**Stéphane DUGAST**

Le vélo fait partie intégrante de notre quotidien. Plus qu'un simple moyen de transport ou qu'une discipline sportive, le vélo incarne un état d'esprit conjuguant effort, bien-être, santé et nature. Comme l'équilibre du cycliste repose sur sa direction et son mouvement, c'est bien dans le mouvement que Stéphane Dugast nous raconte la saga du vélo, entre sport, ville nature, culture et aventure. Le livre s'ouvre sur un entretien avec Bernard Hinault.



Chacun s'est construit au fil de sa vie, des expériences et des souvenirs à deux-roues. Objet chéri et aujourd'hui incontournable de notre quotidien, le vélo est certainement l'une des plus belles inventions de l'humanité et à présent... le moyen de transport le plus utilisé au monde ! Encore appelé bicyclette, "biclou" ou "petite reine", le vélo se dévoile et se redécouvre ici en images, à la croisée des mondes du sport, de la technique, de l'industrie, de la mobilité du voyage, de l'écologie, de la mode et de la culture. Nourri par un texte riche et foisonnant, des clichés inédits et des archives rares, cet album nous raconte cette étonnante saga "Vélo !, en train de s'écrire depuis deux siècles, nous éclairant également sur toutes ses différentes pratiques, les lieux et personnages emblématiques ou acteurs clés de son histoire..."

Un récit inédit, qui nous emporte ici et là-bas, d'hier à aujourd'hui, de la ville à la campagne, seul, en famille ou entre amis, dans une véritable aventure à partager... en roues libres !

En amoureux du vélo et en adepte d'aventures en tous genres, Stéphane Dugast, auteur-explorateur et réalisateur, nous partage ses connaissances, et le bonheur de rouler sur deux roues. Le vélo, il l'utilise pour se déplacer, faire de l'activité physique ou découvrir les ailleurs. Durant l'été 2020, il a même traversé la France en diagonale à vélo, de Dunkerque à Hendaye. Une odyssée de 2 200 kilomètres en deux-roues pour aller à la rencontre de ce que notre pays a finalement de plus beau : ses habitants et ses territoires. Une façon de pédaler en toute liberté pour vivre une aventure à la fois humaine, sportive et écologique.

► **GLÉNAT**  
35,50 € - 192 PAGES  
ISBN : 978-2-344-04981-5

Répertoire des annonceurs - n° 170	
ISPRS	2 <sup>e</sup> de couv.
LEICA GEOSYSTEMS	2
REIS STOLZEL	9
RIEGL	60
TSF	26

## LE COIN DES REVUES



■ **IGN magazine n° 104**  
**Territoires : le changement d'échelle de la donnée**  
► [abonnement@ign.fr](mailto:abonnement@ign.fr)

■ **CNES mag n° 90**  
**60 ans pour le futur**

Depuis 60 ans, la France observe la Terre depuis l'espace, seuls les satellites offrent une vision objective des dynamiques complexes qui s'y jouent. Ces précieuses données, le CNES les stocke, les traite puis les met au service de tous.

► <https://cnes.fr/fr/cnesmag-90>

■ **Cartes & géomatique**  
**cartorisk : risques naturels ou anthropiques en carte**  
CFC - Revue du Comité français de cartographie N° 245-246

■ **Le Figaro histoire n° 60**  
Février-mars 2022

Entretien avec Jean-Robert Pitte  
**Géographie pour quoi faire ?**

Président de la Société de géographie, qui vient de fêter son bicentenaire, voir en page 12 de ce numéro, Jean-Robert Pitte rappelle l'utilité de sa discipline pour notre monde et éclaire son rapport à l'histoire.



■ **Géomètre n° 2197**  
**Mesurer la matière, contourner l'impossible**

Par Laurent Polidori et Michel Kasser  
"Si la mesure est inhérente au géomètre-expert qui maîtrise parfaitement l'espace bâti et les surfaces planes, il faut rester pragmatique pour ce qui est de mesurer certains éléments naturels. L'erreur existe, l'important étant de le savoir et de la corriger."

# Comment rester sans frontières dans un monde où elles se ferment et où les règles pour entrer et sortir demandent une expertise ?

■ Claire GALPIN

*Billet (checked) passeport (checked) argent (checked). C'était le minimum pour partir à la découverte du monde ! Maintenant, ne pas oublier le masque, le passe sanitaire, la passe vaccinal, le booster/dose de rappel, le test PCR, les formulaires pour traverser les frontières, pour entrer et pour sortir. Pour les chanceux avec le bon extrait de naissance, voyager est devenu un casse-tête de frontières.*

La frontière est inhérente à notre planète, à notre environnement. Entre ciel, mer et terre, tout crée de la frontière. Elle est plus ou moins poreuse, perméable. Cependant, toute culture a ses limites qui sont des instruments de régulation et de délimitation des systèmes socioterritoriaux (Geoconfluence, 2021). Une frontière est un espace d'épaisseur variable. Elle peut être une ligne imaginaire ou à un espace particulier de la géographie ou de la géomorphologie. Ce faisant elle sépare deux territoires, notamment lorsqu'il s'agit d'états souverains. Autrefois floues, aux confins d'un territoire, les frontières comme son enveloppe externe d'un territoire ont pris une forme et une définition plus précise grâce à la cartographie et à l'évolution de la technologie géospatiale. Objet de traités constatant les accords territoriaux entre états voisins, les frontières sont conventionnelles. Elles peuvent être des lieux de tension, de confrontation (l'actualité nous le rappelle chaque jour), mais elles peuvent également être poreuses permettant aux communautés locales, nomades ou pastorales de s'en affranchir créant ainsi des interfaces qui peuvent générer des compétitions sur les ressources ou des échanges riches entre les communautés.

Si les créateurs de Géomètres Sans Frontières ont choisi l'engagement



en adhérant aux idéaux du sans frontières de la fin des années 80, de nombreux adhérents et actifs ont soutenu cet engagement depuis plus de 30 ans et nous les en remercions. Aujourd'hui, les actions de GSF ne sont plus légion : Topo Sans Frontières (TSF) vole de ses propres ailes (et c'est tant mieux), la pandémie a mis à mal les échanges et la coopération avec les géomètres du bout de notre vieux monde. Face à la désaffection des engagements, GSF doit se poser de nombreuses questions : peut-on encore et comment aider tous ces professionnels aguerris ou en devenir ? Comment choisir et appuyer les petites initiatives locales de développement dont les objectifs sont de sortir des communautés de la pauvreté et de la violence, d'intégrer les plus faibles et démunis, de permettre de rester au pays ou de donner un avenir à la jeunesse ? Comment réactiver cette envie et cette volonté d'agir là où le besoin s'en fait sentir ? Comment dépasser ou déplacer ces frontières mentales qui semblent limiter notre engagement une fois l'aventure terminée ?

Je veux remercier l'AFT qui depuis de nombreuses années nous offre une page qui permet de communiquer sur les actions de GSF : collecter des appareils topographiques, ouvrir le monde à de jeunes gens pour qui c'était une

première expérience en dehors des frontières de la France puis appuyer administrativement les nombreuses équipes de TSF lors de l'internationalisation des stages de l'ESGT... et pour les plus récentes, financer les études d'ingénieur à l'ESGT pour un jeune homme du Burundi, coopérer avec une association du Congo Kinshasa qui œuvre pour la réintégration de femmes soldats.

En tant que présidente de GSF, je ne peux que faire le constat du peu d'activités. Je n'ai que des réponses très partielles aux questions posées. Une association c'est un groupe de personnes qui poursuit des objectifs communs en donnant un peu de son énergie sous quelque forme que ce soit. GSF est une petite association, vraisemblablement trop petite pour rencontrer les buts ambitieux contenus dans son nom et faire face à l'universalisme que semble demander le sans frontières. Mais si tous ceux et toutes celles qui veulent apporter leur grain de sable à l'édifice le font en envoyant un message à l'adresse de GSF, ce sera un signal que les limites de l'envie coïncident encore avec celles de l'engagement.

GSF aura 33 ans fin mars 2022. C'est un bel âge. Souhaitons-nous un bel anniversaire ! ●

► contact :  
geometresansfrontiere@gmail.com

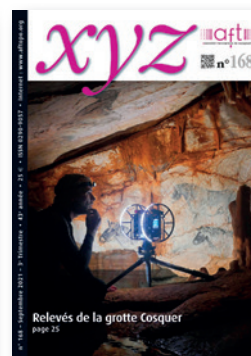




## Bulletin d'adhésion 2022

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 ..... 10 € + 45 € = **55 €**
- ☐ cadre ou personne morale, et pour tout règlement émanant d'une administration ou d'une entreprise ..... 45 € + 45€ = **90 €**

**Ces tarifs comprennent l'abonnement à la revue XYZ à demi-tarif soit 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](http://www.aftopo.org) (seulement depuis un pays à monnaie transférable)
- ☐ je désire recevoir un reçu après règlement

### ☐ Je fais un don à l'AFT, avec reçu fiscal, d'un montant de : \_\_\_\_\_ €

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

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

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

Code postal : [ ][ ][ ][ ][ ][ ] Ville : \_\_\_\_\_ Pays : \_\_\_\_\_

Tél. : [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ] Portable : [ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ][ ]

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

Date      /      /      Signature



# XXIV<sup>TH</sup>

## CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING

# 2022

Imaging today  
foreseeing tomorrow

# ISPRS NICE

FRANCE

**NICE, FRANCE**  
6 - 11 JUNE 2022

***Don't miss the major meeting of  
the Geospatial Community***

[www.isprs2022-nice.com](http://www.isprs2022-nice.com)

PLATINUM

**AIRBUS**

GOLD

ThalesAlenia  
Space



SILVER

HEXAGON



BRONZE

PIX4D



Agisoft



VEXCEL