

xyz

aft
association française
de topographie
 n°146



Couplage de mesures
GPS et inertielles pour
de la navigation pédestre
dans les bâtiments
page 27

**La mission géodésique IGN
en Équateur 1974-1976**
page 15

Service Location 3D

Leica Geosystems



Vous souhaitez entrer dans l'ère de la 3D ?

Développez vos projets 3D en profitant du meilleur service de location.

Leica Geosystems s'engage à vous accompagner en vous proposant des solutions de location 3D personnalisées à votre projet :

- Votre matériel : un parc d'instruments de location composé des dernières technologies de numérisation 3D.
- Vos logiciels de traitement : une gamme complète Leica Geosystems pour exploiter vos nuages de points dans votre plateforme habituelle (AutoCAD, Revit, PDMS...) ou dans des logiciels de traitement dédiés.
- Votre accompagnement : un spécialiste 3D vous accompagne dans la maîtrise de votre chaîne et des formations sont proposées aux nouveaux utilisateurs dans un package « clés en mains ».

Demande d'infos : info.france@leica-geosystems.fr

SOMMAIRE

Directeur des publications

Tania Landes
Maître de conférences
INSA de Strasbourg

Directeur des publications adjoint

Bernard Flacelière
Ingénieur topographe

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière

Rédacteur en chef adjoint

Michel Trouillet
Ingénieur topographe

Comité de Rédaction

André Bailly
Ingénieur géomètre ETP
Françoise Duquenne
Ingénieur général des Ponts honoraire
Stéphane Durand
Enseignant-chercheur
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg
Michel Kasser
Professeur des universités
Tania Landes

Jean-Pierre Maillard
Géomètre-expert foncier

Laurent Morel

Enseignant-chercheur

Emmanuel Natchitz

Ingénieur géomètre

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothee Picard

ALBEDIA IMPRIMERIES

Zone industrielle de Lescudilliers
26 rue Gutenberg
BP 90449 - 15004 Aurillac Cedex
Tél. 04 71 63 44 60
Fax 04 71 64 09 09



Dépôt légal

1^{er} trimestre 2016 ISSN 0290-9057

Tirage de ce numéro : 1 600 ex

Abonnement annuel

France : 83 €

Étranger (dont CEE) : 86 €

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

FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048

Le numéro : 23 €

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.

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

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres)

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

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

Editorial 3

InfoTopo

> Les informations de la profession 5

La vie des associations

> Le groupe de travail GNSS au sein du Comité
de Coordination pour le Géopositionnement
et la Navigation est dirigé par Pierre Briole
Claude BOUCHER 11

La vie des écoles

> L'école de Lorient : formation aux travaux sous-
marins et activités portuaires
Jean-Pierre MAILLARD 12

La vie de la profession

> La flotte de l'IGN reste dans l'Oise
Jean-Pierre MAILLARD 14

Topo vécue

> La mission géodésique IGN en Équateur 1974-1976
Jean-Yves LAIGRE - Bernard ROND - Patrice VALLEE
Denys MARCEL - Michel LE PAPE
Françoise DUQUENNE 15

Topographie

> Couplage de mesures GNSS et inertielles pour de
la navigation pédestre dans les bâtiments
Sylvain CHABLE - Valérie RENAUDIN 27

LASERGRAMMÉTRIE

1^{er} prix de l'AFT ex aequo

> Qualification de la précision de données topogra-
phiques issues d'acquisitions par méthode scanner
laser dynamique ferroporté
Audrey JACQUIN 33

1^{er} prix de l'AFT ex aequo

> Lasergrammétrie sous-marine : Quel apport pour
les métrologies et l'Exploration Production ?
Yann MOREL 40

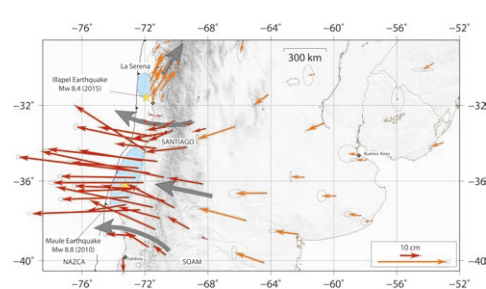


> Numérisation 3D du site
orné de la Grotta Scritta
à Olmeta-di-Capocorso
(Haute-Corse)
Pierre GRUSSENMEYER -
Albane BURENS
Samuel GUILLEMIN
Emmanuel ALBY -
Franck ALLEGRI
SIMONETTI - Marie-Laurence
MARCHETTI 45

Photogrammétrie

> Auscultation de l'état de surface de revêtements
routiers par photogrammétrie automatisée
Gildas ALLAZ - Michel KASSER 52

Géodésie



> Le GPS dévoile les liens entre les grands séismes
de subduction au Chili
Emilie KLEIN 59

Histoire



> Le canal de Marseille quand Massilia
dépasse Rome
Paul COURBON 66

Art et géométrie

> Isabelle de Gouyon Matignon
et Charles Bézic dans la lumière
Jean-Pierre MAILLARD 72

Ouvrages

André Bailly 74

GSF

> La gestion foncière dans le Projet
d'aménagement hydro-agricole du Bahr Linia
(PAHA-BL) au Tchad (partie 1 : le contexte)
Claire GALPIN 76

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 75.

PROCHAIN XYZ - n° 147
Un jeune géodésien au Groenland en 1950

Evoluez Selon Vos Besoins



SP60

La solution GNSS polyvalente et évolutive

Avez-vous déjà rêvé d'un produit qui évolue avec vos besoins ? Le Spectra Precision SP60 est un récepteur GNSS de nouvelle génération qui offre un niveau élevé de flexibilité et permet de couvrir n'importe quelle exigence de levé: post-traitement, base/mobile UHF, Trimble RTX L-band ou IP, connexion NTRIP ou base/mobile Bluetooth. Combinant Z-Blade, technologie unique de suivi et de traitement des signaux GNSS, et la fonctionnalité L-band pour le service par satellite CenterPoint® RTX, le récepteur SP60 fournit, partout dans le monde, les mesures les plus fiables et la précision la plus élevée possible quelles que soient les conditions.

SP60 : Tout Simplement Polyvalent

Caractéristiques

- Récepteur polyvalent et évolutif
- Nouvelle puce 6G 240 canaux
- Technologie GNSS Z-Blade
- Compatible CenterPoint RTX
- Module Radio UHF interne
- Bluetooth longue portée
- Protection antivol

CenterPoint[®]
RTX



Visitez www.spectraprecision.com pour plus d'informations ou pour trouver votre distributeur le plus proche.

AMERIQUE: +1-720-587-4700 or 888-477-7516 (Gratuit aux E.U.)
EUROPE, MOYEN ORIENT ET AFRIQUE: +33-(0)2-28-09-38-00
ASIE PACIFIQUE: +65-6348-2212

CONTACTEZ DÈS
AUJOURD'HUI VOTRE
DISTRIBUTEUR
SPECTRA PRECISION





Comment faisons-nous avant ?

Le 26 janvier, le *2nd Space Operation Squadron* à la base de l'Air Force de Schriever au Colorado, a été alerté par des utilisateurs éprouvant des problèmes de synchronisation GPS. Une enquête plus poussée révèle un problème dans le logiciel au sol. Cette anomalie est survenue lorsque le plus ancien des satellites, le SVN 23, a été retiré de la constellation.

La datation des signaux de la bande L est impactée et par conséquent le temps diffusé par les récepteurs GPS. Le système était décalé de 13 microsecondes pendant environ 6 heures. Les utilisateurs mondiaux ont été aux prises avec des problèmes de synchronisation GPS pendant ces heures là.

La presse spécialisée aux États-Unis prend plaisir à tacler les décisions des autorités d'interrompre le fonctionnement sur leur sol du eLoran en 2010, ce qui a entraîné l'arrêt du eLoran européen fin 2015. Le eLoran était un système terrestre de positionnement décamétrique basse fréquence totalement indépendant du GPS, utilisé surtout en appoint de navigation maritime, terrestre ou aérienne. Après des années d'attente, ce puissant système résistant au brouillage a regagné l'appui du gouvernement des États-Unis et sera probablement rétabli.

Au vu de ces déboires, et pour assurer l'intégrité de ces mesures, le topographe a maintenant la chance, en addition au GPS de disposer de plusieurs constellations telles que GLONASS, GALILEO, BEIDOU, qui avec les autres constellations à venir composent le GNSS. Surtout dans le domaine de la navigation en temps réel, il est ardemment souhaité que les constructeurs de récepteurs et de logiciels nous offrent un contrôle qualité instantané et efficace.

Finalement, le GNSS montre qu'il n'est pas fiable à 100 % et ceci me rappelle l'ère de l'avant GNSS quand on étalonnait, réglait, vérifiait nos systèmes de mensurations. On utilisait aussi des procédures et méthodes idoines pour éliminer les erreurs.

J'ai même écrit dans des spécifications ou des règles métiers relatives au positionnement, d'une compagnie pétrolière, quelque chose comme : ...pour tout matériel de mesure utilisé pour du positionnement on devra a) l'étalonner pour éliminer les erreurs systématiques, b) le tester pour vérifier si les erreurs accidentelles observées sont conformes à celles déclarées par le fabricant, c) la redondance dans les mesures (multiplicité des mesures et variété des méthodes) était aussi une stricte obligation.

Je crains que les jeunes générations élevées au tout GNSS presse-bouton, qui affiche directement des coordonnées, n'en soient guère conscientes.

Passons maintenant à la une de ce nouveau numéro de votre revue : l'AFT et XYZ ont le plaisir de s'associer à la commémoration en 2016 des missions géodésiques française en Équateur appelée officiellement par les organisateurs la TROISIÈME MISSION GÉODÉSIQUE (annoncée dans le XYZ 145 page 8). Après celle de La Condamine, Godin, Bouguer, Jussieu et leurs collaborateurs arrivés à Quito en 1736 il y a 280 ans [Florence Trystram (1979) *Le procès des étoiles*], il y eut celle du lieutenant d'artillerie Georges Perrier et de ses officiers du Service géographique des armées de 1901 à 1906 [Martina Schiavon (2006) <http://histoiremesure.revues.org/1746>].

Pourtant une mission géodésique française a été oubliée. Ainsi nous devrions commémorer cette année la quatrième mission française et non la troisième. Cette aventure oubliée racontée dans ce numéro est la mission géodésique française de l'Institut géographique national dans l'Orient de l'Équateur, de 1974 à 1976. Je remercie ici les auteurs, participants à cette épopée, de nous avoir confié leurs souvenirs professionnels et personnels. Embarquez avec nous dans cette magnifique aventure, mais c'est sur qu'avec du GNSS, c'eût été plus simple !

Bernard Flacelière



FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2016



L'Association française de topographie (AFT) et le groupe scolaire le Caousou accueillent



le 12^e Forum de la topographie

le mercredi 6 avril 2016 de 9 h 00 à 17 h 30

42 Avenue Camille Pujol à Toulouse

TOPOGRAPHIE ET BIM

PROGRAMME

9 h 00 - 9 h 30	Ouverture du Forum et café de bienvenue	13 h 00 - 14 h 00	Pause repas
9 h 30 - 9 h 45	Accueil des participants par Olivier SUREL (directeur du Caousou) et Françoise DUQUENNE (présidente de l'AFT)	14 h 00 - 14 h 30	Café sur les stands
9 h 45 - 10 h 30	"Le BIM, une (r)évolution pour le géomètre expert" Bertrand CLERGEOT (géomètre expert, Sarl XMGE)	14 h 30 - 15 h 15	La parole aux exposants
10 h 30 - 11 h 15	Visite des stands	15 h 15 - 16 h 00	"Le BIM pour les projets d'infrastructures : présentation du projet MINnD" Charles-Édouard TOLMER (doctorant chargé d'Etudes-Egis International)
11 h 15 - 12 h 00	"Du nuage de points à la maquette numérique" Hélène MACHER (doctorante, Insa de Strasbourg)	16 h 00 - 16 h 15	La parole aux exposants
12 h 00 - 12 h 15	La parole aux exposants	16 h 15 - 17 h 00	Visite des stands
12 h 15 - 12 h 45	Remise du prix de l'AFT 2015	17 h 00 - 17 h 30	Cocktail - Fin du Forum



Exposants inscrits au forum à la date du 26/02/16

INSCRIPTION GRATUITE ET OBLIGATOIRE PAR COURRIER OU PAR MAIL LE PLUS TOT POSSIBLE

M/Mme Nom : _____ Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____

Tél. : _____ Portable : _____

Courriel : _____

- ☐ cochez cette case si vous ne voulez pas que votre adresse courriel soit communiquée aux participants du Forum
- ☐ J'envoie un chèque de 15 € à l'ordre de l'AFT pour régler le repas (avant le 15 mars).

Date / / Signature

Retourner ce bulletin à l'Association française de topographie

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

Participants : forum@aftopo.org – Exposants : communication@aftopo.org

■ Accostage maritime : le projet R&D de Cadden labellisé par le pôle mer Bretagne atlantique

Le projet BANANAS (*Berthing And Navigation Aid System*) vise à développer un système portable et autonome d'aide à la navigation et à l'accostage des navires à fort tonnage tels que pétrolier, méthanier, charbonnier, paquebot, etc. Cet équipement intégrera des capacités de positionnement précis, en lien avec des stations GPS/GNSS différentielles à terre, et des capacités d'exploitation en temps réel des données d'environnement (météo, courant, marée, bathymétrie, etc.). L'objectif du système est de simplifier et sécuriser la tâche des pilotes des ports. L'étude portera sur la prise en compte du squat (phénomène hydrodynamique qui se traduit par un enfoncement des navires pouvant atteindre deux mètres) qui n'a, jusqu'à présent, jamais été intégré aux systèmes d'aide aux pilotes. L'étude portera aussi sur la fiabilité et la précision centimétrique des données de positionnement. Le système offrira en effet deux sources de corrections RTK simultanées (*Real Time Kinematic / Centimétrique en Temps Réel*), via le réseau GSM et via des stations UHF privées.

L'équipe projet réunit quatre acteurs (l'entreprise nantaise Cadden, l'école Centrale de Nantes, l'Institut d'Électronique et de Télécommunications et le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire). Le projet BANANAS a été labellisé par le pôle de compétitivité le 18 septembre. Son coût est estimé à 663 k€. Après un démarrage en janvier et la réalisation d'un prototype un an après, la commercialisation par Cadden d'un produit fini devrait avoir lieu dès fin 2016. Le marché potentiel mondial est estimé à quelque 3 000 unités.

► Pour tout renseignement : <http://www.cadden.fr/>

■ Eos Positioning Systems, Inc.

Cette société est spécialisée dans la conception et la fabrication de récepteur GNSS de haute précision pour la cartographie SIG et l'arpentage. La série de récepteur Arrow supportant la réception multi-constellation (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS), possédant une connectivité Bluetooth propose une précision submétrique et centimétrique en temps réel, une batterie longue durée et la compatibilité avec tous les appareils mobiles que vous utilisez dans le domaine, y compris iOS, Android et Windows.

► Pour tout renseignement : <http://www.eos-gnss.com/fr/>

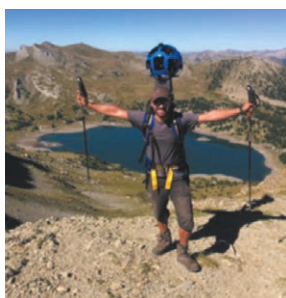
■ Création d'un nouveau diplôme Géomatique et métiers de l'eau

L'ENGEES et l'ENSG ont mis en commun leur expertise spécifique pour proposer un diplôme d'établissement en "Géomatique et Métiers de l'eau" (GEME). Cette formation à double compétence est principalement destinée aux professionnels du monde francophone.

Aujourd'hui, la puissance des outils modernes tels que les systèmes d'information géographique (SIG) ou la télédétection permet plus facilement de croiser et d'analyser des informations cartographiques pour faciliter la prise de décision en aménagement du territoire. Appliqués aux métiers de l'eau, ils sont d'une aide précieuse pour cartographier des cours d'eau, déterminer une zone de protection des captages, modéliser un risque d'inondation, gérer un réseau d'eau potable ou encore rechercher une source d'eau. C'est pour former les experts de demain, capables de comprendre les SIG et d'optimiser leur utilisation au service de l'eau dans la ville, qu'a été créé le diplôme d'établissement GEME. Cette formation destinée aux professionnels est centrée sur les besoins et les contraintes des métiers de l'eau, d'une durée de 150 heures elle se déroulera sur une période de 3 mois, à raison de 12 heures par semaine environ. Totalement à distance grâce au e-learning, les professionnels pourront s'organiser à leur convenance, en France comme ailleurs.

► Pour tout renseignement : <https://engees.unistra.fr/formations/diplmesdtablissement/geme/>
fanny.genest@engees.unistra.fr - 03 88 24 82 14

■ Le Mercantour sur Google Street View !



Pour la première fois, Google a travaillé avec un Parc national français pour mettre en valeur ses richesses paysagères, ses villages de caractère et les plus beaux sentiers de randonnée du territoire ! Tout au long de la saison estivale, des agents du Parc ont parcouru 19 itinéraires de randonnée avec la dernière technologie Street View appelée le Trekker : un sac à dos surmonté d'une sphère composée d'appareils photo combinés à un GPS, mis à disposition par la firme américaine. Un attirail complexe qui permet aujourd'hui, après traitement et assemblage des images, de découvrir sur Google

Maps des itinéraires à forte valeur patrimoniale. Les itinéraires proposés permettent de découvrir et de préparer ses randonnées depuis son ordinateur !

► Pour tout renseignement : <http://www.mercantour.eu/index.php/actualites/actualites-recentes/1144-le-mercantour-sur-google-street-view>

■ Esri lance un Mooc gratuit et ouvert à tous les technophiles, développeurs ou non : Comment créer sa propre application en y intégrant l'intelligence géographique ?

L'objectif est de donner les clés pour créer une application native efficace et personnalisée qui réponde au mieux à ses besoins, compatible iOS et Android et cela, sans toucher une ligne de code.

Le programme abordera 7 thématiques au cours des 4 semaines de formation :

1. L'intelligence géographique : une meilleure lecture de la donnée
2. La communauté : renforcer son potentiel à travers l'intelligence géographique
3. Cartographier ses idées : raconter une histoire en configurant une application
4. Web Apps : identifier les différentes utilisations du Web AppBuilder d'Esri
5. AppStudio d'Esri : créer des Apps



natives géographiques qui peuvent être partagées sur iOS et Android

6. Open data pour ArcGIS : une application qui donne de la valeur à l'open data
7. Personnalisation : puiser dans les API et SDK pour intégrer la dimension géographique à son application

► Inscriptions directement sur le site d'Esri : www.esri.com/mooc/diy-geo-apps

NDLR : Mooc, Massive Open Online Courses ou formation en ligne massive ouverte à tous.



L'IGN et IGN FI nous informent

■ L'IGN invente la machine à remonter le temps

L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) lance un nouveau service en ligne gratuit et accessible à tous. Simple d'utilisation, ce géo service unique permet de visualiser et comparer en quelques clics des cartes et photos aériennes anciennes et actuelles issues d'un vaste catalogue de données de référence : carte de Cassini (18^e siècle), carte de l'état-major (1825-1866), carte IGN au 1:50 000 (1950), carte IGN SCAN Express, photos aériennes historiques (1950-1965) et actuelles. Véritable invitation à voyager dans le temps et dans l'espace, ce site constitue un formidable outil d'observation de l'évolution des territoires.



Ce site permet à chacun d'observer l'évolution de sa région, de sa ville ou de son village. Il constitue également un outil d'observation de l'évolution des ressources naturelles (mouvements du littoral et de la forêt...) de l'urbanisation du territoire (extension des zones urbaines, villes nouvelles, grands aménagements industriels...), des nouvelles voies de communication (réseau routier, ferré, maritime, aéroportuaire...).

► Pour tout renseignement : <https://remonterletemps.ign.fr>

■ Le groupe FIT prend le contrôle d'IGN FI



L'IGN et Groupe FIT ont finalisé un accord de cession et de partenariat qui formalise le rachat d'une partie des parts détenues par l'IGN. Groupe FIT devient actionnaire majoritaire d'IGN France International (IGN FI), la filiale d'IGN à l'export.

► <http://www.ignfi.fr/fr/content/accord-de-partenariat-ign-et-groupe-fit>

■ L'IGN et Oslandia s'associent pour faire progresser la 3D OpenSource

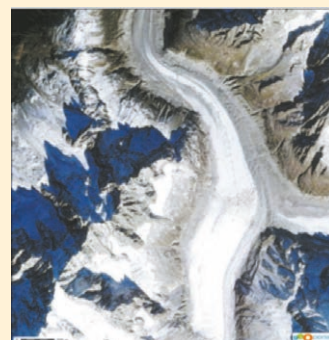
Les deux partenaires vont œuvrer conjointement à l'industrialisation d'iTowns, logiciel de visualisation 3D basé sur les dernières technologies Web qui permet à l'utilisateur de naviguer librement dans un environnement aérien ou terrestre géoréférencé. L'IGN a décidé de publier en OpenSource, d'ici la fin de l'année, le cœur technologique de cette plate-forme logicielle créée dans ses laboratoires de recherche. Les laboratoires de l'IGN, MATIS, LOEMI et COGIT travaillent depuis plusieurs années à la captation, au traitement et à la visualisation de données géospatiales 3D, notamment au travers du projet iTowns, logiciel de visualisation 3D développé par le MATIS depuis 2007. La plate-forme iTowns diffuse des vues 3D immersives, des nuages de points (provenant par exemple de capteurs LIDAR), ou encore des modèles 3D structurés. Les applications de cet outil sont nombreuses. L'exploitation des données d'un véhicule de captation 3D mobile tel que le véhicule STEREOPOLE de l'IGN en est un premier usage. La mise à disposition d'environnements 3D pour des visites virtuelles de lieux complexes, souterrains ou hostiles, en est un autre. Oslandia, qui mène également une forte activité R&D sur les problématiques SIG 3D Open Source, va mettre œuvre son savoir-faire pour contribuer à l'industrialisation de la solution iTowns, afin de la rendre pleinement opérationnelle et suffisamment générique pour être diffusable dans un contexte Open Source.

► Pour tout renseignement : <http://www.oslandia.com/>
http://www.ign.fr/institut/sites/all/files/cp_itownsign_oslandia.pdf

■ La France dans l'œil des satellites SPOT

Pour la seconde année consécutive, l'IGN publie sur geoportail.gouv.fr une couverture annuelle complète de la France métropolitaine, à partir d'images satellitaires SPOT à 1,50 m de résolution, traitée par IGN Espace à Toulouse. Cette réalisation 2015 a été rendue possible grâce à l'engagement de six partenaires publics : le CNES, l'IRD, le CIRAD, le CNRS, l'IRSTEA et l'IGN, complété par des ressources du projet GEOSUD, dans le cadre du pôle thématique surfaces continentales Theia2. Pour ce millésime 2015, les zones de montagne ont été couvertes avec un minimum d'enneigement et les parties nuageuses, sur certaines images, ont été très largement réduites. Les disparités de couleurs que l'on constate en affichant l'ensemble du territoire métropolitain sont principalement liées à l'évolution du paysage agricole d'avril à octobre.

► Pour tout renseignement : <http://www.ign.fr/>



■ L'IGN et Le Groupe La Poste remportent le Prix de l'innovation du Salon des maires pour le service Guichet Adresse destiné aux mairies

Le 27 janvier 2016, le jury des Prix de l'innovation du Salon des maires et des collectivités locales a décerné le Prix de l'innovation dans la catégorie Institutionnel/Finances/Services au service Guichet Adresse développé conjointement par l'IGN et Le Groupe La Poste, lors d'une cérémonie au Sénat. Destiné aux mairies, le Guichet Adresse, guichet unique en accès web, apporte aux communes un ensemble complet de services facilitant la gestion de l'adressage, en l'occurrence la création, la dénomination, la numérotation et la géolocalisation des voies de leurs administrés. Le Guichet Adresse propose également un service de préparation des dossiers adresses en vue d'appuyer le délibéré du Conseil municipal, ainsi qu'une bibliothèque de documents d'information sur l'usage et les fonctionnalités du Guichet Adresse à destination des administrés et des acteurs institutionnels. Développé par l'IGN et Le Groupe La Poste, le Guichet Adresse est un service relié à la Base Adresse Nationale (BAN) constituée conjointement en 2014 par la mission Etalab du secrétariat général pour la modernisation de l'action publique (SGMAP), l'IGN, Le Groupe La Poste et OpenStreetMap France.

► Pour tout renseignement : Le Guichet Adresse sur : <https://adresse.data>

■ Réforme DT-DICT : un nouvel arrêté pour l'AIPR

Le journal officiel du 29 décembre 2015 a annoncé la parution de l'arrêté du 22 décembre 2015 relatif au contrôle des compétences des personnes intervenant dans les travaux à proximité des réseaux. L'entrée en vigueur fut immédiate : le 1^{er} janvier 2016 ! Depuis la mise en application de la réglementation anti endommagement des réseaux, de nombreuses étapes sont venues agrémenter le paysage réglementaire des DT-DICT et la dernière concerne la validation de la compétence des intervenants dans le cadre des travaux à proximité des réseaux.

Elle se répartit de deux manières :

- la mise en place d'une certification pour les prestations de détection de réseaux et/ou de géoréférencement ;
- la validation de compétences des personnels Autorisés à Intervenir à Proximité des Réseaux (AIPR).

L'arrêté du 22 décembre vient encadrer l'examen par questionnaire à choix multiples (QCM) et tient compte d'une expérimentation dans 24 centres d'examen. Il prévoit :

- des mesures de simplification visant à limiter au strict nécessaire les catégories de personnes soumises à l'obligation d'AIPR ;
- des mesures de transition permettant aux personnes disposant de titres, diplômes, certificats de qualification professionnelle ou CACES ne prenant pas encore compte l'intervention à proximité de réseau d'obtenir l'AIPR ;
- de reporter la date d'application des obligations relatives aux compétences au 1^{er} janvier 2018, laissant ainsi une année de plus aux différents acteurs pour s'organiser.

■ Drones civils "L'effort réglementaire sur les drones civils ne doit pas s'arrêter là"

À l'heure où la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) met à jour la réglementation sur les drones civils en France, Emmanuel de Maistre, président de Redbird, estime que la nouvelle version de la réglementation ne suffit pas aujourd'hui pour permettre un développement ambitieux des professionnels et utilisateurs de drones civils.

"Cette évolution présente des avancées encourageantes. Les nouveaux textes apportent quelques clarifications et élargissent certains scénarii d'emploi. Cependant, l'industrie du drone civil a un impérieux besoin d'avancées réglementaires plus rapides et plus audacieuses pour soutenir son développement. L'industrie du drone civil se développe à une vitesse considérable à l'échelle mondiale et d'autres pays se positionnent également, en particulier les États-Unis. Il est crucial de mettre en place un système plus souple et plus sûr permettant le dépôt et le suivi de plans de vols de manière automatique et dématérialisée, ainsi que le retour d'expérience. Les technologies sont disponibles et peuvent être déployées à court terme, si les autorités le décident. C'est désormais un véritable enjeu, alors que les États-Unis, qui ont dépassé la France avec 2 500 opérateurs de drones enregistrés, se préparent à dévoiler un système réglementaire visant une intégration durable et complète des drones dans l'espace aérien", déclare Emmanuel de Maistre. Redbird rappelle que depuis 2012, la DGAC autorise en France l'utilisation de drones civils à des fins commerciales selon différents scénarii de vol, en vue ou hors de la vue du télépilote. Si les nouveaux textes modifient en particulier les distances de vols en scénario S1 (passant de 100 mètres à 200 mètres) et le poids des drones en scénario S3 (passant de 4 kg à 8 kg), il s'agit "d'évolutions relativement marginales", estime Emmanuel de Maistre. Certaines procédures administratives sont simplifiées, mais des flous subsistent, en particulier sur la définition des zones peuplées. Le scénario S4 (vol hors vue) n'est pas significativement modifié alors qu'il représente une opportunité économique majeure. Une lenteur législative impactera l'évolution du marché français des drones civils. À terme, la France pourrait se faire devancer durablement par d'autres pays et ainsi perdre sa longueur d'avance. L'EASA travaille également sur une réglementation à l'échelle européenne, qui pourra supplanter la réglementation française si cette dernière n'a pas clairement prouvé son efficacité.

► Pour tout renseignement : <http://wellcom.fr/presse/redbird/2016/01/effort-reglementaire-drones-civils-pas-arreter/>

■ La société Drone Agricole s'appuie sur la solution ArcGIS d'Esri pour favoriser le développement de l'agriculture de précision

Cette solution est une manière efficace de gérer ses parcelles en prenant en compte leurs données agro-éco-climatique et pédologiques, et ainsi agir de manière ultra ciblée. DRONE AGRICOLE s'appuie sur les technologies de Systèmes d'Information Géographique (SIG) d'Esri pour compléter son offre d'imagerie drone et générer des outils d'analyses détaillés. Le rôle de l'intelligence géographique est une dimension fondamentale dans l'interprétation de l'environnement agricole. Il ne s'agit pas d'apporter des solutions "standardisées" aux exploitants, mais au contraire de les faire émerger de façon personnalisée. En effet, comment comprendre les imageries drone sans lecture cartographique ? Le SIG permet alors d'identifier très simplement les informations géolocalisées pour y apporter des actions spécifiques.

► Pour tout renseignement : <http://www.droneagricole.fr/>

■ Novadem, le spécialiste du drone "made in france" affiche des ambitions fortes

Novadem, spécialisé dans l'inspection rapprochée d'ouvrages d'art, l'analyse et le relevé de terrain ainsi que la défense-sécurité, vient de remporter un appel d'offres du Ministère de l'Intérieur pour équiper la Gendarmerie avec des drones pour des missions d'appui aux opérations de maintien de l'ordre. Novadem conçoit et réalise depuis 2006 des drones destinés aux marchés civils et militaires en développant sa propre technologie drone, du calculateur embarqué jusqu'aux hélices, sans oublier les logiciels experts.

Dans le civil, les drones U130 et U90 répondent aux besoins d'inspection rapprochée de grands ouvrages (viaducs, ponts, barrages) et de relevés de terrain (géomètres-experts, exploitants de carrière). Dans le militaire, le NX110m vient limiter l'exposition au risque sur un théâtre d'opération. Le NX110 est quant à lui exploité par les sapeurs-pompiers et la Gendarmerie Nationale, dans

le cadre de missions telles que la recherche de personnes après inondation, la surveillance de reprise de feu de forêt ou l'évaluation de l'étendue d'une pollution aux hydrocarbures en bord de mer. L'internationalisation des activités de la société est la prochaine étape de l'aventure. La pertinence des objectifs stratégiques de la société a conduit BPI France à lui accorder un prêt innovation d'un montant de 1 million d'euros pour relever avec succès l'ensemble de ces défis. À l'horizon 2020, Novadem espère avoir vendu plus de 600 machines supplémentaires en France et à l'étranger et embauché près d'une trentaine de nouveaux collaborateurs. Novadem est soutenue par le Ministère de la Recherche ainsi que les acteurs régionaux et nationaux de l'innovation pour ses projets de recherche et développement.

► Pour tout renseignement : <http://www.novadem.com/>



■ La "vision radar" d'Airbus Defence and Space équipera les deux nouveaux satellites Sentinel-1

Airbus Defence and Space, numéro deux mondial de l'industrie spatiale, a signé un contrat d'un montant de 143 millions d'euros avec Thales Alenia Space portant sur deux instruments radar spatiaux supplémentaires au profit du programme Copernicus. Sentinel-1C et Sentinel-1D embarqueront le sous-système d'antenne radar à synthèse d'ouverture (SAR), dérivé quasiment intégralement de celui qui équipe les actuels satellites Sentinel-1. Les nouveaux satellites et leurs instruments garantiront la continuité des données radar offertes par le programme Copernicus sur les 15 prochaines années. Lancé le 3 avril 2014, Sentinel-1A sera rejoint par son jumeau Sentinel-1B en avril 2016.

La constellation couvrira alors chaque semaine les masses terrestres du monde entier, ainsi que, chaque jour, la banquise, les régions côtières et les voies maritimes d'Europe.

► Pour tout renseignement : <http://www.space-airbusds.com/fr/centre-presse/>

■ Airbus Defence and Space va réaliser deux nouveaux satellites Sentinel pour l'ESA



Airbus Defence and Space a signé avec l'Agence spatiale européenne (ESA) un contrat portant sur la fourniture de deux satellites optiques d'observation de la Terre supplémentaires destinés au programme européen Copernicus. Baptisés Sentinel-2C et Sentinel-2D, ces deux nouveaux satellites optiques rejoindront le système Sentinel-2 d'observation de la Terre

depuis l'Espace. Ils auront pour mission de surveiller l'Environnement et les terres émergées du Globe et poursuivront à partir de 2021 les mesures effectuées par les deux premiers satellites Sentinel-2.

Les satellites Sentinel-2 fournissent des images optiques, dans la gamme du visible et de l'infrarouge proche du spectre électromagnétique, dans 13 bandes spectrales d'une résolution de 10, 20 ou 60 m, à raison d'une fauchée unique de 290 km de large. Ils apportent une contribution au programme Copernicus en collectant des données d'observation de la Terre dans de nombreux domaines : utilisation des sols, qualité de l'eau, agriculture et sylviculture, gestion des terres, catastrophes naturelles et opérations de secours humanitaire. L'observation de l'environnement dans les régions côtières fait également partie de ces activités, de même que la surveillance des glaciers, de la glace et de la neige.

Lancé le 23 juin 2015 à bord d'un lanceur Vega depuis le port spatial de Kourou, en Guyane, Sentinel-2A, le premier satellite de cette constellation, est désormais entré en service opérationnel. A ce jour, plus de 7 000 produits sont disponibles en téléchargement, représentant plus de 35 téraoctets de données. Parallèlement, les préparations de Sentinel-2B sont en cours en vue de son lancement en fin d'année.

► Pour tout renseignement : <http://www.space-airbusds.com/fr/>

■ 3^e colloque national Métiers et compétences en géomatique : de la recherche à la formation professionnelle

Avec 125 inscrits, la manifestation organisée par le pôle "Formation-Recherche" de l'AFIGÉO dans les locaux d'Agro Paris Tech le 9 décembre 2015 a été un succès riche de débats ouverts et constructifs. La participation de chercheurs, de formateurs, de prescripteurs et de recruteurs des secteurs public et privé, a permis de cerner des actions prioritaires à conduire par l'AFIGÉO au service de la valorisation de ces nouvelles compétences.

Le colloque a fait le point sur l'évolution technologique et l'impact socio-économique de la géomatique, en France et à l'international. Les conséquences sur l'offre de formation et l'accès aux formations continues ont été mesurées au regard des nouvelles réglementations. Enfin l'adaptation des compétences des géomaticiens au long de leur vie professionnelle a été évoquée.

En 2016 le pôle s'emploiera :

- dans le domaine de la recherche à formaliser autant que possible un "Observatoire de la recherche en géomatique",
- dans celui de la formation professionnelle à s'assurer que les

formations en géomatique sont bien en adéquation avec les évolutions techniques et réglementaires et qu'elles ouvrent bien sur un emploi. La sensibilisation des entreprises sur l'appréhension et l'analyse des besoins, le développement et la gestion de compétences complètera l'action du pôle "Formation-recherche". Il est également envisagé d'effectuer une veille réglementaire (dispositifs de financement, droits et devoirs, procédures d'agrément) ainsi que de suivi des dispositifs de certification.

Sur ce point, le pôle envisage de suivre les dernières étapes de la mise en place du certificat de qualification professionnelle (CQP) géomaticien.



Dans la réflexion relative aux outils utiles pour mener à bien ces actions, en lien avec GeoRezo, le blog géomaticien envisagé sera un bon support pour appuyer ces chantiers et porter leur avancement à la connaissance de la communauté géomatique.

D'autres points et chantiers ont été évoqués : animation des associations d'anciens élèves, suivi de la problématique des concours de la Fonction publique territoriale, enquêtes métiers et compétences (analyses complémentaires à faire sur les données de la dernière enquête, projet de nouvelle enquête), etc.

SOLUTION : RÉCRÉATION MATHÉMATICO-GÉODÉSIQUE : LE CHIMBORAZO



Le Chimborazo



L'Everest

La rédaction de XYZ n'a pas eu le plaisir de recevoir de réponses à la récréation mathématico-géodésique posée dans le numéro précédent, XYZ 145. Ce peut-il que la géométrie de l'ellipsoïde n'attire plus le lecteur ?

Voici donc la réponse à la question : quel sommet, de l'Everest ou du Chimborazo est le plus éloigné du centre de la Terre ?

Le sommet du Chimborazo est plus éloigné du centre de la Terre que le sommet de l'Everest.

Pour le vérifier nous allons calculer les coordonnées cartésiennes géocentriques (X,Y,Z) de ces deux sommets puis leur distance (D) respective au centre de la Terre.

Rappelons les formules :

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$X = (v + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$Y = (v + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$Z = (v(1 - e^2) + h) \sin \varphi$$

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$h = H + N$$

λ : longitude

φ : latitude

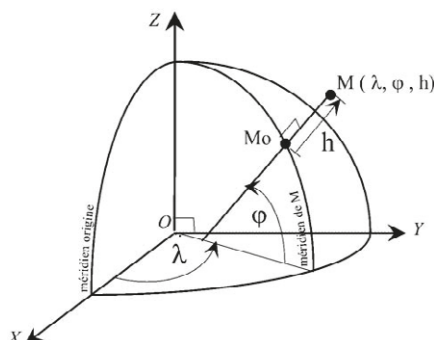
h : hauteur au dessus de l'ellipsoïde

H : altitude

N : hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde

a : demi - grand axe de l'ellipsoïde

e : excentricité de l'ellipsoïde



Selon les valeurs données aux numéro XYZ 145 :

	λ (°)	φ (°)	H (m)	N_{EGM2008} (m)	h (m)
Everest	86.92077	27.9808	8848	28	8876
Chimborazo	282.1825	-1.46917	6267	26	6293

Ellipsoïde GRS80 : $a = 6378137$ m, $b = 6356752,414...$ m, $e^2 = 0,006\,694\,380\,022\,90$

sommet	X (m)	Y (m)	Z (m)	D (m)
Everest	303 205	5 636 407	2 978 791	6 382 336
Chimborazo	1 346 843	-6 238 620	-162 489	6 384 416

Conclusion : le sommet du Chimborazo est plus éloigné du centre de la Terre que le sommet de l'Everest d'environ 2 080 mètres.

■ La troisième mission géodésique française mesure le sommet du Chimborazo

Communiqué de presse du 5 février 2016, par l'Ambassade de France en Équateur, l'IRD, l'Instituto Geográfico Militar, la ville de Riobamba. Version française par la rédaction de XYZ.

Dans le cadre de la troisième mission géodésique et pour commémorer des missions franco-équatoriennes qui ont commencé il y a 280 ans avec l'arrivée de Charles-Marie de la Condamine, l'Institut de recherche pour le développement (IRD), l'Institut géographique militaire (IGM), l'Institut de géophysique de l'École polytechnique nationale (IG-EPN), ont réussi à atteindre le sommet du Chimborazo le matin du 5 février 2016 à 7 h 40, pour une mesure de haute précision par satellite pour déterminer la distance entre le centre de la terre et le sommet du Chimborazo. L'équipe, en compagnie de professionnels guides de haute montagne dirigés par l'alpiniste Iván Vallejo, a enregistré des données pendant 2 heures au sommet du Chimborazo qui seront étudiées conjointement par les chercheurs français et les équatoriens et les résultats seront diffusés au mois de mars à la communauté internationale scientifique et civile.

Cette expédition a été organisée en coopération avec l'Ambassade de France en Équateur, la ville de Riobamba. Cet événement est documenté par le magazine Ñaň.

Les événements commémoratifs de la coopération scientifique entre la France et l'Équateur continueront par plusieurs réunions organisées par l'équipe impliquée dans l'expédition du Chimborazo et par d'autres institutions telles que la Fondation des musées de Quito, le Collège de la Condamine, l'Alliance française et ce dans les villes de Quito, Cuenca et Riobamba de mars jusqu'à la fin de 2016.



© Juan Sebastián Rodríguez,
cortoisie du magazine Ñaň.

■ Spécial Île-de-France

L'institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France (IAU) met en ligne une application interactive "tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur les intercommunalités d'Île-de-France, sans jamais..."

Depuis plus de dix ans l'observatoire de l'intercommunalité a permis de connaître les évolutions de la carte et des compétences intercommunales au travers de fiches techniques en ligne. Depuis 2014, il suit tout particulièrement la mise en place du schéma régional de coopération intercommunale (SRCI) et des schémas départementaux de coopération intercommunale (SDCI) à travers les "Chroniques de l'interco".

Dans ce cadre, et concomitamment à l'installation officielle de la métropole du Grand Paris (MGP) et aux négociations du SRCI, l'IAU met en ligne une application cartographique interactive qui, pour la première fois, rassemble toutes les informations disponibles sur les structures intercommunales, leurs compétences, leur fiscalité, issues de la refonte de la carte intercommunale entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2016 notamment induites par la loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM).

Sept cartes permettent de tout savoir sur ce qui est en vigueur au 1^{er} janvier 2016 et comprendre qui fait quoi, le pôle gouvernance de l'IAU actualisant en temps réel les données de ces cartes en exploitant les multiples arrêtés, décisions et votes des collectivités territoriales.

► Pour tout renseignement : www.iau-idf.fr

L'équipomètre, 400 000 équipements franciliens géolocalisés pour comprendre les enjeux d'aménagement

L'Institut d'aménagement et d'urbanisme conçoit en permanence de nouveaux outils pour améliorer la compréhension des territoires, leur fonctionnement, leurs interactions et complémentarités et leurs évolutions. Il met aujourd'hui en ligne l'Équipomètre, carte interactive qui rend compte de la localisation et des niveaux d'équipements et de services des territoires et intercommunalités nouvellement créés, et des communes qui les composent, afin de comprendre leurs taux d'équipements. Les équipements répertoriés recouvrent 5 champs : éducation et formation, santé, commerces, équipements culture et loisirs, sport. Les équipements sont présentés sous forme d'infographie

dynamique permettant de comparer le taux d'équipement d'une commune dans son contexte intercommunal, métropolitain et régional. Les données permettent de mettre en perspective les atouts ou faiblesses des territoires, mais également leurs complémentarités. L'infographie permet de visualiser immédiatement les effets de différents scénarios d'organisation de territoires pour améliorer les offres, tout en gardant une vision globale. Cette carte sera enrichie avec des données sociodémographiques qui optimiseront l'usage de cet outil qui se veut une aide à la décision des élus franciliens et de toutes les personnes impliquées dans l'aménagement du territoire régional.

► L'application est consultable sur : <http://j.mp/equipometre>

Agenda des manifestations 2016

■ **Le 5 avril, 5^{ème} apéro géomatique et innovation** avec l'AFIGÉO à Toulouse <http://www.afigeo.asso.fr/>

■ **Le 6 avril, AFT Forum de la topographie**, au groupe scolaire le Caousou à Toulouse

■ **Les 6 et 7 avril, BIM World 2016**, La Défense, Paris. <http://www.bim-w.com/?lang=fr>

■ **Du 2 au 6 mai, FIG Working Week 2016, Christchurch**, Nouvelle-Zélande. Thème : Reconstruire après un désastre - <http://www.fig.net/fig2016/>

■ **Les 26 et 27 mai, Géom@TICE 16** à l'ENSG Champs-sur-Marne <http://www.ensg.eu/GeomaTICE-2016>

■ **Du 2 au 4 juin, Baltic Geodetic Congress et International Scientific and Technical Conference Geomatics** à Gdansk, Pologne <http://www.bgc.geomatyka.eu/2016/>

■ **Du 7 au 9 juin, GEOSummit 2016** à Berne, Suisse <http://www.geosummit.ch/geosummit-fr/index.php>

■ **Le 16 juin, Assemblée générale de l'AFT et élection de 6 membres du conseil**, à Saint-Mandé

■ **Les 16 et 17 juin, Innovative City 2016** à Nice <http://innovative-city.com/?lang=fr>

■ **Du 21 au 23 juin, 43^e congrès des géomètres-experts**, à Nancy, Thème : Dessinons le monde à l'ère numérique. <http://www.geometre-expert-nancy2016.fr/>

■ **Du 5 au 8 juillet, Conference Spatial Accuracy** à Montpellier <https://colloque.inra.fr/spatial-accuracy2016>

■ **Du 30 septembre au 2 octobre, Festival International de Géographie, FIG2016** à Saint-Dié-des-Vosges, pays invité : la Belgique <http://www.fig.saint-die-des-vosges.fr/>

■ **Du 11 au 13 octobre, InterGeo** à Hambourg, Allemagne - <http://www.intergeo.de/intergeo-en/index.php>

Olivier Reis

*Ingénieur géomètre-topographe
ENSAI Strasbourg - Diplômé de l'Institut
de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg*

9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES

Téléphone / télécopie : 03 87 98 57 04

Courriel : o.reis@infonie.fr

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

Reinhard Stölzel

*Ingénieur géomètre-topographe
Interprète diplômé de la Chambre
de commerce et d'industrie de Berlin*

Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN

Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60

Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61

Courriel : stoelzelr@aol.com

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

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service

L'ITRF2014, publié le 21 janvier, 2016

L'ITRF2014 est une nouvelle version du repère international de référence terrestre (ITRF) qui a été publiée le 21 janvier, 2016 et est disponible sur le site web : http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/.

Reconnu et cité par la résolution de l'Assemblée Générale des Nations Unies sur le repère de référence géodésique mondial pour le développement durable (<http://www.unggrf.org/>), l'ITRF est fondamental pour des applications en science de la Terre, en navigation satellitaire et en positionnement sur la surface de la Terre au sens large.

L'ITRF2014 est le résultat d'une combinaison de séries temporelles de positions de stations et des paramètres d'orientation de la Terre, fournis par les centres de combinaison des quatre techniques de géodésie spatiale (DORIS, GNSS, SLR et VLBI). Il comprend 1 499 stations, localisées dans 975 sites dont 10 % sont des sites co-localisés avec 2, 3 ou 4 instruments de mesure géodésiques, comme illustré par la Figure 1. En plus des solutions de géodésie spatiale, l'ITRF2014 fait usage de 239 vecteurs rattachements fournis en format d'échange de données SINEX, dont 80 % contiennent l'information de variance covariance complète.

La Terre est déformable, sujette à des multiples sollicitations géophysiques, comme le mouvement tectonique, les déformations co- et post-sismiques, les effets de surcharge générés par la pression atmosphérique, la circulation océanique et l'hydrologie terrestre. Alors qu'un modèle

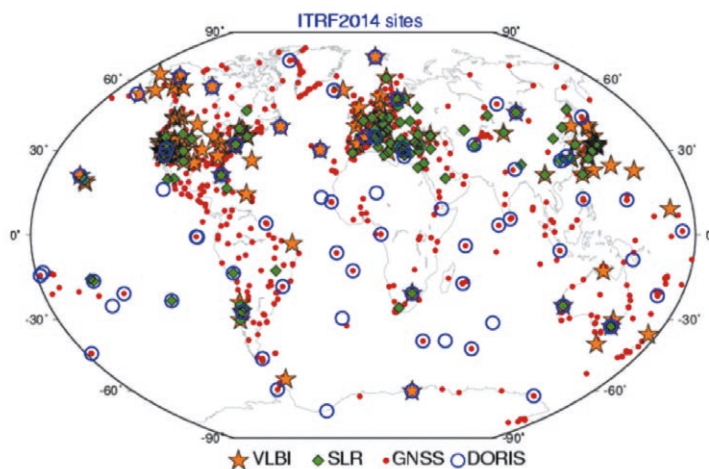


Figure 1. Répartition des 975 sites de l'ITRF2014.

de mouvement tectonique viendra bientôt compléter les produits de l'ITRF2014 déjà publiés, la modélisation des déformations post-sismiques et des effets de surcharge a été prise en compte lors de l'élaboration du référentiel terrestre. Deux innovations ont été implémentées à cette occasion, à savoir l'estimation des termes du mouvement saisonnier (annuel et semi-annuel) des stations, et des paramètres décrivant la déformation post-sismique des stations sujettes à des tremblements de Terre majeurs. ●

Zuheir Altamimi

Vice-président de l'International Association of Geodesy

LA VIE DES ASSOCIATIONS

■ Le groupe de travail GNSS au sein du Comité de Coordination pour le Géopositionnement et la Navigation est dirigé par Pierre Briole

Le Comité de Coordination pour le Géopositionnement et la Navigation (CCGN), qui regroupe actuellement les associations et organismes académiques suivants

- Académie de l'Air et de l'Espace (AAE)
- Académie de Marine
- Association Française de Topographie (AFT)
- Bureau des longitudes (Bdl)
- Comité National Français de Géodésie et Géophysique (CNFGG) Section 1 Géodésie
- Commission GeoPos du CNIG
- Institut Français de Navigation (IFN) et qui avait organisé avec succès en janvier 2015 une Journée sur GNSS et la science, a décidé de créer un groupe de travail "GNSS", au vu notamment

de l'intérêt particulier du sujet, tant au point de vue de l'évolution des systèmes que des domaines d'utilisations scientifiques, techniques ou sociétales. Les objectifs de ce groupe ainsi que sa composition resteront ouverts afin de s'adapter aux diverses évolutions. En plus des membres proposés par les organismes du CCGN, des personnes extérieures pourront être invitées. Quelques objectifs ont déjà été identifiés :

- organisation de futures Journées GNSS, faisant suite à la Journée de janvier 2015, *a priori* de manière bienale
- participation coordonnée à des réunions internationales, telles que les colloques Galileo de l'ESA

- rédaction de divers rapports et ouvrages, tels qu'un ouvrage qui ferait suite au livre Galileo rédigé conjointement par l'AAE, l'Académie de marine et le Bdl

- soutenir la coordination interministérielle pour Galileo

J'avais initié, au nom du Bureau des longitudes, la création de ce groupe GNSS au sein du comité, et à ce titre remercie vivement toutes les réactions positives. Mes diverses activités risquant de m'empêcher de consacrer un temps suffisant à l'animation de ce groupe, je remercie particulièrement Pierre Briole d'avoir accepté de prendre le relais pour cette tâche. ●

Claude Boucher

Président du Bureau des longitudes

L'école de Lorient : formation aux travaux sous-marins et activités portuaires

■ Jean-Pierre MAILLARD

L'association nationale pour la formation professionnelle des adultes (AFPA) et l'institut national de plongée professionnelle (INPP) ont choisi l'ancienne base de sous-marins de Lorient pour implanter un plateau technique scaphandrier "travaux publics" unique en Europe et l'ouvrir à quatre formations professionnelles inédites : travaux sous-marins, activité hyperbare, activités portuaires, drones marins et sous-marins.

Leurs représentations, respectivement d'Auray et de Marseille, sont engagées dans un partenariat inédit qui a trouvé son espace dans le bloc K3 de Lorient La Base avec l'ambition, outre les actions de formation, d'offrir des moyens d'expertise en travaux sous-marins et "activités portuaires" et de devenir un lieu de recherche et développement au service de l'économie maritime. Le bloc K3 appartient au domaine public maritime de la région Bretagne et, dans le cadre d'une concession, est exploité par Lorient agglomération. Après les avoir aménagés, Lorient agglomération loue les locaux aux organismes de formation.

Le syndicat national des entreprises de travaux immergés (SNETI) a évalué le besoin annuel des entreprises françaises à environ 40 scaphandriers titulaires du certificat d'aptitude à l'hyperbarie (CAH) mention A classe 2. Ces perspectives d'emploi sont vouées à un bel avenir compte tenu du développement du marché des énergies marines renouvelables (éolien et



hydrolien). Confronté à la concurrence internationale, l'objectif des porteurs du projet vise à préserver en France un savoir-faire "sous-marin" riche d'une histoire et d'une expérience de plusieurs décennies, dont la Comex est la figure emblématique. Pour répondre aux besoins hexagonaux les formations concernent jusqu'à 36 stagiaires chaque année. L'action du SNETI en concertation avec les professionnels, l'AFPA et les partenaires sociaux a conduit, en 2014, à la création d'un titre professionnel de scaphandrier travaux publics, le diplôme à atteindre pour les personnes en formation.

Le plateau technique sera également ouvert aux actions de formation continue (perfectionnement, sécurité, réglementation) et mis à la disposition des entreprises pour expérimenter ou former leurs personnels aux nouvelles techniques en particulier celles liées aux énergies marines renouvelables (EMR) en particulier pour obtenir des accréditations internationales.

La mobilité étant une caractéristique du métier de scaphandrier, l'AFPA et l'INPP organisent la complémentarité Méditerranée - Atlantique-Manche-Mer du Nord, étant respectivement membres du Pôle Mer Bretagne Atlantique et du

Pôle Mer Méditerranée. L'INPP, leader des formations de scaphandriers depuis plus de 30 ans, peut désormais disposer d'un plateau complémentaire pour travailler en fonction des marées, des

■ Un métier pour des chantiers hors-normes

Le scaphandrier intervient en milieu immergé sur des réseaux et des ouvrages pour des opérations de construction, d'entretien et de démolition. Il effectue les reconnaissances, les relevés et les contrôles préalables aux interventions. Il positionne l'ouvrage immergé, puis il procède aux opérations d'assemblage, de démontage, de découpe et de soudage. Le scaphandrier travaille en milieu subaquatique (ports, canaux, fleuves, lacs, bassins, barrages, centrales nucléaires, milieu maritime) et en communication permanente avec le personnel de surface pour sa sécurité et pour faire état de ses observations et de l'avancement des travaux. Un chantier scaphandrier est forcément composé de trois personnes qui, pour se conformer aux règles de sécurité, alternent les rôles : un scaphandrier chef d'opération hyperbare, un scaphandrier en plongée et un scaphandrier en sécurité, avec un temps de plongée limité à trois heures par jour.

courants, des conditions océaniques et dispose avec l'AFPA de l'expérience formation professionnelle industrie, maritime et travaux publics mise en œuvre depuis plus de 60 ans.

Avec la création du plateau technique scaphandrier, Lorient renoue un peu avec son passé marqué par la présence des sous-marins, l'occasion de se retourner sur la reconversion de la base de la Seconde Guerre mondiale installée par les Allemands sur la pointe de Keroman la plus grande de leurs cinq bases de U-boote sur la côte atlantique. Remployées par la marine française dès mai 1945, les installations ont abrité notamment une escadrille de sous-marins et une annexe de l'arsenal de Lorient. La fermeture du site décidée en 1992 par le ministère de la défense a été effective le 28 février 1997 avec le départ pour Toulon du dernier submersible. La nécessaire reconver-



Le scaphandrier de sécurité.

sion a permis la création du centre le plus important de la course au grand large qui partage sa notoriété avec celle des grands navigateurs tels Franck Cammas, Armel Le Cleac'h ou Lionel Lemonchois.

Ce projet a permis de fixer des entreprises nautiques et bien d'autres et de générer un pôle touristique avec la construction de la Cité de la voile Eric Tabarly et l'ouverture du musée du sous-marin. La forteresse, constituée de trois blockhaus, K1, K2, K3 qui ont nécessité de près d'1 million de m³ de béton armé, a résisté à tous les bombardements. Nul doute que le plateau technique scaphandrier avec ses salles de formation, ses bureaux, ses locaux techniques nécessaires à la formation (compresseur, caisson de décompression...), vestiaires et la darse dédiée aux exercices pratiques est protégé pour longtemps ! ●

Cercle Géo 2015, une belle réussite

L'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) a, une nouvelle fois, accueilli les représentants du monde de la topographie pour la 14^e édition du Cercle Géo. Comme chaque année, le premier vendredi de décembre est placé sous le signe de la bonne humeur et des échanges entre professionnels et étudiants. C'est donc avec beaucoup d'engouement que de nombreux exposants et géomètres-experts ont été reçus. L'association étudiante organisatrice a d'ailleurs pu compter sur le soutien de l'OGE et la présence de Jean François Dalbin, président du conseil supérieur.

La journée du Cercle Géo est le grand rendez-vous des étudiants puisque les nombreux thèmes choisis reflètent l'avenir de la profession et les débouchés des futurs ingénieurs géomètre-topographe. Les étudiants des trois écoles d'accès à la profession étaient conviés et une délégation de cinq étudiants suisses a même été reçue. Leica, Topcon, Geomesure, Geomedia, JSinfo, Positics, et Cartodrone ont notamment répondu



présent à cette manifestation avec la tenue d'un stand dans l'école. Des conférences sur "L'aménagement urbain et paysager des villes de demain", "le Géomètre-expert et les nouvelles technologies d'acquisition de la donnée" ou encore "le BIM et le cadastre 3D" se regroupaient autour d'un même thème fédérateur : l'évolu-

tion. Car si le but premier du Cercle Géo est bien de rassembler, d'échanger et de créer des liens entre employeurs et futurs employés, il permet également aux étudiants d'élargir leurs connaissances et de s'ouvrir l'esprit. ●

Damien HOUVET
Président du Cercle Géo

N. B. : comme depuis de nombreuses années, l'AFT a également tenu un stand sur le salon. L'association sait gré au Cercle Géo de son invitation. Avec l'AFIGEO et UIESGT, l'AFT fait connaître les actions collectives au service du partage des connaissances, de la solidarité intergénérationnelle de la profession et de la mise en œuvre d'initiatives d'intérêt général. Pour la communauté étudiante le Cercle Géo est aussi un jour à marquer d'une pierre blanche qui conduit les jeunes filles à porter une tenue sombre très habillée et les garçons à revêtir un costume noir, une façon d'honorer l'école et de rendre la soirée festive plus belle encore. Tous nos encouragements aux étudiants.

J.-P. M.

La flotte de l'IGN reste dans l'Oise

Depuis 1947 les activités aériennes de l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) sont attachées à la base militaire de Creil (Oise). Le service exploite quatre avions Beechcraft Super King Air 200 dont il assure la maintenance. Ces avions interviennent sur l'ensemble du territoire métropolitain pour acquérir des images et effectuer des levés altimétriques par laser aéroporté. Chaque année, un tiers de l'hexagone est couvert en imagerie de haute résolution et 30 000 km² de zones à enjeux bénéficient de nouvelles données altimétriques de grande précision. Le traitement des données acquises à des fins cartographiques, scientifiques et environnementales, est assuré sur le site grâce à des moyens importants de calcul et de stockage numériques. L'activité au service de la cartographie et de l'environnement est porteuse d'avenir car elle n'est pas réellement en concurrence ni avec les satellites ni avec les drones qui, respectivement, n'assurent pas la même précision et le même rayon d'action.



La maintenance d'un Beechcraft.

Or le 15 octobre 2014 le ministère de la défense a annoncé l'arrêt total de toute activité aéronautique sur la BA 110 de Creil, dès cette année. Dans sa recherche d'une solution de rechange l'IGN a finalement décidé lors du conseil d'administration du 14 décembre 2015, à l'unanimité des membres, la relocalisation de ses activités aériennes à l'aéroport de Beauvais-Tillé (Oise). En balance avec l'aéroport de Nîmes, le site de Beauvais-Tillé a été notamment choisi pour maintenir l'emploi dans le

département de l'Oise donnant ainsi à la cinquantaine d'agents en poste sur la base (ingénieurs, pilotes, photographes, techniciens et personnels aéronautiques) une possibilité de ne pas avoir à déménager.

L'implantation de la base de l'IGN sur l'aéroport de Beauvais-Tillé, nécessite la construction de 650 m² de bureaux et de plusieurs équipements notamment un hangar aéronautique de 1 500 m², associé à 450 m² d'ateliers, un parking avions de 1 500 m² et la mise aux normes du taxiway menant à la piste.

Le syndicat mixte de l'aéroport de Beauvais-Tillé (SMABT) s'est mobilisé pour accueillir l'antenne aéronautique de l'IGN. Dans le cadre d'une convention, le SMABT prend en charge les investissements, estimés à 6,9 M€, et assure la maîtrise d'ouvrage du projet. En revanche l'IGN s'oblige à payer un loyer de 300 K€/an pendant une durée de 15 ans. Le SMABT doit déléguer sa maîtrise d'ouvrage à la société d'économie mixte de l'Oise.

Même si la base aérienne de Creil continuera à recevoir des services interarmées, l'activité aéronautique cessera en août 2016. Dès lors le transfert des activités aériennes de l'IGN à Beauvais-Tillé se fera en plusieurs étapes entre l'été 2017 et la fin 2018. En attendant la livraison du hangar à l'été 2017, l'IGN stationnera provisoirement ses quatre avions et leur maintenance sur un autre aéroport, à Melun (Seine-et-Marne) ou à Pontoise (Val d'Oise).

Tous les acteurs locaux se réjouissent de la conclusion retenue par l'IGN, en premier le personnel concerné et ses représentants, la préfecture de l'Oise, les élus de la région et du département, la chambre de commerce et d'industrie de l'Oise et le SMABT sans oublier la société aéroportuaire de gestion et d'exploitation de Beauvais (SAGEB) bénéficiaire de la délégation de service public délivrée par le SMABT, satisfaite de ce développement d'activité. ●



L'aéroport de Beauvais-Tillé.

J.-P. M.

La mission géodésique IGN en Équateur 1974-1976

■ Jean-Yves LAIGRE - Bernard ROND - Patrice VALLÉE - Denys MARCEL - Michel LE PAPE - Françoise DUQUENNE

En 1974, l'IGN a remporté un appel d'offres international lancé par l'Institut Équatorien d'Électricité (INECEL) équivalent, pour la République d'Équateur, à ce qu'est EDF pour la France.

INECEL avait besoin de cartes à moyenne et grande échelle dans la région du pays située à l'est de la cordillère des Andes (l'"Oriente"), c'est-à-dire en Haute-Amazonie, pour exploiter le potentiel hydro-électrique de la région.



Figure 1. Carte de reconnaissance.

■ Le contrat

Les travaux prévus au contrat concernaient la réalisation d'une cartographie du versant oriental de la cordillère des Andes à partir de prises de vues aériennes au 1 : 60 000 sur 31 600 km² et au 1 : 35 000 sur 4 500 km². Cette cartographie devait s'appuyer sur un réseau géodésique nord sud sur 400 km, constitué de 24 points de base et de 50 points complémentaires et sur un réseau de nivellement d'environ 240 km (nivellement de précision sur les deux principales pistes de la zone : Zamora-Gualaquiza et Limon-Macas) permettant de réaliser les aérotriangulations nécessaires à la restitution photogrammétrique.

La détermination du réseau était programmée avec les méthodes disponibles les plus récentes, c'est-à-dire en utilisant des récepteurs JMR de signaux satellites du système TRANSIT, complétées par de la trilatération et des déterminations d'altitude par observations zénithales réciproques, chaque point devant être pré-balisé en vue de l'aérotriangulation des prises de vues au 1 : 60 000.

■ Les acteurs de la mission

Le chef de projet Henri Monge (IG¹) pilote la mission de Paris et Hervé Guichard (IG) est nommé chef de la mission en Équateur. Les équipes de terrain de géodésie sont constituées en deux groupes, qui se succéderont sur le terrain : le premier, d'octobre 1974 à avril 1975, dont le chef de groupe est Jean-Yves Laigre (ITGCE²), et les cinq opérateurs Jean-Marie Chaboussant (ITGCE), Jacques Ducamp (ITGCE), Michel Le Pape (ITGCE), Gérard Lutrot (TG³), Patrice Vallée (TG), le second de mars à juillet 1975 dont le chef de groupe est Henri Dréchou (ITGCE), et les opérateurs Bernard Rond (IG), Henri Duquenne (ITGCE), Marc Delpech (TG), Jacques Lacombe (TG) et Denys Marcel TG). Ils sont assistés par de nombreux aides locaux (*macheteros*) pour guider, défricher, porter le matériel, construire les abris.

(1) IG : Ingénieur géographe

(2) ITGCE : Ingénieur des travaux géographiques et cartographiques de l'État

(3) TG : Technicien supérieur géomètre



Figure 2. Les macheteros reprennent des forces.



Figure 3. Alouette III des FAE.



Figure 4. Point construit et pré-balisage.

La reconnaissance, le pré-balisage et le bornage s'avèrent des tâches difficiles dans cette région sur le flanc Est de la cordillère des Andes, où coulent avec violence les sources de l'Amazone, très accidentée (l'altitude du nord au sud varie de 4 000 m à 500 m en 60 km), et très humide, couverte de forêt vierge. L'hélicoptère fut le moyen d'accéder aux points, pas toujours en totale sécurité (cf. le témoignage de Jean-Yves Laigre ci-après), et la machette un instrument indispensable.

■ Les observations

Elles ne se passèrent pas comme prévu puisque les récepteurs JMR n'étant pas disponibles le chef de mission change les spécifications d'observations pour finalement aboutir à un réseau de base déterminé par trilatération, complétée par des mesures d'angles horizontaux. C'était la première fois que l'IGN expérimentait cette méthode sur un réseau complet, alors que comme le regrettait Hervé Guichard [2] cela aurait permis en France de remettre à l'échelle la NTF⁴.

Les mesures et le matériel :

- mesure de distances au telluromètre MRA2
- mesure de distances zénithales réciproques et simultanées au WILD T3 sur projecteur ou miroir Durand
- mesure d'angles horizontaux par couple (la visibilité étant aléatoire pour faire des tours d'horizon). Pour des visées longues jusqu'à 40 km, des

(4) NTF : Nouvelle Triangulation Française

projecteurs étaient utilisés comme cibles.

L'humidité fut la principale difficulté : pluie, brouillard, boue, humidité constante, ont été le lot des observateurs qui attendaient parfois plusieurs jours avant de pouvoir faire passer une visée. D'autant que les visées étaient longues (47 km entre le 115 et le 119) et les altitudes élevées (Cuco : 3 607 m, 115, Tapichalaca : 3 032 m, 122 : 2 975 m, 115 : 2 690 m).

Les conditions de vie étaient aussi très précaires (cf. les témoignages ci-après). Lorsque les observations étaient terminées, la récupération des opérateurs pouvait s'avérer difficile et s'effectuer au bout de plusieurs jours car l'hélicoptère n'arrivait pas à voler, compte-tenu de la météo ou de problèmes logistiques (kérosène de mauvaise qualité notamment). Il est exact, mais ce n'est pas dans le rapport officiel, que certains opérateurs, las d'attendre l'hélicoptère,

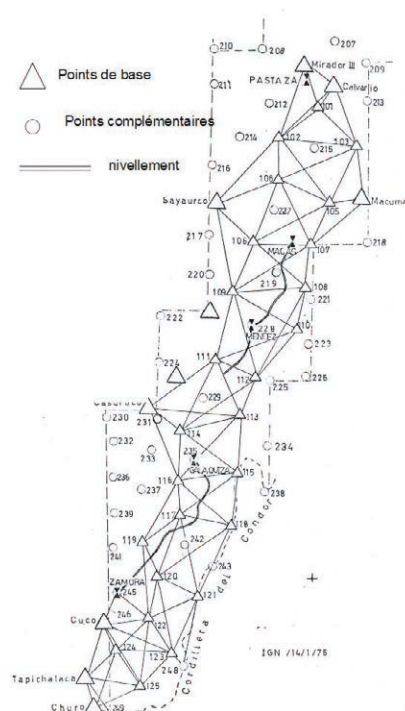


Figure 5. Schéma des observations.



Figure 6. Mesure d'angles au théodolite WILD T3 sur projecteurs.



© D. Marcel



Figure 7. Tellu MRA2 : mise en place d'une station (Rio Paute).

© M. Le Pape



Figure 8. La cuisine.

ont rejoint le camp de base à pied, au prix de multiples difficultés de progression dans cette forêt quasi-impénétrable. Pour le réseau complémentaire, ce sont des cheminements entre points de base qui ont été observés. Pour ces points qui étaient plus bas en altitude, les accès se faisaient non plus par hélicoptère, mais en marche à pied dans la forêt vierge à l'aide quelquefois de mulets pour transporter le matériel.

Le matériel a aussi beaucoup souffert de ces conditions et sur les 14 telluromètres utilisés, quatre seulement sont restés en état de marche à la fin de la mission.

© M. Le Pape



Figure 9. Récupération de Jean-Marie Chaboussant descendu à pied en trois jours de son point (122) au dessus de Zamora.

C'est le chef de mission lui-même qui a réalisé les observations astronomiques sur trois points de Laplace [Nord (207), milieu (219), Sud (507) du réseau] qui serviront ensuite dans les calculs à orienter le réseau mais aussi à établir un modèle expédié de géoïde astro, pour tenir compte de la déviation de la verticale.

■ Les calculs

Les calculs, ont été exécutés une première fois sur place par Hervé Guichard avec une petite calculatrice HP45 qui, certains s'en souviendront,

© D. Marcel

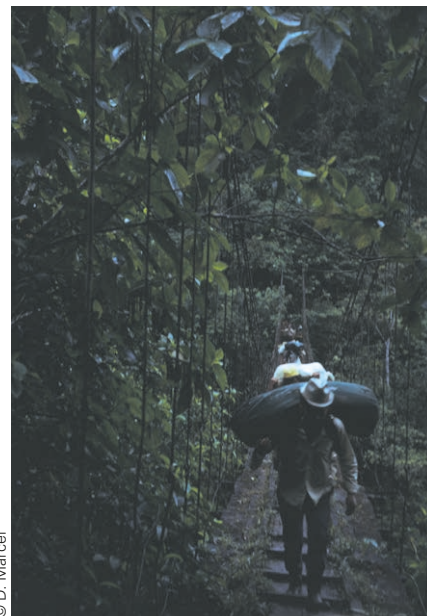


Figure 10. Polygonale du Rio Paute, 30 km en pleine forêt (19 porteurs indiens).

n'avait que 10 registres de mémoire et n'était pas programmable. Par la suite, au bureau des calculs à Saint-Mandé les calculs ont été réalisés sur ordinateur et avec un tout nouveau logiciel de compensation tridimensionnelle. Les observations distances, azimuts, zénithales ont été introduites sans réduction ni à la projection, ni à l'ellipsoïde, et la déviation de la verticale a été prise en compte. Le calcul de compensation a été fait en un seul bloc, ce qui n'aurait pas pu se faire avec la méthode classique. Les statistiques issues du calcul montrent, malgré les difficultés d'observation, que les résultats sont très satisfaisants :

Observations	nombre	emq
Visées angulaires	222	1''1
azimuts	3	0''2
distances	97	0,13 m

© H. Duquenne



Figure 12. Le matériel traverse le rio.



Figure 11. Transport du matériel.

© H. Duquenne



■ Le nivellement

Le groupe de nivellement est constitué de deux opérateurs [Michel Robin (TG), Michel Lansman (TG)], un secrétaire (Mr Gual) et accompagné d'une dizaine de *macheteros*. Il dispose de trois voitures tout terrain Toyota.

Le groupe exécute un nivellement de premier ordre sur des pistes non encore nivelées par l'IGM (*Instituto Geográfico Militar* ou IGN équatorien), de Zamora à Gualaquiza, de Limon à Macus, avec antenne sur Mendez, en suivant des pistes plus ou moins carrossables. La méthode de Merlin, classiquement utilisée en France, est opérée à l'aide de niveaux automatiques NI 2 de Zeiss et de mires IGN. Les repères de nivellement, implantés par l'IGM, se trouvaient à une distance maximale de 2 km les uns des autres. Les 240 km de nivellement à pied sont pratiqués entre octobre 1974 et janvier 1975, durée quasi identique à celle du nivellement en France, malgré des conditions difficiles pour les opérateurs dans cette humidité permanente.

■ Les autres travaux

Les prises de vues aériennes ont été exécutées avec l'avion Mystère Falcon 20 de l'IGN. On imagine la difficulté pour l'équipage qui réalisa ce travail dans de telles conditions météorologiques. Seule la couverture au 1 : 35 000 le long des rios Paute, Namangoza, Jatunyacu, Pastaz et Zamora a été réalisée. Les documents reproductibles de cartographie au 1/5 000^e ont pu être établis en procédant à une aérotriangulation, une restitution, et enfin les dessin, reproduction et tirage.

Le contrat n'a pas pu être entièrement honoré, et a été un gouffre financier pour l'IGN, cependant la cartographie livrée a permis à l'INECEL la mise en œuvre de la majorité de ses projets.

Témoignage de Jean-Yves Laigre : mission en terre inconnue

En août 1974, lorsque Henri Monge, chef de projet m'a proposé de partir en Équateur comme chef du détachement chargé de réaliser les travaux de géodésie, inutile de dire que je n'ai pas beaucoup hésité pour accepter. Il faut

dire que mes précédentes missions en Afrique pour la mesure du douzième parallèle puis aux Îles Marquises, aux Comores et en Libye pour de la stéréopréparation m'avaient déjà un peu aguerri. Peut-être aussi que d'autres géodésiens plus anciens avaient une petite idée de ce qui nous attendait et ne se sont pas précipités pour être candidats.

C'est donc la raison pour laquelle avec Jean-Marie Chaboussant et Jean-Claude Barré nous avons pris l'avion le 9 septembre 1974 en direction de Quito accompagnant René Mayer, directeur de l'IGN et André Decae, qui devaient signer le contrat qui allait nous lier à l'INECEL. Il était prévu que Jean-Claude Barré reste à Quito pour assurer le support logistique des équipes de terrain, géodésie et nivellement.

Il avait été décidé que la mission n'emporterait que le strict minimum de matériel au départ de Paris. Pour la période de reconnaissance et pré-balise, le tout tenait dans deux valises, jumelles et émetteurs-récepteurs radio. Tout le reste devait être acheté sur place, dont les fameux "lits Picots" chers à des générations d'opérateurs. Le problème était que les équatoriens étaient de petite taille ce qui n'était pas le cas de Jean-Marie, il a donc fallu les faire fabriquer sur mesure. Ce n'était que le début d'une longue suite de problèmes divers qui nous ont parfois coûté des explications laborieuses avec monsieur l'agent comptable de l'IGN. Par exemple comment lui expliquer que l'on a besoin d'acheter des fusils pour se défendre des bêtes sauvages genre puma qui se promènent dans la forêt.

■ Reconnaissance, pré-balise, bornage

Le seul document dont nous disposions au départ était une carte au 1 : 1 000 000 sur laquelle Henri Monge et Daniel Crémont avaient reporté les sommets les plus hauts qu'ils avaient pu apercevoir lors d'une reconnaissance par hélicoptère au mois d'août, un des rares jours où il faisait grand beau sur l'Oriente.

Le premier chantier était l'équipement des points à observer, bornage et pré-balise. Ces points hauts étaient

couverts de végétation et il fallait d'abord déboiser. Nous avons donc formé des équipes de cinq "*macheteros*" que nous déposions dans les rios avec pour consigne de monter sur le sommet, de le déboiser, de mettre en place la pré-balise et la borne. Au plus fort de l'activité, douze équipes étaient au travail simultanément. Il était prévu cinq jours de travail par point. La densité de la forêt et les règles de sécurité interdisant l'hélicoptère sur les sommets choisis, les équipes étaient déposées avec leur matériel dans le rio le plus proche, à en général une journée d'ascension du point avec matériel de campement et ravitaillement. Ce n'est que lorsque le déboisement était terminé que l'opérateur se faisait déposer sur le point avec le matériel de pré-balise et de bornage. Les pré-balises pour les prises de vues au 1 : 60 000 étaient composées d'un carré de plastique blanc de trois mètres de côté entouré de noir et de branches blanches (*cf. Figure 4*). L'opérateur en profitait pour faire dégager les visées vers les autres points. Le bornage correspondait aux normes IGM, soit un sac de ciment, deux sacs de sable et quarante litres d'eau qu'il fallait également transporter par hélicoptère.

■ Les hélicos

L'unique moyen de transport utilisable pour se rendre sur les points du canevas principal était l'hélicoptère. Deux appareils de type Alouette III ont été loués aux Forces aériennes équatoriennes (FAE). Les conditions d'utilisation de ces appareils étaient rendues très délicates à cause des conditions météo et de l'altitude des points à observer. Elles étaient également assez périlleuses, car ces appareils étaient mono-turbine et les vols au-dessus de la forêt peu recommandés. De plus les problèmes d'approvisionnement en carburant ne nous ont pas simplifiés la vie. Pour préciser, il faut environ un fût de deux cents litres de carburant (JP1) par heure de vol, l'approvisionnement se fait par camion lorsque les routes ne sont pas coupées par des inondations ou glissements de terrain. Si c'est le cas il faut recourir à l'hélicoptère gros porteur type Puma ou au DC3 qui ne peuvent emporter que quelques fûts à cause



du franchissement de la cordillère. Ce carburant, livré en fûts non scellés était très prisé des populations locales qui en ont trouvé l'usage pour leurs lampes et leurs réchauds à pression. Il est arrivé que l'on soit obligé, à leur grande joie, de vider les réservoirs des appareils car le JP1 avait en partie été remplacé par de l'eau dans les fûts. Il est arrivé aussi que l'on se pose en urgence, dans les dix minutes, dans une clairière à cause d'un colmatage de filtre, dans ce cas il faut bien viser pour que le rotor de queue soit bien dans l'alignement de la piste Jivaros qui traverse cette clairière.

La météo nous a aussi souvent obligé à des vols délicats, je me souviens d'une récupération de Michel dans le brouillard, il nous guidait en fonction du bruit de l'hélico qui tournait autour de la zone. D'ailleurs lors de la seconde rotation pour récupérer son aide nous n'avons pas pu franchir le col et avons campé deux jours à trois dans l'Alouette...

À cela se sont ajoutées des pannes diverses qui ont bloqué les appareils au sol ou sur les points pendant un certain temps. Par contre nous n'avons eu qu'à nous louer de l'esprit de coopération des personnels équatoriens. Les pilotes ont accepté de voler la plupart du temps sans leur mécanicien ce qui nous a fait économiser une rotation par pose ou dépose de personnel sur les points. Cela interdisait de couper la turbine imposant une certaine fébrilité lors des chargements et déchargements des personnels et matériels.

■ Les conditions de travail

En ce qui concerne les conditions de travail des opérateurs et de leur aide local, elles étaient difficiles à cause de l'environnement hostile et des conditions météo. La situation s'est aggravée à cause du changement de

mode opératoire. En trilatération les mesures de distances et zénithales ne nécessitaient que la visibilité dans une seule direction. Le passage à des mesures angulaires nécessitant la visibilité simultanée de plusieurs points a donc obligé à des séjours beaucoup plus longs. L'acheminement par hélicoptère, compte tenu du poids des matériels techniques, imposait un matériel de campement et un ravitaillement minimum. Par exemple, il était prévu d'utiliser l'eau de pluie qui tombe en abondance, et par conséquent de n'emporter qu'un seul bidon de vingt litres d'eau potable. Dans un certain nombre de cas il a fallu acheminer du ravitaillement complémentaire. Certaines situations étaient devenues limites, je me souviens de Jacques, en panne de gaz, qui avait bricolé un réchaud avec une serviette roulée dans une boîte de conserve et arrosée d'essence, pour "cuisiner" le peu de riz qui lui restait, le tout à une altitude assez élevée. Certains ravitaillements complémentaires étaient aussi acrobatiques car l'hélicoptère ne pouvait pas se poser pour ne pas faire envoler les tentes et abris confectionnés sur les points.

Témoignage de Bernard Rond : souvenirs d'Équateur

■ Le contexte

Bien que quarante années se soient écoulées, cette mission en équateur reste le souvenir le plus marquant de ma carrière professionnelle et peut-être même de toute mon existence. Il faut dire qu'elle a duré pour moi près de 11 mois (de février à décembre 1975). De tous les opérateurs de terrain, je suis resté le plus longtemps sur place, en travaillant successivement à l'établissement du réseau géodésique et à la stéréopréparation des photos aériennes.

■ Le réseau géodésique

Je suis donc parti en février au sein de l'équipe de terrain dirigée par Henri Dréchou qui devait succéder à celle de Jean-Yves Laigre au bout du rouleau. En effet, Laigre et ses compagnons avaient essuyé les plâtres en définissant le réseau géodésique, en mettant au point, à tâtons, une méthode de travail adaptée aux conditions locales, et en

faisant les observations de la partie sud du réseau, où l'altitude élevée des points géodésiques (certains à plus de 3 000 m) rendait le travail particulièrement difficile du fait des conditions climatiques épouvantables.

Tout ne fut pas rose pour notre équipe (voir plus loin), mais nous avons travaillé à des altitudes un peu plus basses (entre 1 000 et 2 800 m) et nous avons bénéficié de l'expérience de nos prédécesseurs. Une quinzaine de jours de recouvrement des deux équipes a permis à chacun des opérateurs d'Henri Dréchou d'effectuer sa première station sur un point géodésique en compagnie d'un homologue de l'équipe Laigre qui a pu ainsi lui transmettre son expérience et ses méthodes de travail. Mon partenariat avec mon homologue Jacques Ducamp fut bref puisque, dès le deuxième jour que nous passions ensemble sur un point géodésique, il s'est ouvert le mollet d'un coup de machette malheureux, blessure suffisamment sérieuse pour qu'il dût être évacué par hélicoptère.

J'avais quand même eu le temps d'apprendre l'essentiel. Une fois débarqué d'hélicoptère (en compagnie d'un aide indigène faisant partie d'un groupe recruté sur place par Jean-Yves Laigre) sur le point géodésique reconnu et débroussaillé par l'équipe Laigre pendant la première partie de la mission, il fallait commencer par monter un abri de fortune avec de grandes bâches de plastique montées sur une armature de branchages (en général, pour éviter une promiscuité excessive pendant un séjour qui pouvait durer jusqu'à un mois, nous construisions deux abris différents, pour l'opérateur IGN et l'aide indigène), puis construire une borne en ciment en y scellant le repère métallique qui matérialisait le point géodésique sur lequel on centrait ensuite le trépied du théodolite (pour les angles) et du telluromètre (pour les distances) permettant d'effectuer les mesures sur les points occupés au même moment par les autres opérateurs de la mission.

Il pleuvait beaucoup dans toute la région et comme les sommets sur lesquels nous travaillions avaient été déboisés et débroussaillés plusieurs mois auparavant, la boue s'y était accumulée dans des proportions incroyables. Pour assurer une parfaite stabilité du trépied



© M. Le Pape

Figure 13. Atterrissage d'urgence dans une clairière J.Y Laigre, et le pilote.





(indispensable à la précision requise des observations) il fallait en fixer chaque pied sur un rondin d'au moins 1 m 50 de long entièrement enfoncé dans le sol tellement celui-ci était mouvant lorsqu'on se déplaçait autour de l'appareil. Je me souviens d'un point géodésique particulièrement boueux où mon aide m'avait construit, à l'intérieur de mon abri, un sol en bois avec de gros rondins d'au moins 20 cm de diamètre. Et bien qu'à l'abri de la pluie directe, sous la bâche en plastique, le plancher avait entièrement disparu sous la boue au bout d'une semaine.

Nous avons un peu moins souffert de la pluie que nos prédécesseurs en raison de l'altitude globalement plus basse. Il m'est même arrivé de manquer d'eau malgré les systèmes rudimentaires de récupération de l'eau de pluie que nous mettions en place (par souci d'efficacité et d'économie Henri Dréchou avait fait en sorte qu'un seul voyage en hélicoptère permette d'emmener sur un point l'opérateur, son aide et tout le matériel, si bien que nous emportions très peu d'eau). Par contre nous étions dans un brouillard quasi permanent en raison des nuages qui s'accrochaient aux sommets et les mesures d'angle exigeaient une visibilité parfaite d'au moins deux autres points. Sauf pour les points de l'extrême nord à basse altitude, les conditions favorables n'apparaissaient qu'au cours de certaines nuits, pendant une courte durée (si jamais un sommet se dégagait pendant un moment en journée, les autres restaient dans les nuages). Chaque nuit, donc, un opérateur devait veiller (nous occupions en général 4 points simultanément) prêt à réveiller ses collègues par radio (chacun disposait d'un talkie-walkie) pour lancer le travail en urgence. Les observations se faisaient sur de petits projecteurs fabriqués par l'IGN dont le faisceau parabolique, bien qu'alimenté par une simple batterie de voiture de 12 volts, était visible à plusieurs dizaines de kilomètres (il m'est arrivé de faire une visée à 80 km) ! Il convient de souligner que le total des observations à effectuer sur un point ne dépassait pas une demi-douzaine d'heures et pourtant il fallait généralement attendre plusieurs semaines avant de rencontrer les conditions favorables sur une nuit ou deux.

Il fallait donc tuer le temps pendant de longues journées. Certains s'occupaient à travailler pour améliorer leur campement (c'est comme cela que Jacques Ducamp s'était blessé). D'autres lisaient ou écoutaient la radio sur de petits postes à transistor avec lesquels nous parvenions à capter des émissions lointaines compte tenu de notre situation dominante. Nous recevions assez bien Radio France International. A plusieurs reprises j'ai même reçu une émission en français, pas très distincte mais que j'ai fini par identifier avec certitude (aussi incroyable que cela puisse paraître), comme les radio-taxis de Marseille ! Pour ma part, je chassais les papillons pour autant que je parvienne à en trouver autour du campement.

Si le travail n'était pas terminé au bout de deux semaines (c'est-à-dire presque toujours), l'hélicoptère venait nous ravitailler, si le temps le permettait (parfois il fallait attendre plusieurs jours).

Quand enfin tout était fini, nous appelions avec nos talkies-walkies le PC de mission pour demander à l'hélicoptère de venir nous chercher. Le PC, à partir duquel Henri Dréchou coordonnait les travaux, était établi dans le village le plus proche de la zone de travail où il louait ce qu'il pouvait trouver comme logement. Les rares villages de "l'Oriente" rappelaient les décors de westerns avec leurs quelques maisons en bois (le "saloon" au milieu comme il se doit) alignées de part et d'autre d'une piste en terre et devant lesquels quelques chevaux étaient attachés. Les voies de communication étaient pour la plupart des sentiers muletiers. Seules quelques pistes infâmes, à peine praticables en 4 x 4, reliaient la région au reste du pays et les automobiles étaient

donc très rares. Alors que Laigre avait préféré conserver un PC fixe le plus longtemps possible, Dréchou avait choisi d'en changer souvent, au fur à mesure de l'avancement du réseau vers le nord, afin de réduire les trajets en hélicoptère. Notons qu'il était aidé par mon épouse qui lui servait d'interprète. Comme elle avait passé la plus grande partie de son enfance et de son adolescence en Amérique du Sud, elle avait tenu à m'accompagner. Elle n'allait évidemment pas sur les points géodésiques, mais elle a été d'une aide précieuse pour Henri Dréchou qui ne parlait pas un mot d'espagnol.

En général, Dréchou nous accordait deux ou trois jours de repos avant de repartir sur un autre point, mais si les circonstances l'exigeaient, notamment la nécessité de permettre à un opérateur en place, d'effectuer ses mesures sur un nouveau point, nous repartions directement sur un nouveau sommet sans repasser par le PC.

A ce sujet une anecdote me revient en mémoire. Il faut rappeler que nous travaillions en collaboration avec l'armée équatorienne. L'armée nous mettait à disposition un hélicoptère qui stationnait près du PC pendant toute la mission. Heureusement pour nous (sinon nous aurions fini par mourir de faim sur les sommets) les pilotes de l'armée étaient des casse-cous peu à cheval sur la sécurité et qui acceptaient de voler bien souvent dans des conditions météo très précaires (j'ai d'ailleurs appris, quand je suis retourné en Équateur en 1976 pour liquider le bureau de l'IGN à Quito, que l'un d'eux s'était tué au cours d'une autre mission). Ainsi un jour, l'hélicoptère vint me chercher sur un point pour m'emmener sur



Figure 14.
Campement.

© J.Y. Laigre



un autre, assez peu éloigné. Après que mon aide et moi eûmes embarqué avec le matériel, le pilote constata que l'appareil était trop chargé et il demanda donc au mécanicien qui l'accompagnait de descendre. Après nous avoir emmenés sur l'autre point où il déposerait mon aide avec le matériel, il reviendrait le chercher avec moi (pour que je l'aide à retrouver plus facilement le point exact). Mais le temps de faire l'aller et retour (moins d'une demi-heure), les nuages étaient arrivés. On ne discernait plus rien de la colline d'où nous étions partis ; le pilote volait au ras des arbres en plein brouillard, avec une visibilité plus que réduite, en prenant des risques énormes (je le voyais transpirer à grosses gouttes...), mais en vain. Au bout d'un bon quart d'heure de survol de la zone, il dut renoncer et rentrer à sa base. Nous sommes retournés le lendemain matin, heureusement par temps clair, rechercher le mécanicien que nous avons trouvé sans difficulté. Il avait dormi à même le sol sous l'abri qu'évidemment nous ne prenions jamais la peine de démonter. Il s'était accommodé de l'absence de nourriture, d'eau et de couchage et il est tranquillement remonté dans l'hélicoptère en souriant.

Deux autres péripéties méritent d'être mentionnées.

La première, tragique au départ, a heureusement connu un dénouement satisfaisant. Sur un point géodésique, j'ai été un matin réveillé par des hurlements. Je me suis précipité et j'ai vu mon aide allongé au sol qui criait de douleur. Comme chaque matin, il avait voulu allumer du feu pour préparer le premier repas du jour. Le feu démarrant difficilement à cause du bois toujours humide, il était allé prendre un peu d'essence du groupe électrogène qui servait à nous éclairer et à recharger la batterie du projecteur. Mais en approchant du foyer, il avait buté sur une racine et était tombé dans le feu en renversant l'essence sur lui. Il était assez gravement brûlé sur le corps, mais heureusement le visage n'était pas atteint. La petite trousse de secours dont je disposais ne me permettait guère de le soigner efficacement et j'ai aussitôt appelé Henri Dréchou pour qu'il envoie l'hélicoptère en urgence. Malheureusement, comme

personne n'était censé en avoir besoin ce jour-là, l'hélicoptère était parti en révision dans un centre de l'armée et mon malheureux aide a dû attendre plus de 24 heures, en souffrant comme on peut l'imaginer, avant d'être enfin emmené à l'hôpital. Il a pu en ressortir au bout d'une dizaine de jours et il a été tout heureux de pouvoir repartir sur un point avec moi après un mois de convalescence.

La seconde a constitué sans doute le moment le plus effrayant de cette mission. Sur l'un des derniers points géodésiques que j'ai occupé, le temps était particulièrement détestable et il m'a fallu 20 jours pour terminer le travail. L'hélicoptère n'avait pas pu nous ravitailler au bout de deux semaines, faute de conditions météo favorables. A l'issue de ces 20 jours j'ai prévenu le PC pour qu'il nous envoie chercher dès que le temps le permettrait. Chaque matin, avec mon aide, nous emballions tout le matériel et toutes nos affaires pour être prêts à partir immédiatement en cas d'éclaircie, mais pendant encore 5 jours nous sommes restés dans les nuages. Nous étions exaspérés et épuisés et nous n'avions plus rien à manger. Finalement le sixième jour nous nous sommes réveillés sous un ciel dégagé et un soleil éclatant. J'ai aussitôt appelé le PC mais Henri Dréchou m'a dit que le village était dans un épais brouillard et qu'il était impossible à l'hélicoptère de décoller ! Une demi-heure plus tard, il m'a expliqué que le pilote, persuadé de ne pas pouvoir voler ce matin-là, était allé boire un coup et qu'il l'avait trouvé dans un état d'ébriété avancée. Malgré tout, il avait accepté de prendre le risque de venir me chercher car le brouillard du village commençait à se dissiper. Le temps que le pilote et son mécanicien se préparent, une demi-heure s'écoula encore et je me suis à mon tour retrouvé dans les nuages et sous une pluie battante quand j'ai entendu le moteur de l'appareil. Le pilote n'a pas pris le risque de se poser, il s'est contenté de faire du surplace à deux mètres au-dessus du sol. Le mécanicien a sauté de l'appareil pour nous aider à charger et il m'a dit (je me souviens de ses paroles exactes au bout de 40 ans) : Le pilote est complètement saoul, nous sommes morts ! Nous avons chargé et nous avons

embarqué à la hâte. Je me suis assis à côté du pilote qui m'a dit de ne pas m'inquiéter et que nous allions nous en sortir, mais son ton n'était guère rassurant. Nous étions alors en pleine tempête avec une visibilité quasi nulle. Comment a-t-il réussi à nous ramener sains et saufs au PC ? Cela a tenu à la fois de l'exploit et du miracle...

■ La stéréopréparation

La stéréopréparation des photos à 1 : 35 000 pour la cartographie des fonds de vallée a été réalisée par l'équipe Dréchou en parallèle à l'achèvement de la partie nord du réseau géodésique. C'était un tout autre travail. Plus besoin d'hélicoptère, de travail de nuit à longue distance, ni de station prolongée sur un point. Les mesures d'angles et distances se faisaient de proche en proche, à pied le long de sentiers muletiers que nous arpentions pendant de longues journées en compagnie d'une équipe de porteurs pour la nourriture et le matériel, parfois soulagés par une ou deux mules. Quand il n'y avait pas de sentier, il fallait le tracer à la machette dans la forêt tropicale. C'était un travail épuisant compte tenu de la chaleur (les fonds de vallées étaient évidemment à basse altitude) du relief très accidenté et de la boue qui rendait la marche très pénible. Les sentiers muletiers étaient des successions de bosses, où les mules et les hommes posaient leurs pas, et de trous où la boue s'accumulait. Malheur à celui qui glissait sur une bosse et mettait le pied dans un trou. Je me suis ainsi retrouvé un jour enfoncé dans la boue jusqu'à mi-cuisses ! Mais au moins on n'avait pas le temps de s'ennuyer. Cela nous changeait de la monotonie, de l'incertitude et du froid nocturne des sommets. Mais que de pluie on prenait sur la tête !

■ Un morceau d'aventure

Je dois aussi relater une expérience particulièrement forte que je suis le seul à avoir eu la chance (?) de vivre au cours de cette mission. Hervé Guichard, qui effectuait à Quito les calculs du réseau géodésique au fur et à mesure de l'avancement de nos travaux, s'est aperçu que les mesures que j'avais faites sur le point 112 n'étaient pas cohérentes (j'ai compris plus tard que





les rondins sur lesquels j'avais installé mon trépied étaient insuffisants et que le centrage des appareils sur la borne variait tandis que je me déplaçais autour du dit trépied). Il était indispensable de faire de nouvelles mesures depuis ce point. Pour éviter de devoir remonter sur plusieurs sommets, un point géodésique supplémentaire, à faible altitude et accessible en 4 x 4, avait été installé dans la vallée sur lequel les nouvelles mesures seraient effectués.

Mais il fallait retourner sur le 112 et la mission géodésique étant terminée nous n'avions plus d'hélicoptère à disposition. Il fallait donc y aller à pied depuis le village le plus proche, Limon, où le PC était alors installé. La tâche m'incombait évidemment, non seulement parce que j'étais fautif, mais surtout parce que j'étais le seul à connaître l'endroit. Henri Dréchou m'a recommandé de chercher un guide indigène. Ne sachant à qui m'adresser, nous avons eu l'idée de demander au chef du village que nous (Dréchou, ma femme et moi) sommes allés rencontrer un matin au bar du village. Le point 112 n'était pas très élevé (1 864 m). Je me rappelais qu'il était situé près d'une falaise au bout d'une sorte de plateau que les indigènes appelaient la "*loma seca*" ("la colline sèche"). Nous avons donc expliqué au chef du village que je cherchais un guide pour m'y conduire. Il nous a répondu que cela serait très facile et qu'il nous amènerait un guide chez nous, à notre PC, après le déjeuner.

Nous finissions de déjeuner quand nous avons entendu chanter à notre porte. Le chef du village est entré bras-dessus-bras-dessous avec un autre individu, qui chantait : "*Soy el tigre de la montaña*" ("*Je suis le tigre de la montagne*"). "*Voici votre guide*" nous a dit le chef du village. Les deux hommes étaient ivres-morts. Le "guide" s'est affalé sur un divan et s'est aussitôt endormi. Nous avons poliment remercié le chef du village et renvoyé non moins poliment son acolyte une fois réveillé. Je ne sais plus comment j'ai trouvé un autre guide qui paraissait beaucoup plus sérieux. Dréchou m'a laissé choisir dans notre équipe de manœuvres les 12 porteurs qui nous accompagneraient. Nous sommes partis un matin dans la

direction de la *loma seca*, que l'on ne pouvait voir en raison de la forêt qui couvrait toute la région. Nous avons progressé pendant trois jours en suivant d'abord un sentier muletier puis une vague piste à peine perceptible le long de laquelle le guide nous frayait un chemin à la machette. A la fin du troisième jour, le guide m'a déclaré : Je rentre au village, je vous laisse continuer. J'ai évidemment protesté, mais il m'a tranquillement expliqué qu'il ne connaissait pas le chemin au-delà et que personne n'était jamais allé jusqu'à la *loma seca*. Il a ajouté qu'il ne me servirait à rien s'il restait avec nous et que je devrais quand même continuer à le payer. Je n'avais d'autre choix que de le laisser repartir.

Il n'était évidemment pas question de rentrer avec lui. Ces observations complémentaires étaient indispensables car le 112 était à la fois un point central du réseau géodésique et le principal point d'appui de la stéréopréparation du rio Paute. J'ai donc décidé de me substituer au guide à la tête de mes porteurs. Je n'avais ni carte (nous étions censés les fabriquer) ni photos aériennes car aucune n'avait été prise sur cette zone. La boussole ne pouvait me servir à rien car je ne connaissais pas la direction à suivre. Mais je savais une chose : le point 112 était le plus élevé du secteur ; c'était le critère de base qui avait conduit Jean-Yves Laigre dans le choix des points. Il suffisait donc de toujours monter pour être sûr d'y arriver.

Ce n'était quand même pas si simple. Au milieu de la forêt vierge où nous nous trouvions, il n'était pas toujours évident d'apprécier la pente du terrain. Après une nuit de repos, nous nous sommes résolument mis en route (mes porteurs, à la fois courageux et fatalistes n'ont jamais rechigné tout au long de ce périple). Heureusement le relief était suffisamment accentué pour ne pas trop hésiter sur la route. La principale difficulté venait des cours d'eau que nous devions traverser et dont le lit formait parfois des gorges au fond desquelles il fallait descendre avant de remonter de l'autre côté. Et surtout, il fallait tracer le chemin à grands coups de machette à travers la forêt tropicale. Notre progres-

sion était donc extrêmement lente. J'ai marché en tête pendant quelque temps car je n'avais rien à porter contrairement à mes compagnons qui avaient tous de lourdes charges sur le dos, mais je n'avais ni leur force physique, ni leur pratique de la machette et ils n'ont pas tardé à se relayer à ma place en tête de colonne. Je me contentais d'indiquer la direction à suivre.

Je passerai sur les mauvaises nuits dans des campements précaires avec la pluie et les moustiques, mais finalement, au bout du septième jour (le quatrième depuis que le guide nous avait abandonné), nous nous sommes retrouvés face à la falaise en haut de laquelle je savais que se trouvait le point géodésique. C'était à la fois un soulagement, parce que nous étions près du but, mais aussi une déception car je pensais que nous arriverions par l'autre côté du plateau. Je n'avais jamais supposé que nous aurions cette falaise à escalader. Elle n'était pas très haute (une trentaine de mètres peut-être), mais très raide et nous n'avions aucun équipement adéquat, pas même une simple corde (j'avais réduit l'équipement au strict minimum). Nous étions tous chaussés de simples bottes de caoutchouc, indispensables à cause de la boue. Je ne pensais pas l'escalade possible dans ces conditions, d'autant qu'en cas d'accident nous ne pouvions recevoir aucun secours (nous n'avions aucune liaison radio avec le PC depuis notre départ) et il était impossible de ramener un blessé au village. J'ai donc proposé à mes compagnons de contourner la falaise, sans savoir trop comment car nous serions à nouveau enfermés dans la forêt sans point de repère, ni combien de temps cela nous prendrait. Mes porteurs se sont rapidement consultés en langue quechua (c'étaient presque tous des Indiens) et leur porte-parole m'a déclaré en espagnol qu'ils préféraient escalader la falaise. Ils étaient fatigués (il y avait de quoi : ils portaient tous entre 20 et 30 kg sur le dos depuis une semaine dans des conditions de marche extrêmes) et cette escalade leur semblait réalisable. Leur décision m'a fait peur, mais j'étais épuisé moi aussi. La falaise n'était pas de la roche nue. Il y poussait une végétation herbue et arbustive suffisamment

épaisse pour offrir des points d'appui. Et nous y sommes arrivés, moi avec ma seule machette à la ceinture, mes admirables compagnons avec leur charge sur le dos. Mais quand j'y repense, il me semble que cela relève plus du miracle que de l'exploit.

Arrivés en haut, nous n'étions pas tout à fait au bout de nos peines car nous étions encore au milieu des arbres et la clairière du point géodésique n'était pas visible. Je savais qu'elle ne devait pas être loin mais j'ignorais la direction précise et je redoutais d'errer longtemps dans la forêt qui recouvrait le plateau. Je me suis donc lancé à l'assaut d'un grand arbre que j'ai grimpé jusqu'au sommet d'où j'ai pu découvrir la clairière à quelque 200 mètres de là. Quelques minutes plus tard, nous étions enfin au point 112.

Aussitôt arrivé, j'ai appelé Henri Dréchou (en haut du plateau les liaisons radio étaient rétablies) pour qu'il envoie immédiatement un opérateur sur le point avec lequel je devais faire mes mesures pendant que les porteurs installaient le matériel et préparaient le campement pour la nuit. Comme le temps était exceptionnellement dégagé, j'ai pu faire toutes les observations le soir même et nous avons pu repartir dès le lendemain. Une fois en bas de la falaise (encore miraculeusement descendue sans accident) le retour nous est apparu comme une promenade de santé : il n'y avait qu'à descendre et le chemin était tout tracé. Le retour n'a pris que quatre jours contre sept pour l'aller. Et dire que j'avais fait le trajet en hélicoptère quelques mois plus tôt en moins d'une demi-heure...

Beaucoup plus tard...

Nous sommes retournés à plusieurs reprises en Équateur, ma femme et moi, et nous avons fini par nous installer, à ma retraite en 2005, au village de Misahualli, à l'entrée de la forêt amazonienne où nous avons acheté un hôtel que nous avons géré pendant quatre ans.

Le barrage d'Agoyan fonctionne très bien, mais les points géodésiques que nous avons eu tant de mal à déterminer ont tous été avalés par la forêt qui recouvre toujours les sommets...

Témoignage de Patrice Vallée : Impressions d'Oriente

Cette mission en Équateur ne m'a laissé que de bons souvenirs, elle fut à part et surtout beaucoup plus originale que mes précédentes africaines.

Tout d'abord le pays et ses habitants, aimables et souriants, les Andes et ses paysages gigantesques, le Chimborazo, le plus haut volcan terrestre, voire le plus haut sommet du monde, du fait de sa latitude, si l'on prend comme point de référence le centre de la Terre.

La mission se passait en Oriente, versant Est des Andes. Comme dans toute mission il y a un Chef, digne héritier de La Condamine et la mesure de son arc de méridien, ce fut Hervé Guichard et sa trilatération. Personnage haut en couleurs, d'une forte personnalité, aimable, diplomate et doté d'un humour caustique et littéraire, polytechnicien compétent et grand calculateur souvent nocturne. Lors d'un séjour en Provence, je suis passé le voir chez lui, à Oppède, peu de temps avant sa mort. Il était retraité, s'est souvenu de moi, il a pris sa guitare, dont il jouait fort bien, joua un morceau, nous avons discuté et trinqué, bref il n'avait pas changé et cela m'a fait plaisir.

Voici les points que j'ai stationnés :

Le Tapichalaca altitude : 3 032,18 m durée de séjour : 9 jours 19 heures.

Le 116 altitude : 2 014,64 m durée de séjour : 28 jours 18 heures.

Le 242 altitude : 2 086,53 m durée de séjour : 11 jours 15 heures.

Le 123 altitude : 1 952,28 m durée de séjour : 16 jours.

Le 111 altitude : 2 804,66 m durée de séjour non notée.

La surface "habitable" de ces sommets était assez réduite, de 200 à 500 m² environ, mais nous n'étions que deux. La première chose que nous faisons en arrivant était de construire nos deux habitations. Pour la charpente, pas de problème, nous avions tous les rondins nécessaires à portée de machette. Mon aide équatorien, courageux, sympathique, discret, cohabitation oblige et dieu de la machette, faisait cela vite et bien, puis le lit en rondins, bien isolé du sol. Il ne restait plus qu'à habiller le tout



© D. Marcel

Figure 15. P. Vallée devant son campement.

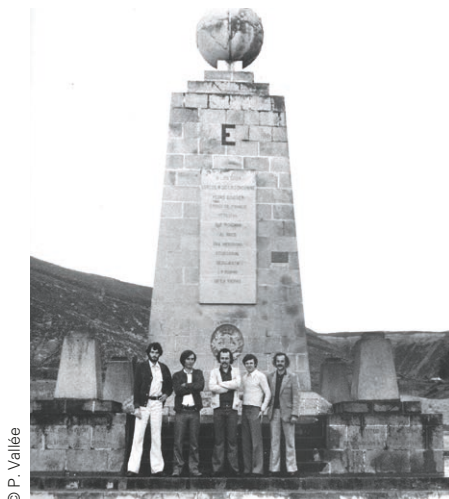
de plastique, sans oublier le récupérateur d'eau. A part les tremblements de terre, auxquels nos constructions résistaient fort bien, je n'ai pas le souvenir de tempêtes ou coups de vent destructeurs. Venait ensuite l'installation du matériel. Trois gros et longs rondins enfoncés à ras dans l'humus pour le trépied et autour un trottoir bien séparé des rondins du trépied. Il ne restait plus qu'à attendre une visée optique avec les collègues des autres sommets. Ces mesures d'angles se faisaient généralement de nuit par séries assez nombreuses, couvert de la tête aux pieds de papillons de nuit, attirés par le projecteur. Papillons assez grands (8 cm environ), accrocheurs et très coriaces. Les mesures de distances étaient plus faciles, les ondes du telluromètre passant dans les nuages pas trop épais. Évidemment, compte tenu de la durée du séjour sur les pitons, cela laissait pas mal de temps de libre que nous consacrons à l'aménagement de notre hameau, table de toilette, fauteuil de lecture etc.

Parmi beaucoup d'autres livres, je me souviens avoir lu l'unique roman de Salvador Dalí, "Visages cachés" écrit en français aux USA en 1943 et publié en France en 1973, dont il disait en quatrième de couverture : "J'ai voulu



© P. Vallée

Figure 16. Fauteuil de lecture.



© P. Vallée

Figure 17. Au monument mitad del mundo ("à Carlos de la Condamine") Jean-Marie Chaboussant, Jacques Ducamp, Michel Le Pape, Gérard Lutrot et Patrice Vallée.



faire un roman long et ennuyeux". Dans le silence, la solitude et entouré des "merveilleux nuages" andins, cette saga de Dali fut passionnante.

Témoignage de Denys Marcel

A Paris, j'avais lu une partie des récits de ces grands savants que furent Charles-Marie de La Condamine et Pierre Bouguer chargés, 240 ans auparavant, de la mesure d'un arc de méridien à la latitude de l'équateur.

Je pensais que la mission serait difficile certes, mais que l'hélicoptère et les appareils de mesure de distance faciliteraient le travail. Il n'en fut rien, les problèmes sont restés les mêmes :

- le mauvais temps continu, je ne me rappelle pas avoir eu une journée de soleil sur les sommets, l'humidité, la boue ; sur certains points je n'enlevais même pas mes bottes la nuit...
- les accès difficiles au sol et en hélicoptère. Les vols étaient un véritable danger vu les conditions météo. Les pilotes étaient disponibles et sympathiques, mais certains n'étaient parfois pas en état de piloter. Je me rappelle avoir traversé les nuages et être ressorti face à la paroi ; un autre jour avoir vu un pilote s'affoler, il y avait de quoi, tous les voyants clignotaient rouge. "On ne peut pas descendre en feuille morte il n'y a pas de clairière !". Nous avons accepté tout cela, quelle chance nous avons eue !

- le matériel : les méthodes d'observation ont peu changé et les telluromètres n'ont pas donné entière satisfaction à cause des variations climatiques le long des visées donc des corrections difficiles. De plus ces appareils MRA2 sont sensibles à l'humidité. D'autre part en fin de mission le matériel logistique était réduit et en mauvais état ; par souci d'économie nous n'avions droit qu'à une seule rotation.

Quelques petites anecdotes : J'ai noté des températures de 6 degrés et des hauteurs de pluie de 158 mm en une seule journée, 3 015 m d'altitude près du Sangay : ces relevés étaient ma distraction. Je me souviens de mon Indien, tétanisé, frigorifié, qui s'entourait les jambes de papier journal ; il n'était pas habitué à des températures aussi basses. C'est sur ce sommet, se trouvant sur une longue crête menant au Sangay qu'un jour la fumée d'une éruption s'est rabattue jusque sur notre station et que le volcan nous a infligé d'impressionnants tremblements de terre.

Sur un autre point, le travail terminé, nous attendions depuis trois jours l'hélicoptère. Il arrive, tourne plusieurs fois autour du camp et repart sans



© D. Marcel

Figure 18. T3 au repos faute de visibilité.



© D. Marcel

Figure 19. D. Marcel, cordillère du Condor.

pouvoir se poser. Ensuite les vivres ont commencé à manquer d'autant plus que mon aide avait, le jour du faux-départ, balancé dans le vide, la quasi-totalité des provisions pour alléger la charge ! Après plusieurs jours de jeûne, j'ai décidé de descendre à pied traversant rios et forêt en deux jours.

Un autre retour s'est vraiment effectué sous la pluie. Incroyable ! Il n'y avait aucune visibilité et pourtant l'hélico était là, nous entendions le bruit insistant du rotor tout proche. Alors j'ai eu l'idée de mettre le feu au carburant qui nous restait ce qui a permis au pilote de nous situer et nous ramener en catastrophe. C'était le premier jour d'interdiction de vol pour raison technique des Alouettes III par le constructeur. Dréchou avait insisté pour qu'on vienne nous récupérer et le pilote a accepté d'essayer malgré l'interdit : "Merci à eux deux".

Je pourrais encore dire la peur de mon aide sur un point de l'est : Olmedo avait ri toute la nuit. Le matin il me dit : "Tu aurais dû emmener le fusil ; les Indios Bravos sont venus nous observer cette nuit !" En effet il y avait des galeries hautes de un mètre qui sortaient de la forêt. Je n'ai jamais su s'il s'agissait des Aucas, Indiens sauvages marchant courbés... ou de pumas. Ces derniers étaient passés non loin de là, c'est sûr, et avaient laissé des traces de griffes sur les arbres.

Pour terminer, je voudrais rendre hommage à Hervé Guichard, le chef de mission, un être extraordinaire, scientifique, artiste, humaniste et... homme de terrain qui par sa clairvoyance, sa présence a œuvré pour que la mission ne soit pas un échec.



Figure 20. Hervé Guichard croqué par D. Marcel.

En Équateur, chaque opérateur a donné le meilleur de lui-même, mais il fallait être sur place pour avoir conscience de la difficulté et de l'effort accompli. Pour moi, cette mission fut une aventure qui m'aura marqué plus que d'autres aussi dures, dans le désert ou en Antarctique, où les problèmes sont mieux maîtrisés... Sûrement la dernière de ce type pour l'IGN.

Témoignage de Michel Le Pape : une mission initiatique

Cette mission fut pour moi la mission qui a déterminé ma carrière, parce qu'elle m'a fait basculer du monde de l'insouciance au monde réel et responsable.

Jeune diplômé de l'ENSG (octobre 1973) où j'avais un intérêt privilégié pour les cours de maths ou ceux qui s'en rapprochaient (cours de maths de Pressensé, Osché, Hottier, cours de géodésie et d'astronomie de Commiot), j'avais été affecté, avec mon camarade de promotion Daniel Horel, au service de la géodésie, dirigé à l'époque par J.-J. Levallois.

A la fin (octobre 1974) de notre première brigade de géodésie, je fus averti que j'avais été désigné, comme représentant du service de la géodésie, membre de cette mission en équateur qui devait, en trois mois, établir le réseau géodésique de l'Équateur, première phase des opérations qui devait conduire à l'élaboration de sa cartographie. Je ne connaissais rien de l'Équateur, pas même sa situation géographique, encore moins le fait que cette partie du monde avait fait l'objet de mesures géodésiques diligentées par l'Académie des Sciences (Mission Godin 1735-1743, mission Perrier 1901-1906)...

Je partais donc en Équateur comme novice avec des inconnus (?) expérimentés et découvrais ainsi l'angoisse de quitter la France : je n'avais jamais été au-delà de l'Allemagne, ni pris l'avion. Ayant été averti tardivement de ma participation à cette mission, le départ fut mouvementé, d'autant que notre escale à Lisbonne (j'étais en compagnie de Gérard Lutrot) se prolongea, sans que nous puissions sortir de

l'avion, compte-tenu de la Révolution portugaise des œillets rouges.

Après une escale à Caracas, ce fut la découverte de Quito, la ville aux 4 saisons dans une seule journée, puis la descente en 4x4, nécessaire au transport des telluromètres indispensables au démarrage des travaux, de Quito à Zamora au Sud de l'Équateur, base initiale des opérations géodésiques, où nous attendait le reste de l'équipe pour débiter les observations : seul au volant d'un Dodge pick-up 3 vitesses, ce voyage de 800 km reste inoubliable, en termes de population rencontrée, de faune, de paysage, de météo.

Puis ce fut l'intégration dans le groupe IGN, avec ces "anciens", guère plus âgés que moi, mais ayant tous une expérience de mission africaine. Le début des opérations géodésiques se concrétisa par mon départ programmé en hélicoptère pour le point 125, situé sur la chaîne du Condor sur la frontière péruvienne à 2 900 m d'altitude ; j'ouvrais donc le bal ; ce fut une angoisse, déjà celle de prévoir la nourriture et le matériel de vie pour mon aide équatorien et moi, pour 5 jours, puisque tel était le planning. Ce point en outre n'avait pas été reconnu, ni borné comme la majorité des autres. Il me fallut sur place définir la position du point définitif, le construire, puis patienter plus que prévu pour débiter les observations, en fonction de l'arrivée de mes camarades sur leur point respectif. Finalement, je fus récupéré au bout de 25 jours, travail accompli. Fondamentalement, ce séjour sur ce point a été déterminant pour le reste de ma carrière : je n'avais pas imaginé que je serais confronté à de tels problèmes de vie quotidienne : hygiène, humidité, froid, boue, moustiques, gestion de la nourriture (comment se comporter quand il faut partager la nourriture à deux quand elle est insuffisante ?). En définitive, je n'ai opéré que sur trois points géodésiques en 5 mois et demi passés en Équateur, à raison de 25, 35 et 45 jours, durées qui témoignent des difficultés opérationnelles dues à la météo, la logistique (essentiellement le fonctionnement des hélicoptères) et les contraintes opératoires.

Cette aventure m'a donné le goût de la géodésie, en me permettant de m'interroger sur la justification des



Figure 21. Michel Le Pape dans sa cabane au point 120.



Figure 22. Michel Le Pape observe au T3. instructions qui nous étaient données : j'avais compris que nous établissions un réseau de trilatération (basé donc sur des mesures de distances) ; puis Hervé Guichard, chef de mission désigné en cours d'opération, a imposé des mesures azimutales, ce qui sur un plan pratique et logistique, modifiait de fait énormément les durées de séjour sur les points. Puis l'instruction a été donnée d'effectuer des lectures de bulle sur la nivelle du théodolite lors des tours d'horizon ou de mesures de couple. J'avoue qu'à l'époque je comprenais mal ces directives, constatant, le terrain étant tellement boueux, qu'on pouvait centrer à coup de pied la borne sous le théodolite...

En conclusion, l'expérience acquise à travers cette mission qui s'est déroulée de novembre 1974 à avril 1975 m'a profondément marqué et influencé pour le reste de ma carrière, sur le plan technique, logistique mais aussi humain ; les nombreuses autres missions effectuées ensuite (Libye, Jordanie, Arabie Saoudite, Tchad) me sont apparues relativement plus faciles. Je garde en mémoire, de cette première mission hors France, tous les membres de l'équipe initiale, comme on se souvient de tous ses enseignants qui ont marqué notre scolarité ; je pense à Jean-Yves Laigre, pour sa détermination et son opiniâtreté, Jean-Marie Chaboussant, pour sa force tranquille et son rire communicatif, Jacques Ducamp, pour son professionnalisme et sa curiosité,



Patrice Vallée, pour son humour et ses talents d'écrivain, Gérard Lutrot, pour son énergie et sa volonté et enfin, le chef de mission Hervé Guichard, un personnage hors du commun à la fois guitariste, chanteur, poète, calculateur (moindres carrés), joueur de cartes et grand amateur de whisky...

Témoignage Françoise Duquenne : des vacances à l'aventure

J'étais en deuxième année du cycle d'ingénieur à l'École nationale des sciences géographiques, quand Henri, mon compagnon partit rejoindre la mission IGN en Équateur. Il devait revenir en août et nous devions passer nos vacances de septembre ensemble.

Pendant mon stage d'astronomie à Goult, je reçois un télex, m'informant que la mission n'était pas terminée, et que ce serait bien que je le rejoigne en Équateur. Donc, début septembre, je prends l'avion pour Quito, mais hélas il nous largue en Colombie, on nous prévient qu'un coup d'état est en cours à Quito et que l'aéroport est occupé. L'angoisse monte, Henri était-il à l'aéroport retenu par les putschistes ? Ou même pire ? Pas moyen de le contacter évidemment et peu d'information sur l'événement à la radio. Je me lie avec un groupe d'Équatoriens, qui m'aide à trouver un hôtel, puis à prendre un petit avion le lendemain.

Soulagée je retrouve Henri à l'aéroport, la veille il avait été stoppé à une centaine de kilomètres de Quito par des militaires, avait appris le coup d'État et s'était inquiété pour moi. Ensemble nous allons au centre de Quito où règne une ambiance militaire pesante et constatons que le palais présidentiel est criblé de balles. Nous restons deux jours à Quito le temps pour moi de faire connaissance avec Hervé Guichard, et nous voilà partis pour faire deux points complémentaires dans le sud. Quelle merveille de rouler sur la piste entre Quito et Cuenca, dans la cordillère des Andes, en découvrant ses volcans fabuleux. Dans ce sens pas d'escale, il fallait rejoindre les autres au plus vite et partir sur les points. Très vite on part sur le terrain, et à pied dans une forêt vierge à souhait. Henri Dréchou avait souhaité,

pour ne pas que je ralentisse la progression du groupe, qu'Henri et moi partions seuls avec juste un sac à dos, alors que lui et une bonne dizaine de porteurs et mulets iraient avec le matériel et le ravitaillement en suivant la vallée. Nous ne suivons pas le même chemin, le nôtre traverse la forêt, en montant et descendant le relief, et cheminant d'un groupe d'habitations à un autre. Je faisais connaissance avec la forêt tropicale, la végétation luxuriante, des fleurs étranges, mais aussi des odeurs de pourriture, dans une atmosphère chaude et étouffante (la valeur déterminée pour les mesures de distance était la même pour la température sèche et humide : l'humidité était de 100 %), on était trempé même s'il ne pleuvait pas vraiment. La progression était difficile, on s'enfonçait souvent dans la boue jusqu'aux cuisses, et quand on voulait se retenir à des lianes qui pendaient, pourries, elles tombaient sur nos têtes.

Ce n'était pas la jungle comme je l'avais imaginée avec Tarzan. On progressait en demandant notre chemin à chaque habitation croisée (mais il y en avait guère), on se désaltérait et mangeait ce qu'il y avait, je me rappelle d'une soupe aux bananes vertes pas vraiment facile à manger. Les gens étaient charmants. Quelle fut notre surprise quand on nous proposa à boire du Coca-Cola, arrivé à dos d'homme, après plusieurs jours de marche. Il n'était pas question d'en boire alors qu'à l'approche du village, on avait traversé des champs d'ananas et toutes sortes d'arbres fruitiers exotiques aux fruits pleins de jus, et ce en comprenant bien l'honneur qu'on nous faisait.

Quand on demandait notre chemin, on nous disait toujours qu'on n'avait plus beaucoup de temps pour arriver au but, mais ici pas d'estimation en minutes ou en heures, si bien qu'un jour, la nuit est tombée avant qu'on arrive au village (la nuit tombe très vite à l'équateur). Nuit noire en forêt, impossible de trouver son chemin, alors on décide de se faire un lit de feuilles et sinon de dormir au moins de se reposer. Surprise alors de découvrir le bruit, la nuit dans la forêt et de s'imaginer les insectes et autres animaux autour de nous. Une autre fois on arrive dans un village, et on est accueilli extrêmement chaleureusement,

et on comprend vite pourquoi : les habitants avaient pris Henri pour l'instituteur qu'ils attendaient depuis longtemps. Ils avaient construit une belle école en bois, et faute d'y enseigner, on y passa la nuit. Malheureusement on fut réveillé par la pluie, et oui, le toit de la belle école fuyait sévèrement et on a pu se réfugier pour dormir sous la table de l'instituteur.

On arrive enfin sur le lieu convenu avec les autres, et là personne. Ce n'est que le lendemain qu'ils arrivèrent, je n'avais donc pas retardé la mission. J'assistais Henri dans ses observations, avec l'expérience qu'il avait acquise et un temps favorable ce fut presque facile puis ce fut le retour, selon un chemin qui n'était peut-être pas le même mais très semblable. En tout on aura passé treize jours dans la forêt, et je n'eus jamais d'occasion similaire depuis car par la suite c'est plutôt dans des pays désertiques qu'Henri et moi avons travaillé (Libye, Algérie, Égypte, Liban). Nous reprîmes la Toyota et la route pour Quito mais ce coup-ci en faisant un peu de tourisme. Au pied du Chimborazo, où aux alentours de 4 000 m d'altitude poussaient des cactus et des pommes de terre et où quelques alpagas vinrent nous saluer. Sur les marchés indiens j'étais très attirée par l'artisanat et j'achetais des colliers, des ponchos, des pulls, de grosses pelotes de laines bigarrées que j'ai utilisées pour tisser l'hiver suivant. Ces objets et les magnifiques photos d'Henri, me rappellent ce merveilleux moment de ma vie. ●

Références

- [1] MONGE Henri : République de L'Équateur : levés cartographiques du versant oriental des Andes, IGN mars 1976
- [2] GUICHARD Hervé : *Interprétation des observations géodésiques et application au cas de la mission IGN en Équateur*- Bulletin d'information IGN n°30, 1975
- [3] LAIGRE Jean-Yves , CHABOUSSANT Jean-Marie : *Mission en Équateur* - Géorama n° 3, IGN octobre 1975
- [4] GUICHARD Hervé : *Réalisation d'une nouvelle chaîne géodésique de premier ordre sur le versant oriental des Andes équatoriennes et travaux annexes* - BI de l'IGN n° 31 - avril 1976

Couplage de mesures GNSS et inertielles pour de la navigation pédestre dans les bâtiments

■ Sylvain CHABLE – Valérie RENAUDIN

Ce travail de fin d'étude, réalisé dans le laboratoire GEOLOC de Nantes, et dirigé par Valérie Renaudin au sein de l'institut français des sciences et technologies des transports (IFSTTAR), s'inscrit dans l'une des deux thématiques principales du laboratoire : la géolocalisation nomade pour la mobilité multimodale. Cet axe vise notamment à concevoir des algorithmes de géolocalisation pour le voyageur à pied.

MOTS-CLÉS

Navigation pédestre, capteurs inertielles, récepteur GPS, différence temporelle de phase, méthode strapdown, couplage

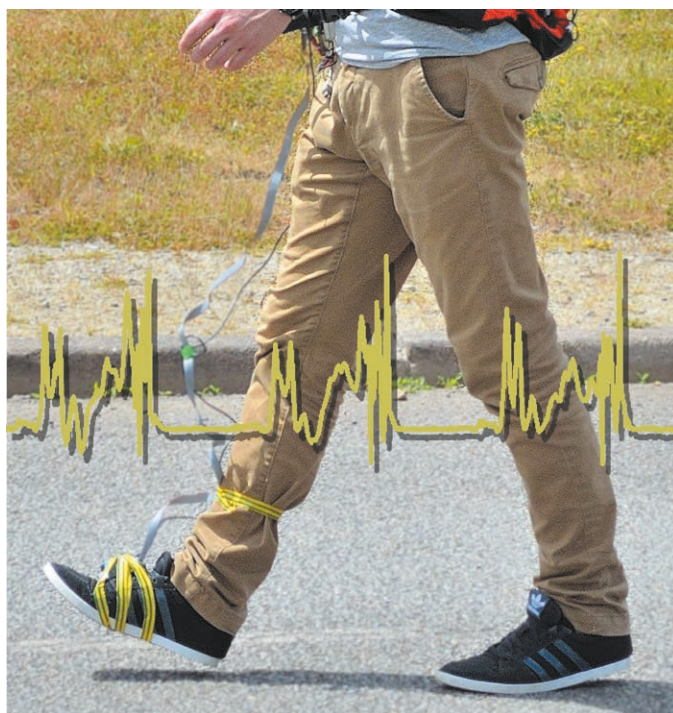
Contexte

Le positionnement des piétons diffère beaucoup de celui des véhicules routiers. Non seulement, il est difficilement prévisible, ce qui empêche d'utiliser, comme pour les véhicules, des techniques de type "Map matching" mais en plus, le piéton emprunte des chemins dans des environnements très hétérogènes et difficiles d'accès pour le positionnement par satellite.

Ce projet s'intéresse au positionnement des piétons à l'intérieur de bâtiments. Connaître sa position dans ce type d'environnement peut permettre de se déplacer et de suivre un itinéraire comme par exemple dans les musées, les aéroports ou bien les gares. La position du piéton intéresse également les acteurs du marketing, afin de cibler les clients à proximité des produits [1]. Ces applications peuvent également intéresser les domaines du secours et de la sécurité [1].

Des systèmes de navigation en intérieur existent mais leurs performances sont peu ou mal connues. Ce projet a pour finalité de calculer précisément la trace des piétons de façon autonome afin de

Figure 1. Une centrale inertielle et magnétique et un récepteur GNSS sur le pied (Source personnelle).



fournir une solution de référence pour qualifier les divers systèmes de navigation commercialisés.

Une première partie de ce projet a été réalisée en 2014 [2]. Elle a permis d'implémenter une solution de positionnement dynamique avec des capteurs inertiels situés fixement sur le pied (Figure 1). Afin de limiter la propagation des erreurs sur la position du piéton due à l'importante dérive de ce type de capteur, les caractéristiques de la marche ont été exploitées.

Cette seconde partie vise à ajouter les mesures GNSS, qui, en apportant une information de vitesse, permettront de corriger la dérive des capteurs et ainsi améliorer le positionnement du piéton en intérieur.

Rappels théoriques

Afin d'obtenir les meilleures performances possible de calcul de vitesse,

deux types d'observations GNSS ont été utilisés :

- la mesure de fréquence Doppler, qui est un décalage de fréquence entre l'onde émise par le satellite et celle reçue par le récepteur au sol. Elle apporte une information de vitesse du récepteur.
- la mesure de différence temporelle de phase ou TDCP (Time Differenced Carrier-Phase), qui donne également une information de vitesse lorsque l'on soustrait deux mesures de phases issues d'un même satellite entre deux instants.

Analyse de la vitesse calculée par GNSS

■ Relation entre les observables et la vitesse

L'équation reliant la mesure Doppler provenant du satellite i à la vitesse du



récepteur GNSS est donnée par l'équation suivante [3] :

$$f_{D_i} = -\frac{1}{\lambda} \mathbf{e}_{R_i}^{S_i} (\mathbf{v}_{S_i} - \mathbf{v}_R) + \frac{1}{\lambda} c \dot{\delta t} + \eta_{f_{D_i}} \quad (1)$$

Où :

λ : Longueur d'onde de la porteuse du signal (m)

$\mathbf{e}_{R_i}^{S_i}$: Vecteur unitaire le long de la ligne de visée (m)

\mathbf{v}_{S_i} et \mathbf{v}_R : Vitesses du satellite et du récepteur (m/s)

$c \dot{\delta t}$: Dérivée d'horloge du récepteur GNSS (m/s)

$\eta_{f_{D_i}}$: Bruit thermique du récepteur GNSS (Hz).

L'équation reliant la mesure de TDCP sur le satellite i à l'instant k à la vitesse du récepteur GNSS est donnée par l'équation suivante [3] :

$$\frac{\lambda \Delta \phi_{i,k}}{\Delta t} = \frac{\Delta S - \Delta G - c \Delta dT_k + \Delta \eta_{i,k}}{\Delta t} - \mathbf{e}_{R_k}^{S_i} \mathbf{v}_R \quad (2)$$

$$\Delta S = \mathbf{e}_{R_k}^{S_{i,k}} \mathbf{x}_{S_{i,k}} - \mathbf{e}_{R_{k-1}}^{S_{i,k-1}} \mathbf{x}_{S_{i,k-1}} \quad (\text{m}).$$

$$\Delta G = \mathbf{e}_{R_k}^{S_{i,k}} \mathbf{x}_{R_k} - \mathbf{e}_{R_{k-1}}^{S_{i,k-1}} \mathbf{x}_{R_{k-1}} \quad (\text{m}).$$

Où :

\mathbf{x}_{R_k} : Position du récepteur à l'instant k (m)

$\mathbf{x}_{S_{i,k}}$: Position du satellite i à l'instant k (m).

$\frac{c \Delta dT_k}{\Delta t}$: Différence temporelle de l'erreur d'horloge du récepteur GNSS à l'instant k (m/s).

$\frac{\Delta \eta_{i,k}}{\Delta t}$: Différence temporelle du bruit thermique du récepteur GNSS à l'instant k pour la mesure du satellite i (m/s).

Δt correspond à l'inverse de la fréquence d'acquisition du récepteur GNSS, ici égal à 5 Hz donc $\Delta t = 0.2$ s.

■ Évaluation théorique des erreurs sur l'estimation de la vitesse par GNSS

Certaines erreurs ont un faible impact sur la mesure Doppler et sur celle de la TDCP. C'est le cas des erreurs atmosphériques ainsi que des erreurs d'horloge des satellites. Cependant, il existe une erreur dont l'impact est difficile à observer : l'erreur de multitrajet. Intéressons-nous à l'effet de cette erreur sur la mesure Doppler. Un signal GNSS est entaché d'un multitrajet lorsque le trajet du signal, entre le satellite et le récepteur, ne se fait pas de manière directe (Figure 2).

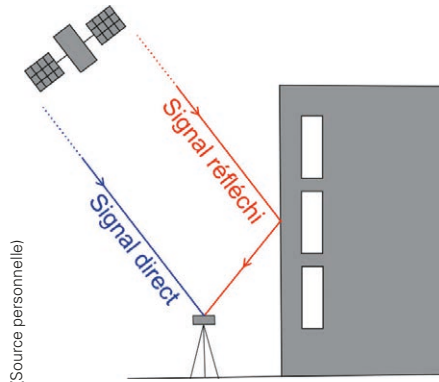


Figure 2. Signal direct et signal réfléchi.

La formule de la mesure Doppler modélise la vitesse radiale entre le satellite et le récepteur le long de la ligne de visée (1). Cette ligne dépend de l'angle d'élévation et d'azimut du satellite. Or, lorsque le signal Doppler est réfléchi, les angles d'élévation et d'azimut sont modifiés. On peut simuler ces changements d'angle par une perturbation sur ces derniers. En exprimant la formule de la mesure Doppler (1) en fonction de l'azimut α et de l'élévation β dans le référentiel de navigation, c'est-à-dire avec les vitesses exprimées selon les composantes N (North), E (East) et D (Down), on obtient la formule suivante :

$$f_{D_i} = -\frac{1}{\lambda} ((v_{S_N}^n - v_{R_N}^n) \cos \alpha \cos \beta + \dots \\ (v_{S_E}^n - v_{R_E}^n) \sin \alpha \cos \beta + (v_{S_D}^n - v_{R_D}^n) \sin \beta) + \dots \quad (3)$$

Maintenant, ajoutons une perturbation seulement sur l'élévation ($\delta\beta$) et analysons son effet. La formule de Taylor à l'ordre 1 est utilisée comme approximation au voisinage de l'angle d'élévation afin de simplifier les calculs :

$$\cos(\beta + \delta\beta) \approx \cos \beta - \sin \beta \cdot \delta\beta \\ \sin(\beta + \delta\beta) \approx \sin \beta + \cos \beta \cdot \delta\beta \quad (4)$$

Après avoir intégré la perturbation à l'équation (3), la partie de la mesure q liée à la perturbation sur l'élévation est isolée :

$$q_{\delta\beta} = \frac{1}{\lambda} [(v_{S_N}^n - v_{R_N}^n) \cos \alpha \sin \beta + \dots \\ (v_{S_E}^n - v_{R_E}^n) \sin \alpha \sin \beta + \dots \\ (v_{S_D}^n - v_{R_D}^n) \sin \beta \cos \beta] \delta\beta \quad (5)$$

En faisant varier la perturbation sur l'angle d'élévation ($\delta\beta$) de 0 à 10°, on se rend compte de l'impact important de la perturbation, même petite, sur la mesure Doppler.

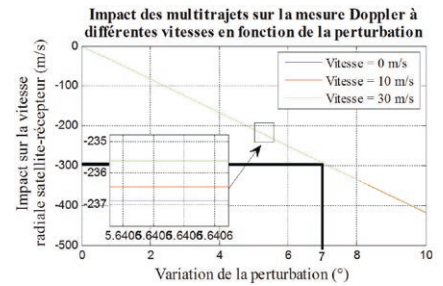


Figure 3. Simulation de l'impact d'un multitrait sur une mesure de fréquence Doppler avec différentes vitesses du récepteur (satellite PRN5 : $az=-294.3^\circ$, $él=61.5^\circ$, $v_N=-2160$ m/s, $v_E=1484$ m/s, $v_D=-913$ m/s).

En effet, pour une perturbation de 7° (Figure 3), la mesure est affectée par une erreur de 300 m/s sur la vitesse radiale satellite-récepteur, soit un changement de fréquence d'environ 1 600 Hz ($\lambda f_D = v_{rad}$). En outre, on remarque que la vitesse du récepteur a très peu d'influence sur l'impact du multitrait. Par exemple, pour une perturbation de 5.6°, l'impact est de -236.9 m/s lorsque la vitesse du récepteur est nulle et de 235.8 m/s pour une vitesse de 30 m/s.

Étant donné l'importance de l'impact des multitraits sur la mesure Doppler, une attention particulière a été accordée à ces derniers lors de l'analyse des signaux GNSS dans le calcul de la vitesse du récepteur. Une méthode de détection et d'exclusion des mesures aberrantes (FDE : *Fault Détection and Exclusion*) a été implémentée afin de ne pas contaminer la solution par les multitraits.

■ Caractérisation expérimentale de la vitesse par GNSS

Afin de déterminer la vitesse du récepteur et de caractériser les erreurs de manière expérimentale, trois expériences en statique (récepteur au sol) et deux en dynamique (récepteur dans la main) ont été réalisées dans des environnements différents (dégagé, urbain et indoor) à partir de la mesure Doppler puis à partir de la mesure de TDCP.

Le matériel utilisé pour l'étude pratique est un récepteur GNSS Ublox ANN-MS de type HSGPS (*High Sensitivity GPS*). Situé dans la gamme bas-coût, ce récepteur mono-fréquence observe seulement la constellation GPS ($f = 5$ Hz).



Figure 4. Dispositif expérimental. Une centrale inertielle et magnétique et un récepteur GNSS dans la main. Un récepteur GNSS géodésique avec antenne sur la tête qui fournit la vitesse de référence calculée en mode différentiel.

Dans la première approche d'analyse de la vitesse estimée par mesures GNSS, la méthode des moindres carrés est utilisée à chaque instant. Quatre inconnues doivent être estimées : 3 inconnues pour le vecteur vitesse et une inconnue liée à l'erreur d'horloge du récepteur. Afin d'optimiser le calcul de la vitesse par GNSS, un modèle de variance inversement proportionnel au SNR (*Signal to Noise Ratio*), et adapté aux erreurs de mesures de l'appareil [4] a été créé (Figure 5) pour pondérer chacune des observables.

Le calcul de la vitesse par GNSS en mode statique a permis d'analyser simplement les performances des deux observables sur des périodes de 5 à 10 minutes. En effet, dans cette

situation, la vitesse de référence est la vitesse nulle.

En environnement dégagé, aucun multitrajet n'est observé. Les erreurs moyennes sur les vitesses calculées (moyenne des vitesses sur la durée de l'acquisition) avec la fréquence Doppler et la mesure TDCP sont chacune de l'ordre du centimètre (Tableau 1). La notion d'erreur moyenne est intéressante du point de vue physique mais ne permet pas, dans notre cas, de

comparer les deux types d'observations GNSS étant donné leur similarité. En revanche, l'analyse des écarts types (ou SD : *standard deviation*), pour chacune des observables sur la durée d'acquisition, montre que le calcul de la vitesse avec la mesure TDCP (écart type moyen suivant les 3 composantes de 0.070 m/s) est 2 à 3 fois meilleur (Tableau 1) que celui fait avec la mesure Doppler (écart type moyen de 0.200 m/s).

Concernant l'expérimentation en environnement urbain, où l'on doit faire face aux masques et multitrajets, les vitesses atteignent 10 m/s ! L'application du FDE supprime les mesures entachées de multitrajets et apporte des résultats du même ordre de grandeur que ceux de l'expérimentation précédente (Figure 6).

De nouveau, la mesure TDCP offre de meilleures performances dans le calcul de vitesse (écarts-types 3 à 4 fois plus faible).

Les résultats du calcul de vitesse en environnement intérieur sont décevants. Les quelques signaux reçus, dont les SNR sont très faibles (< 20 dB), sont entachés de multitrajets et varient forte-

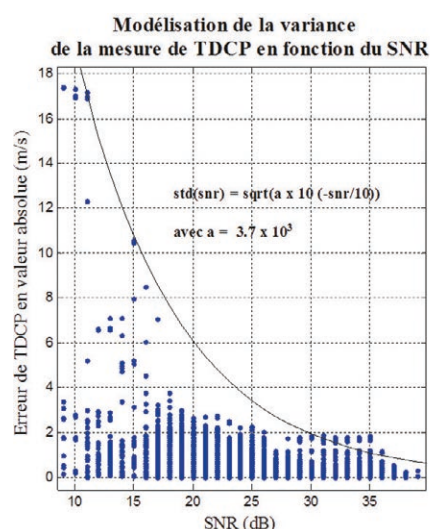


Figure 5. Modèle de pondération des mesures de TDCP.

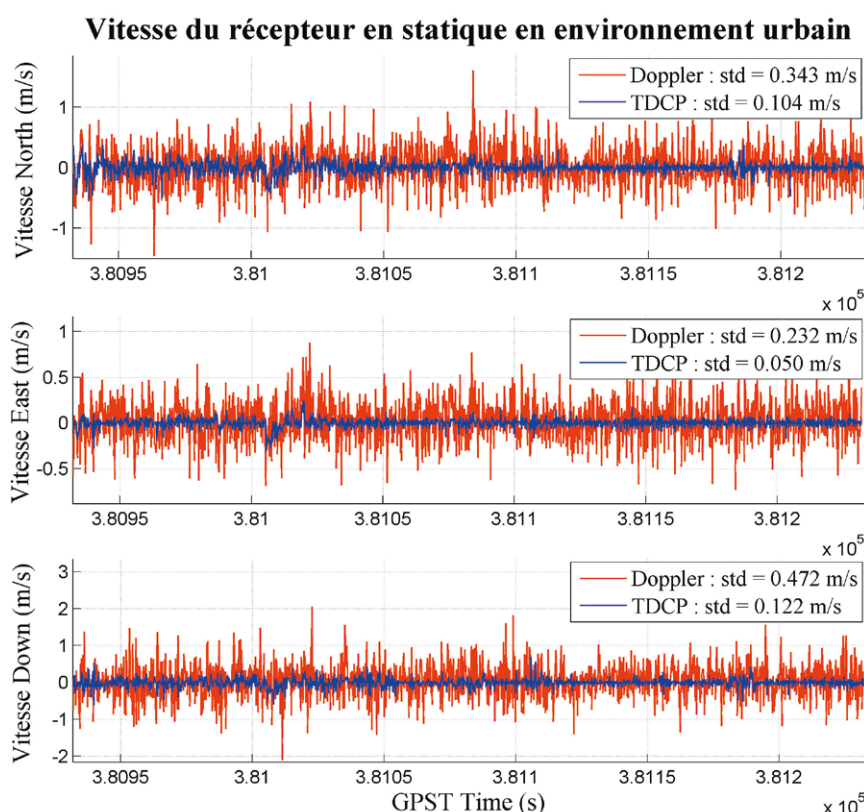


Figure 6. Vitesse du récepteur, calculée en mode statique, en milieu urbain, par mesures de fréquence Doppler et TDCP.

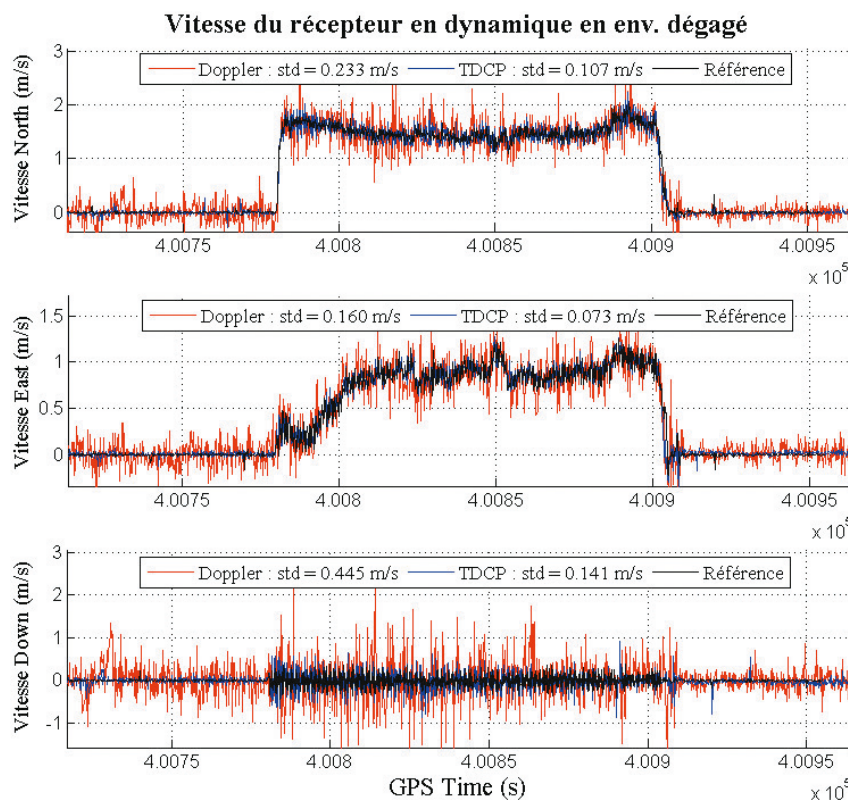


Figure 7. Vitesse du récepteur, calculée en mode dynamique, en milieu dégagé, par mesures de fréquence Doppler et TDCP.

qu'avec la mesure Doppler. Par conséquent, c'est la mesure de TDCP qui est exploitée par la suite dans le système de navigation hybride INS/GNSS.

Système de navigation hybride INS/GNSS sur le pied

Le filtre de positionnement dynamique existant utilise seulement les observations des capteurs inertiels (gyromètre et accéléromètre) et magnétique de type MEMS [2]. La mécanisation du filtre est de type "strapdown". Elle consiste à utiliser les observations de la centrale inertielle pour calculer directement par double intégration la position et par simple intégration la vitesse du pied selon les équations de Newton. De plus, les angles d'attitudes, représentant la matrice de rotation entre le repère "body" (celui de la centrale inertielle) et le repère de navigation (celui de la carte locale), sont obtenus par intégration des observations du gyromètre.

Afin de limiter la propagation des erreurs sur la position du piéton due à l'importante dérive de ce type de capteur et à la mécanisation du filtre, plusieurs corrections liées au mécanisme de la marche (ZUPT : Zero velocity UPdaTe), au champ magnétique (QSF : Quasi Static Field) et à la variation de l'accélération (QSA : Quasi

ment dès l'entrée dans le bâtiment. Ils sont rejetés par le filtrage FDE et donc non exploités dans les calculs.

Le calcul de la vitesse par GNSS a également été effectué en situation dynamique (dégagé et urbain) pour analyser le comportement du calcul de la vitesse en mouvement.

La vitesse de référence est obtenue en effectuant la différence temporelle des positions calculées par le récepteur GNSS géodésique en mode différentiel (en noir : Figure 7). La différence entre la vitesse de référence et celle calculée par le récepteur GNSS à chaque instant donne l'erreur sur la vitesse. Comme lors de l'acquisition en mode statique, l'analyse des erreurs moyennes et écarts-types sur l'erreur de vitesse calculée en mode dynamique montre que la mesure de TDCP offre de meilleures performances comparée aux mesures de fréquences Doppler (1.5 à 3 fois meilleurs : tableau 1). Par exemple en environnement dégagé (Figure 7), l'erreur moyenne est du même ordre de grandeur, mais l'écart type de l'erreur de vitesse avec la mesure TDCP suivant la composante Nord (0.107 m/s)

est environ 2 fois moins élevé que celui avec la mesure Doppler (0.233 m/s).

En conclusion, pour ce type de récepteur GNSS, la mesure de TDCP est l'observable donnant les meilleures performances pour le calcul de la vitesse. Les résultats avec la TDCP sont globalement 2 à 3 fois meilleurs

Dynamique du système	Type d'environnement		Fréq. Doppler (m/s)		Mesure TDCP (m/s)		SD_Doppler / SD_TDCP
			SD	Emoy	SD	Emoy	
Statique	Dégagé	N	0.189	0.020	0.066	0.021	2.9
		E	0.133	0.007	0.048	0.010	2.8
		D	0.268	0.021	0.109	0.017	2.5
	Urbain	N	0.343	0.007	0.104	-0.003	3.3
		E	0.232	0.007	0.050	-0.003	4.6
		D	0.472	0.009	0.122	-0.010	3.9
Dynamique	Intérieur		∞		∞		
	Dégagé	N	0.234	0.004	0.107	0.007	2.2
		E	0.159	-0.005	0.073	-0.007	2.2
		D	0.459	0.008	0.141	0.012	3.3
	Urbain	N	0.482	0.103	0.333	0.074	1.4*
		E	0.452	-0.003	0.294	0.008	1.5*
		D	0.863	-0.118	0.663	-0.079	1.3*

Tableau 1. Bilan du calcul de vitesse avec la mesure de fréquence Doppler et différence de phases (TDCP).

*La position mesurée en différentiel (GNSS), servant à calculer la vitesse de référence, est flottante (ambiguïtés non fixées).

Static Acceleration) ont été implémentées [2,7]. L'objectif de la suite du travail est d'intégrer la correction TDCP dans le filtre de Kalman étendu existant et de tester son influence sur la qualité du positionnement en environnement intramuros.

■ Filtre de positionnement dynamique

Le vecteur d'état est composé de 6 paramètres.

$$\mathbf{X}^T = \left(\mathbf{q}_b^{nT} \quad \mathbf{b}_{q_a}^T \quad \mathbf{b}_a^{bT} \quad \mathbf{p}^{nT} \quad \mathbf{v}^{nT} \quad c \frac{\Delta dT^T}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

\mathbf{q}_b^n : Quaternion des angles d'attitude du repère body par rapport au repère de navigation

\mathbf{b}_{q_a} : Biais du quaternion du gyromètre

\mathbf{b}_a^b : Biais de l'accéléromètre dans le repère body

\mathbf{p}^n : Position du pied dans le repère de navigation

\mathbf{v}^n : Vitesse du pied dans le repère de navigation

Les données angulaires (rotations, mesures gyrométriques et biais du gyromètre) sont exprimées sous la forme de quaternions. L'utilisation de ces derniers permet de s'affranchir des problèmes de singularités lors du passage entre les matrices de rotation et les angles d'Euler [7].

Les modèles d'évolution des paramètres sont [2] :

$$\mathbf{q}_b^n(t+dt) = \mathbf{q}_b^n(t) \otimes \mathbf{q}_{\omega}^n(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{p}^n(t+dt) = \mathbf{p}^n(t) + \mathbf{v}^n(t)dt + \frac{1}{2} \mathbf{a}^n(t)dt^2 \quad (8)$$

$$\mathbf{v}^n(t+dt) = \mathbf{v}^n(t) + \mathbf{a}^n(t)dt \quad (9)$$

Où :

\mathbf{q}_{ω}^n : Quaternion du gyromètre.

\mathbf{a}^n : Accélération dans le repère de navigation.

Les évolutions des biais du quaternion du gyromètre, celui de l'accéléromètre et la différence temporelle de l'erreur d'horloge du récepteur sont modélisés par des marches aléatoires [7]. La matrice de mesure de la correction TDCP, qui lie le vecteur d'état à la mesure TDCP, est déduite de l'équation de modélisation de la mesure de TDCP (2) [8]. Elle corrige directement la vitesse et par corrélation tous les autres paramètres.

■ Analyse expérimentale

L'expérimentation commence par une phase en environnement dégagé (Figure 8), faisant un aller-retour du Nord vers le Sud avec trois phases statiques : au début, au milieu et à la fin. Ensuite celle-ci se poursuit en environnement intérieur (Figure 9) avec un tour dans les couloirs d'un bâtiment, une sortie du bâtiment puis une nouvelle entrée dans le bâtiment avec un tour dans les couloirs et enfin une dernière sortie.

Le trajet total correspond à environ 1 km de marche avec la centrale inertielle et magnétique fixée au pied.

Un récepteur GNSS couplé avec une station de base et dont l'antenne est située sur la tête du piéton fournit la trajectoire de référence (en vert sur la Figure 8).

En environnement dégagé (Figure 8), beaucoup d'observations GNSS sont disponibles et on observe qualitativement l'apport bénéfique de la correction TDCP sur le cap. Sur l'aller, la dérive de la position est réduite par deux. En effet, durant la phase statique entre l'aller et le retour, l'erreur en position est d'environ 10 m sans la correction TDCP et de 5 m avec celle-ci. Sur le retour (vers le Sud), la position avec la correction TDCP se dégrade. Cependant l'erreur en position avec la correction TDCP, comparée à celle sans, reste inférieure d'environ 6 m au moment de la dernière phase statique. L'erreur planimétrique avec la correction TDCP atteint tout de même 20 mètres au bout de 12 minutes et 26 mètres sans la correction TDCP.

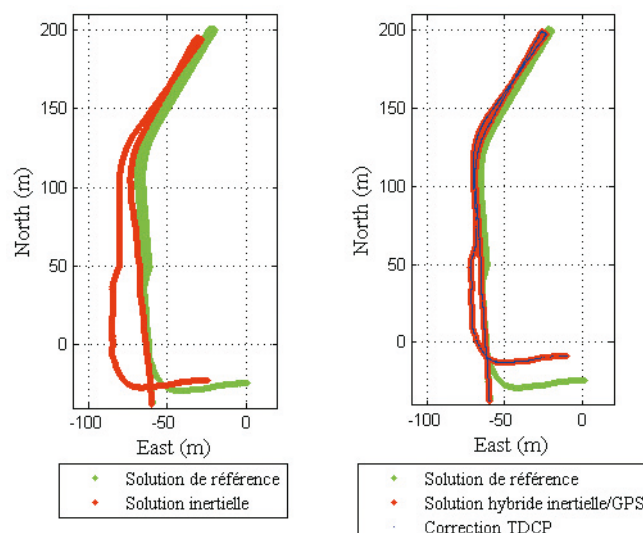


Figure 8. Trajectoires calculées en environnement dégagé avec (à droite) et sans (à gauche) la correction TDCP.

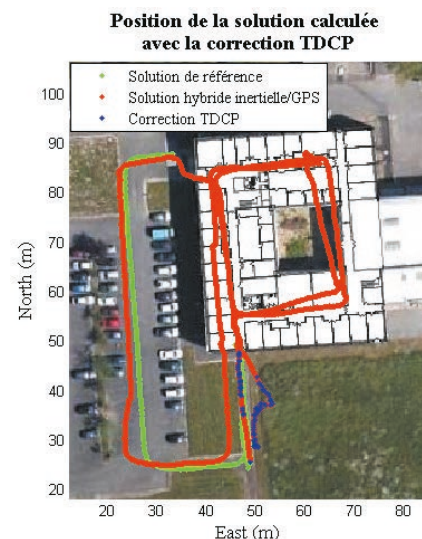


Figure 9. Position de la solution calculée en environnement intérieur avec et sans la correction TDCP (Source IFSTTAR).

Du point de vue qualitatif, les positions calculées avec et sans la correction TDCP sont très proches en environnement indoor. Cependant, en étudiant les écarts en position en extérieur, on constate que la position calculée avec la correction TDCP est plus proche de la référence d'environ 40 cm que la position calculée sans cette correction. On note aussi que des observations GNSS biaisées ont été exploitées à l'intérieur (Figure 9) perturbant la solution.

Au niveau quantitatif, les densités de probabilité de l'erreur planimétrique, dans les cas où la correction TDCP est utilisée (en bleu : Figure 10) et où elle n'est pas utilisée (en rouge), illustrent bien l'apport significatif de la correction TDCP. En effet, environ 50 % des erreurs sont inférieures à 4 m dans le

Densité de probabilité de l'erreur planimétrique avec et sans la correction de TDCP

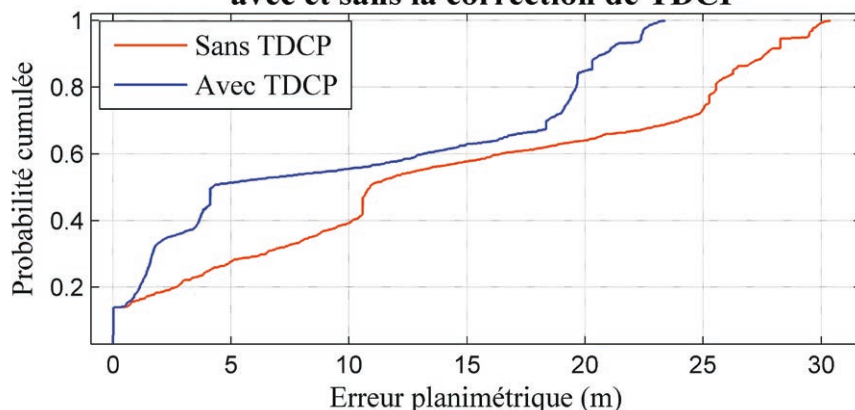


Figure 10. Densité de probabilité de l'erreur planimétrique.

cas où la correction TDCP est appliquée, c'est seulement 25 % des données qui le sont dans le cas où elle n'est pas appliquée, soit deux fois moins. De plus, les erreurs atteignent jusqu'à 31 m sans la correction TDCP et seulement 23 m avec la correction, ce qui représente une diminution de l'erreur maximale de 26 %.

Globalement, les corrections issues de la mesure de phase GNSS (TDCP) réduisent la dérive en position grâce à une meilleure estimation de la vitesse, mais également des biais accélérométriques et gyrométriques [8]. Les larges erreurs planimétriques encore observées encouragent à rechercher de nouvelles pistes d'amélioration.

Conclusion et perspectives

Dans un premier temps, une étude théorique a montré l'important impact des multitrajets sur la qualité des observations GNSS. Des outils ont été exploités pour les détecter et les supprimer. Dans un second temps, l'analyse du calcul de vitesse par signaux GNSS a permis de comparer les performances de précision et de fiabilité basées sur deux mesures : fréquence Doppler et différence de phase (TDCP). Offrant les meilleures performances, c'est la mesure de TDCP qui fut retenue. Enfin, dans un troisième temps, un filtre de positionnement dynamique INS/GNSS, qui intègre la vitesse GNSS, a été conçu. Des fortes corrections sur la vitesse ont été observées grâce au filtre. Elles ont permis de limiter la dérive de la posi-

tion au cours du temps et de corriger par corrélation les biais accélérométriques et gyrométriques. Cependant, à ce stade des travaux, aucune mesure GNSS n'a pu être exploitée en intérieur. En conclusion, l'apport de la mesure de TDCP est significatif surtout en extérieur pour estimer les erreurs des capteurs inertiels avant de pénétrer dedans.

Notons qu'une approximation importante est effectuée actuellement dans le filtre. En effet, la correction TDCP apporte une information sur la vitesse moyennée sur 0.2 s (fréquence d'acquisition du GNSS : 5 Hz). Or la vitesse est calculée dans le filtre à une fréquence de 100 Hz. Donc une des perspectives principales est d'intégrer dans le vecteur d'état la vitesse moyennée afin que la correction TDCP puisse être appliquée directement sur ce paramètre. La seconde perspective est de continuer les acquisitions en intérieur afin d'exploiter les mesures GNSS pour que des corrections puissent s'effectuer également en intérieur. ●

Remerciements

Je remercie vivement Valérie Renaudin, directrice du laboratoire GEOLoc et maître de stage, Jérôme Verdun, professeur référent à l'ESGT et Christophe Combettes, doctorant à GEOLoc, pour la bonne réalisation de ce travail.

Contacts

Sylvain CHABLE sylvain.chable@orange.fr
Valérie RENAUDIN valerie.renaudin@ifsttar.fr

Bibliographie

- [1] : Larousserie, D. (2013). *Naviguer dans les murs*. Consulté le 22/08/2015, sur Le Monde, <http://www.lemonde.fr>.
- [2] : Marchand, C. (2014). *Evaluation d'une solution de référence autonome pour de la navigation pédestre dans les bâtiments*. Projet Master: INSA Strasbourg.
- [3] : Veilleux, J.-P. (2006). *Détermination précises des vitesses et des accélérations d'un athlète par mesures GPS à hautes fréquences*. Thèse de Master: UNIVERSITÉ LAVAL, QUÉBEC.
- [4] : Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation system second edition*.
- [5] : Durand, S. (2014). *Cours de topométrie de précision 2^e année ESGT*.
- [6] : Hartinger, B. (1999). *Variances of GPS Phase Observations : The SIGMA Model*. GPS Solutions, 35-43.
- [7] : Renaudin Valérie, Combettes Christophe (2014). *Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)-Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation*. Sensors.
- [8] : Chable, S. (2015). *Couplage de mesures GPS et inertielles pour de la navigation pédestre dans les bâtiments*. Projet Master: ESGT Le Mans.

ABSTRACT

Developing a precise estimation system of pedestrian tracks inside buildings in order to qualify others navigation methods is targeted in this project. The aim of this contribution is to improve the existing solution thanks to novel GNSS observations. GNSS based velocity estimate was studied using two different observations: Doppler frequency and Time-Differenced Carrier-Phase (TDCP). Following a performance comparison of the velocity estimated with both observables, the TDCP was chosen for the hybridization filter. The contribution of GNSS TDCP is found to be significant on the existing solution. Achieving a better biases estimate improves the overall quality of pedestrian foot tracks estimation.



Qualification de la précision de données topographiques issues d'acquisitions par méthode scanner laser dynamique ferroporté

■ Audrey JACQUIN

SNCF Réseau gère un réseau ferroviaire qui s'étend sur 33 000 kilomètres de lignes, représentant l'un des réseaux les plus denses d'Europe en termes de circulation. Afin d'assurer la sécurité des biens et des personnes, la surveillance de l'ensemble du Réseau Ferré National est un enjeu majeur. La cartographie mobile apparaît donc comme une solution évidente, offrant une productivité élevée et des conditions de travail idéales d'un point de vue de la sécurité. En effet, le milieu ferroviaire est un environnement à fortes contraintes en termes de sécurité et l'emploi d'une technologie permettant de limiter l'intervention directe du personnel sur les voies est un avantage certain. Cet article présente l'étude de précision qui a été menée sur le scanner laser dynamique acquis par SNCF Réseau à l'été 2013, dans le but de valider – ou non – son utilisation pour la surveillance du réseau à condition qu'il permette d'atteindre la classe de précision de 5 centimètres fixée par le cahier des charges.

■ MOTS-CLÉS

Scanner laser dynamique,
Scanner laser statique,
Points d'appui,
Exactitude, Contrôle
qualité, Arrêté de 2003

avons premièrement déterminé la précision absolue pouvant être atteinte par ce scanner laser dynamique ferroporté et défini les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir. Puis nous avons mené une réflexion visant à mettre en place une méthode de contrôle qualité des données, conformément à l'arrêté de 2003 portant sur les classes de précision. [Kasser, 2003].

Relevés par méthode scanner laser dynamique ferroporté

■ Le système VMX-450 Rail

Le VMX-450 Rail est un système mobile qui a été adapté au milieu ferroviaire à différents niveaux. La distinction majeure avec le modèle routier concerne les scanners lasers, qui disposent d'une sensibilité élevée permettant d'acquérir des données sur les rails puisqu'en temps normal leur surface très réfléchissante ne permet pas d'avoir un signal rétrodiffusé suffisamment important. Néanmoins, les données produites sont davantage bruitées puisque les scanners acquièrent désormais des points sur les surfaces ayant une moins bonne réflectance.

Les données sont acquises par le scanner laser dynamique, fixé sur un wagon plat et transporté par un locotracteur dans lequel se trouve l'alimentation du système ainsi que le dispositif de pilotage de l'appareil et de stockage des données, (Cf. Figure 1).

Le système est composé de deux scanners laser Riegl VQ-450 qui effectuent les mesures des voies et des

Contexte

La division Assistance Travaux et Topographie (ATT) de la direction Ingénierie et Projets de SNCF Réseau est chargée de réaliser les levés topographiques 3D concernant les voies, les gares, les ouvrages d'arts, etc. Elle est en charge de déployer des techniques émergentes en complément de la topographie traditionnelle afin de répondre rapidement aux missions de grandes échelles qui lui sont confiées. La division a donc fait l'acquisition d'un scanner laser dynamique ferroporté de type Riegl VMX-450 Rail.

Bien que les scanners laser dynamiques aient déjà fait leurs preuves en milieu routier et que leur précision ait déjà été évaluée pour cette utilisation [Haala et al., 2008], les scanners laser dynamiques ne sont montés que depuis peu sur rail. Le milieu ferroviaire représente un environnement

contraignant pour les interventions, ce qui en fait un monde à part et plus complexe (présence des caténaires qui peuvent engendrer des perturbations électromagnétiques, faibles variations de parcours, faible réflectance des rails, etc.). Ces phénomènes ne sont pas usuellement pris en compte dans la modélisation rigoureuse des erreurs impactant des systèmes LiDAR utilisés en routier et en aérien afin d'en déduire leurs précisions [Glennie, 2007]. Une étude de précision était donc nécessaire, la précision relative du système a été évaluée par [Choquart, 2014]. Il en ressort que le système répond aux exigences de mesures et de contrôles des gabarits SNCF et confirme la précision relative annoncée par le constructeur, à savoir ± 5 millimètres.

Ce projet de fin d'étude avait pour objectif d'étudier le positionnement absolu des données acquises. Nous



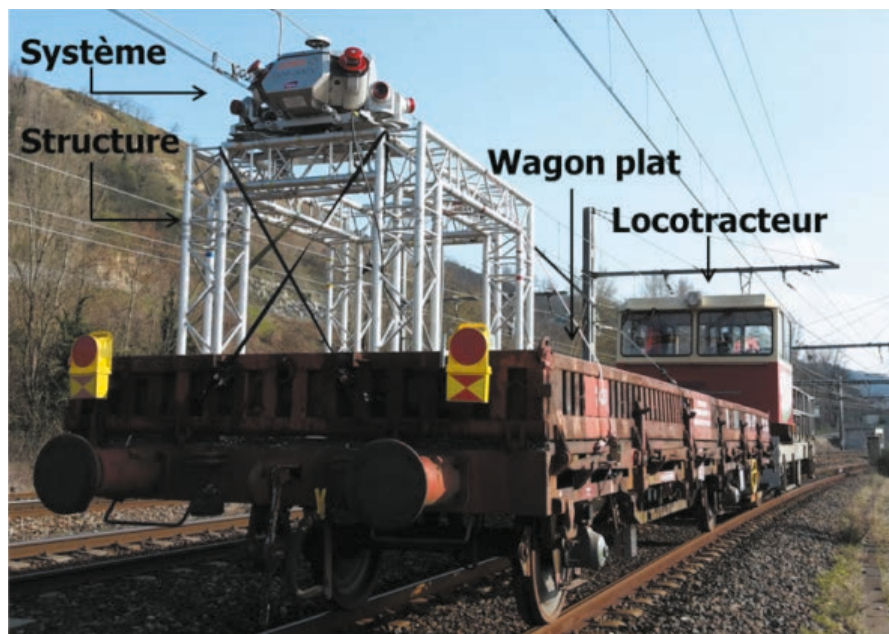


Figure 1. Système d'acquisition monté sur un wagon plat.



abords avec une configuration en forme de "X" afin de minimiser les zones masquées (Cf. Figure 2), de quatre caméras permettant une meilleure analyse du nuage de points et de capteurs dédiés à la trajectographie. Parmi ces capteurs, une antenne GNSS Trimble et une centrale inertielle Applanix agissent de façon complémentaire. Les mesures GNSS déterminent la position du système et la centrale inertielle mesure ses accélérations et les angles d'attitudes à une fréquence plus élevée, permettant de densifier la trajectoire et de palier les coupures GNSS. De plus, un odomètre optique adapté au wagon détecte les phases d'arrêts et de mouvements, permettant de compenser une partie des dérives de la centrale inertielle. Les acquisitions sont réalisées à une

vitesse maximale de 60 km/h afin de respecter une densité d'environ 500 points par mètre carré à une distance de 20 mètres des scanners laser.

■ Géo-référencement des données LiDAR

1. Calcul de la trajectoire :

Le calcul de la trajectoire est une étape cruciale dans le traitement des données puisque toutes les étapes qui suivent en dépendent. Elle est calculée en post-traitement à l'aide du logiciel POSpac MMS d'Applanix qui propose différentes méthodes de calculs, en s'appuyant sur les stations de base mises en place pendant l'acquisition ou sur les stations permanentes du réseau GNSS Permanent (RGP), disponibles à proximité de la zone de levé.



Figure 2. Représentation de la configuration des scanners laser VQ-450 en forme de "X".

2. Combinaison des données LiDAR avec la trajectoire :

Les données LiDAR sont ensuite géo-référencées en fusionnant le nuage de points avec la trajectoire calculée à l'aide du logiciel RiPROCESS de la société Riegl.

3. Recalage absolu des données :

Afin d'augmenter la cohérence des données avec la réalité terrain et de respecter la classe de précision absolue de 5 centimètres fixée par le cahier des charges pour les relevés ferroviaires, on réalise un recalage absolu des données à partir de points d'appui. La trajectoire et le nuage de points sont contraints sur des points d'appui dont les coordonnées (centre de la cible) sont déterminées par méthode RTK classique améliorée, c'est-à-dire que nous réalisons un "filtrage et moyenne de positions RTK" qui se rapproche de la méthode décrite dans [Legros et al., 2012]. Dans notre cas, on acquiert un volume d'observations plus important qu'en RTK classique en réalisant 4 observations de 30 secondes à 1 hertz, afin de fiabiliser les résultats en éliminant les observations aberrantes et en moyennant les positions obtenues. Le mobile est fixé sur un tripode pour plus de stabilité et de précision. L'erreur de centrage de la bulle de la nivelle sphérique est corrigée en pivotant la canne de 180° entre chaque période d'observations et à l'issue des deux premières périodes d'observations, la réception des signaux GNSS est coupée afin d'effectuer une nouvelle initialisation (fixation des ambiguïtés entières).

Finalement, nous réalisons des contrôles relatifs et absolus en stationnant des points connus en coordonnées afin de valider la qualité du levé. Nous effectuons le maximum de contrôles possibles en milieu ferroviaire mais les contraintes qu'il impose ne permettent pas d'effectuer une réoccupation sous une constellation GNSS différente ou d'effectuer des sessions d'observations plus longues. Une bonne répartition des points d'appui est nécessaire afin d'assurer un géo-référencement homogène sur l'ensemble de la zone levée. On respectera une certaine disposition des points, à savoir : à intervalles réguliers (selon spécifications), en encadrant

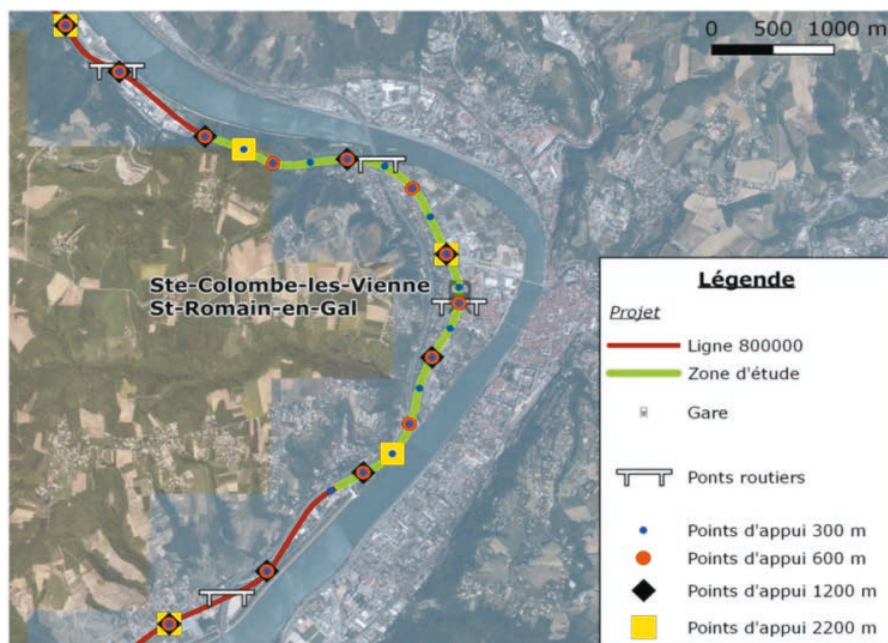


Figure 3. Visualisation de l'environnement de la zone d'étude et de la disposition des points d'appui.

les ouvrages (tunnels, ponts routiers, etc.) et en alternant leur mise en place de part et d'autre des voies.

4. Recalage relatif des données :

Malgré le recalage absolu des données, des écarts peuvent subsister entre les nuages de points acquis dans le sens aller puis retour. La mise en correspondance des nuages se fait par identification semi-automatique de points et géométries homologues dans les deux nuages de points, en planimétrie et en altimétrie. Pour ces étapes, nous utilisons l'appliquet TerraMatch de TerraSolid.

Évaluation de la précision absolue des données

Afin d'exploiter le potentiel de cette technologie, il est nécessaire d'évaluer la précision du géo-référencement des données par rapport à la réalité terrain. Dans le cadre de notre étude, le cas spécifique des tunnels n'a pas été traité pour des raisons de contraintes terrains (il n'a pas été possible d'interrompre la circulation des trains, dispositif obligatoire pour travailler en tunnel).

■ Échantillon de données

Pour réaliser cette étude, nous avons effectué des acquisitions en région

Rhône-Alpes et nos expérimentations se sont concentrées sur une portion de 5 km de la ligne 800 000 (Cf. figure 3). Elle offre un environnement varié avec la présence entre autre de ponts routiers et d'une zone urbaine ce qui permet de fournir des résultats représentatifs de la plupart des levés et non d'un cas idéal. Les acquisitions ont été réalisées dans les deux sens de circulation afin d'effectuer les observations sous une constellation GNSS différente et de compenser les éventuels masques présents dans le nuage de points en cas de croisement avec un train. Dans la zone d'étude, des points d'appui ont été disposés à intervalle de 300 m. Cet intervalle représente la densité la plus importante de points que nous étions capable de mettre en place compte tenu des contraintes terrains et économiques.

■ Expérimentations menées

Trajectoire initiale avant recalage

Le calcul de la trajectoire est une étape

cruciale puisque les données LiDAR sont ensuite attribuées à cette trajectoire. Dans un premier temps nous avons évalué la précision de la trajectoire initiale (avant recalage sur points d'appui) en fonction des méthodes de calcul proposées par le logiciel POSpac MMS. Les trajectoires obtenues sont comparées par rapport à une trajectoire de référence qui a été recalée à l'aide de points d'appui à intervalles de 300 mètres et qui est donc plus proche de la réalité terrain. Ces comparaisons ont également permis d'évaluer la fiabilité des indicateurs de précisions estimés par le logiciel POSpac MMS concernant le calcul de la trajectoire. En effet, il est du ressort de l'ingénieur topographe de prendre du recul par rapport aux informations annoncées par les constructeurs et de mettre en place des méthodes de contrôle. Nous avons donc comparé les écarts obtenus entre les trajectoires calculées et la trajectoire de référence, par rapport aux précisions estimées par le logiciel pour les trajectoires calculées.

Trajectoire et nuage de points après recalage

Après avoir mis en évidence la méthode de calcul à privilégier, nous avons évalué la précision de la trajectoire et du nuage de points en fonction du nombre de points d'appui utilisés. La méthodologie consiste à comparer les données contraintes avec des points d'appui à intervalles différents par rapport à des données de référence. Dans un premier temps la trajectoire et le nuage de points contraints avec des points d'appui à intervalles de 300 mètres sont considérés comme étant la vérité terrain et sont pris pour référence. Nous avons évalué la précision des trajectoires et des nuages contraints avec des points d'appui à intervalles de 600 m, 1 200 m et 2 200 m par rapport à ces références.

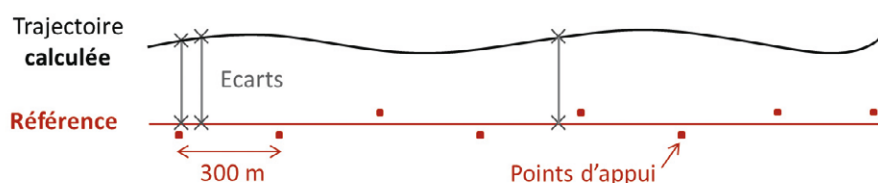


Figure 4. Représentation des écarts entre une trajectoire calculée et celle de référence.

	Planimétrie			Altimétrie		
Intervalle entre points d'appui	600 m	1200 m	2200 m	600 m	1200 m	2200 m
Ecart max (cm)	4,5	4,0	5,3	3,2	3,7	4,0
EMQ (cm)	1,2	1,3	2,2	0,7	1,1	1,8

Tableau 1. Résultats statistiques obtenus entre les trajectoires recalées avec des points d'appui à intervalles différents et la trajectoire de référence.

• **Méthode de comparaison des trajectoires :** Les trajectoires sont comparées par rapport à celle de référence en déterminant les écarts planimétriques puis altimétriques entre deux points acquis au même instant, donc pour chaque période d'observation (Cf. figure 4). Nous pouvons nous baser sur les temps d'acquisition puisque les trajectoires comparées proviennent des mêmes données brutes.

• **Méthode de comparaison des nuages de points :** Les nuages de points sont comparés grâce à la méthode « point à point ». Les écarts entre les nuages de points sont obtenus par calculs de distances d'Hausdorff tronquées à une valeur de recherche maximale fixée par l'utilisateur. Cela permet de quantifier la plus grande dissimilitude entre deux nuages sans pour autant obtenir la valeur maximale des zones de masques. Concrètement, cela consiste à définir pour un point Pn d'un nuage N1, son équivalent Pm dans un nuage N2, en limitant la recherche dans un rayon r autour du point Pn.

Comparaison à des données externes

Finalement, afin de quantifier véritablement la précision absolue des données, une étude comparative à des données externes indépendantes a été réalisée. La donnée de référence est un nuage de points acquis par scanner laser statique, dont le géo-référencement est plus précis que celui du nuage de points dynamique. L'acquisition a été réalisée avec le scanner laser HDS7000 de Leica qui a une classe de précision de 4 millimètres validée sur un banc d'étalonnage SNCF. Dans notre étude, nous quantifions l'exactitude du nuage de points acquis par scanner laser dynamique à partir des écarts en distance mesurés entre ce nuage et le nuage obtenu par scanner laser

statique. Nous employons la méthode de comparaison "point à point" utilisée pour la comparaison entre nuages de points dynamiques.

Résultats obtenus et analyses

Au niveau des trajectoires

Trajectoire initiale avant recalage

Pour l'ensemble des trajectoires calculées selon différentes méthodes (avant recalage à l'aide de points d'appui), les

courbes de précisions estimées par le logiciel POSpac MMS sont similaires et annoncent des précisions (EMQ) de l'ordre de 4 à 5 centimètres. Or, nos expérimentations ont mis en évidence des variations importantes d'EMQ entre les trajectoires calculées et la référence, en fonction de la méthode de calcul employée. De ce fait, on constate qu'on ne peut pas se fier uniquement à ce qu'indique le logiciel pour quantifier la précision de la trajectoire initiale. Les résultats annoncés sont optimistes et donc à prendre avec précaution.

Trajectoire après recalage sur points d'appui

De manière contre-intuitive, les écarts entre les trajectoires calculées avec des points d'appui à intervalles différents et la trajectoire de référence n'augmentent globalement pas de manière significative lorsqu'on augmente

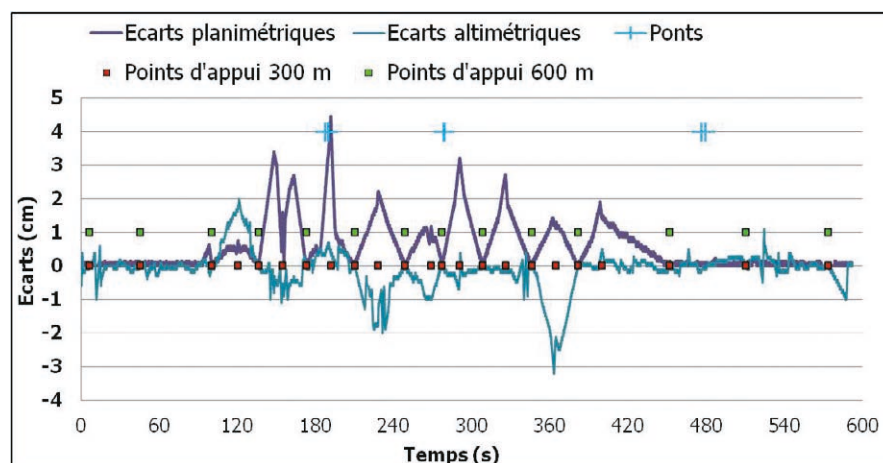


Figure 5. Écarts entre la trajectoire recalée avec des points d'appui à intervalle de 600 m et la trajectoire de référence, en fonction de la répartition des points d'appui.

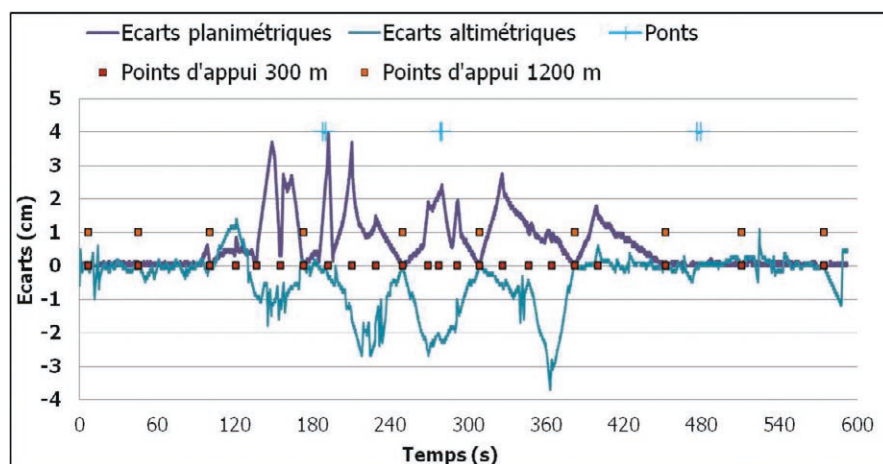


Figure 6. Écarts entre la trajectoire recalée avec des points d'appui à intervalle de 1 200 m et la trajectoire de référence, en fonction de la répartition des points d'appui.

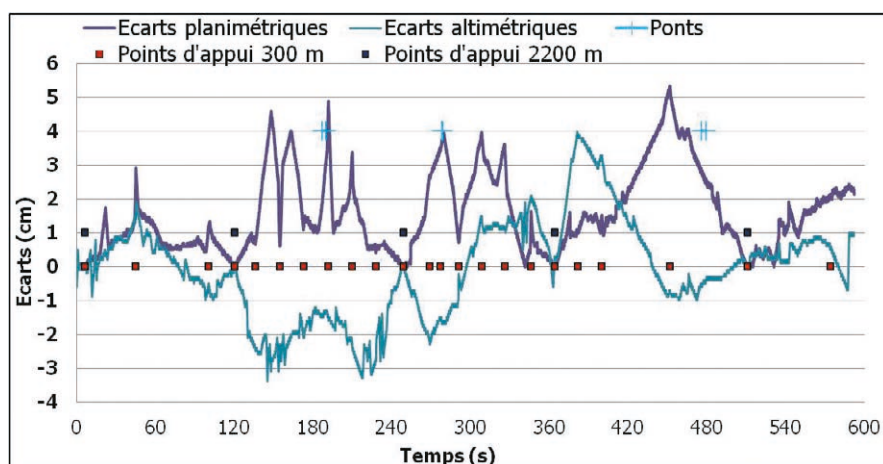


Figure 7. Ecart entre la trajectoire recalée avec des points d'appui à intervalle de 2200 m et la trajectoire de référence, en fonction de la répartition des points d'appui.

l'intervalle entre points d'appui, (Cf. figures, 5, 6 et 7). Ceci est lié à l'ajout de points homologues lors du recalage relatif des données. En effet, ils permettent de moyenniser les écarts des données acquises dans les deux sens de circulation par rapport à la réalité terrain. On visualise ce phénomène sur les figures 5, 6 et 7 lorsque l'écart diminue alors qu'il n'y a pas de point d'appui en commun avec la référence. Ces points homologues ont donc une grande importance pour la précision des données.

Dans l'ensemble, les EMQ sont relativement faibles par rapport à la classe de précision de ± 5 centimètres fixée par le cahier des charges (Cf. Tableau 1).

On constate que pour la trajectoire recalée avec des points d'appui à intervalle de 2 200 mètres, la plupart des écarts maximaux en planimétrie sont compris entre 4 et 5 centimètres (Cf. Figure 7 et Tableau 1), donc on se rapproche de la classe de précision attendue. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence qu'il ne faudra pas dépasser un intervalle de 2 kilomètres entre points d'appui. Les intervalles de 600 mètres et 1 200 mètres sont quant à eux satisfaisants et similaires.

■ Au niveau des nuages de points

Les comparaisons effectuées entre les nuages de points issus de LiDAR dynamique ont montré que l'on obtient des écarts similaires en comparant les trajectoires et les nuages de points. Les comparaisons effectuées par

rapport au nuage de points statique ont montré que les intervalles de 300 et de 600 mètres sont satisfaisants et que l'exactitude des nuages de points à intervalle de 1 200 mètres est d'environ 3 à 4 centimètres dans un milieu GNSS qui n'est pas le plus favorable et d'environ 6 centimètres dans une zone masquée par un ouvrage.

■ Solutions retenues

En définitive, on envisage une disposition des points d'appui à intervalle de 1 kilomètre dans les zones dégagées, correspondant au nombre minimal de points d'appui pour répondre aux exigences de précision fixées par le cahier des charges pour les relevés ferroviaires. Dans les milieux GNSS défavorables (milieux confinés, successions de passages sous ouvrages etc.), on privilégiera un intervalle entre points d'appui d'environ 500 mètres. Par rapport aux prévisions théoriques, le coût entraîné par la réduction de l'intervalle à 500 mètres sera deux fois plus important que celui estimé pour l'intervalle de 1 kilomètre ; cependant ce surcoût ne s'appliquera globalement que sur une portion restreinte des acquisitions.

La modification de l'intervalle entre les points d'appui est indispensable dans ces milieux GNSS défavorables afin de pouvoir garantir une précision homogène du nuage de points conformément à celle prescrite par le cahier des charges qui est de ± 5 centimètres selon les trois composantes x, y et z.

Contrôle qualité des données

Une réflexion a été menée afin de mettre en place une méthode permettant à SNCF Réseau d'effectuer le contrôle des données produites en interne et par ses sous-traitants. Nous avons proposé et évalué deux méthodes afin d'appliquer l'arrêté de 2003 portant sur les classes de précision, en tenant compte des contraintes du milieu ferroviaire et du linéaire important à contrôler.

■ A partir de points de contrôles

Une première méthode de contrôle proposée consiste à mesurer des points de contrôles complémentaires, matérialisés par les mêmes cibles que les points d'appui. Nous avons opté pour déterminer les points de contrôle par mesures GNSS RTK améliorées, comme pour les points d'appui (méthode décrite précédemment). Cette méthode s'avère plus appropriée qu'un levé topographique de précision au tachéomètre puisqu'elle offre un bon compromis entre la rapidité de mesure et la précision fournie.

Les écarts entre les coordonnées des points contrôlés et des points dans le nuage sont ensuite calculés et doivent respecter les trois conditions du modèle standard de l'arrêté pour valider la classe de précision. Nous choisissons d'appliquer le modèle standard puisque le gabarit d'erreur est utilisé dans le cas où l'on souhaite établir un modèle en dehors de toute considération statistique [Kasser, 2003], ce qui n'est pas notre cas. Les levés GNSS étant moins précis en altimétrie qu'en planimétrie, nous dissociions les écarts planimétriques et altimétriques. Concernant l'échantillon de points à contrôler, nous l'avons fixé à 1 point pour 5 ou 10 kilomètres d'acquisitions suivant l'environnement.

L'arrêté de 2003 portant sur les classes de précision impose une méthode de contrôle au moins deux fois plus précise que la classe de précision à contrôler (coefficient de sécurité). Il s'agit d'un critère important dans le choix de la méthode de contrôle à employer. Les travaux de [Legros et al.,





2012] annoncent que la méthode de positionnement GNSS RTK par "filtrage et moyenne" permet d'atteindre une précision de 2-3 centimètres et prend en compte le fait que les conditions d'observations ne sont pas forcément optimales. Nous n'appliquons pas exactement cette méthode du fait des contraintes du milieu ferroviaires qui ne permettent pas d'effectuer une véritable réoccupation des points. Malgré les précautions prises par rapport à la méthode RTK classique, selon l'environnement dans lequel se font les acquisitions, la précision RTK risque d'être dégradée et le coefficient de sécurité ne pourra être respecté. Ainsi, dans certains cas, le contrôle ne sera pas conforme à l'arrêté de 2003 portant sur les classes de précision, ce qui constitue une limite à cette méthode.

■ A partir de nuages de points statiques

Une seconde méthode consiste à contrôler le nuage de points dynamique en effectuant une comparaison avec un nuage de points statique géo-référencé de manière plus précise. Le rattachement du nuage de points statique est réalisé par géo-référencement indirect avec une consolidation basée à partir de cibles et de sphères. La détermination des coordonnées des cibles se fait par GNSS différentiel post-traité. Le temps d'observation des points est déterminé en fonction de leur distance par rapport aux stations de référence. Il est fixé à 10 minutes, auxquels on ajoute une minute par kilomètre de ligne de base et 1 minute par 100 mètres de dénivelés avec les stations de références. [Legros et al., 2012]. Le rattachement de ces points en post-traitement se fait par rapport aux stations du RGP. Cette méthode permet de respecter un coefficient de sécurité de 2 par rapport à la classe de précision tridimensionnelle de 5 centimètres à contrôler.

Puisque l'arrêté de 2003 s'applique aux objets géographiques, la méthode de comparaison la plus conforme à l'arrêté consiste à considérer chaque point comme un objet ponctuel et à calculer les écarts entre les points homologues des deux nuages. Ces écarts sont

calculés par un algorithme robuste de recalage de nuages de points nommé "*Global Optimal-ICP*", qui a été proposé récemment dans la littérature par [Yang et al., 2010] et qui garantit une convergence vers un minimum global. Il s'agit d'une amélioration de la méthode ICP (Iterative Closest Point) puisqu'il permet de pallier le problème de convergence vers un minimum local dû à une mauvaise solution initiale. L'objectif est de déterminer la translation et la rotation entre les deux nuages de points afin d'évaluer les écarts entre ces deux nuages. Les éléments de rotation et translation entre les deux nuages sont difficilement interprétables dans le cadre de l'arrêté. C'est pourquoi, une fonction a été implémentée afin d'obtenir les distances pour chaque point des nuages comparés. Dans notre cas, ces

distances euclidiennes constituent les écarts tridimensionnels entre chaque point des nuages statiques et dynamiques. Nous choisissons de fixer un échantillon de contrôle représentant 10 % de la surface totale acquise en dynamique.

Nous avons appliqué la méthode de contrôle au nuage de points dynamique n'ayant pas subi de recalage à l'aide des points d'appui, (Cf. figure 8). Ceci nous a permis de déterminer la classe de précision du nuage de points avant recalage à l'aide de points d'appui, qui est de 35 centimètres.

■ Solution retenue

La réflexion menée pour mettre en place une méthode de contrôle a mis en évidence la difficulté d'appliquer l'arrêté de 2003 portant sur les classes



Figure 8. Visualisation des écarts entre le nuage de points statique et les nuages issus de levés dynamiques avant et après recalage, au niveau d'un poteau caténaire.



de précision à des données lasergram-métriques. Parmi les deux méthodes proposées, la méthode de contrôle par comparaison à un nuage de points statique plus précis semble être la plus adaptée. D'une part puisqu'il s'agit de comparer un même type de données (comparaison de nuages de points), ce qui permet de s'affranchir des différences d'identifications et de saisies des points pouvant intervenir entre les deux méthodes. D'autre part puisque la précision qu'elle offre permet de respecter le coefficient de sécurité minimal de 2 imposé par l'arrêté de 2003 et l'algorithme utilisé est très robuste.

Conclusion et perspectives

Du fait de leur potentiel important et des avantages de leur exploitation en milieu ferroviaire, les scanners laser dynamiques apparaissent comme une solution évidente pour la surveillance de l'ensemble du réseau. L'étude de précision absolue des données que nous avons menée confirme que le scanner laser dynamique est adapté au milieu ferroviaire et permet d'atteindre la précision absolue de 5 centimètres fixée par le cahier des charges en planimétrie et en altimétrie. Pour atteindre une telle exactitude, nous avons mis en évidence que les données nécessitent d'être recalées à l'aide de points d'appui. A partir des résultats obtenus, nous envisageons de disposer des points d'appui à intervalle de 1 kilomètre dans les zones dégagées, offrant un bon compromis entre la précision attendue et le coût de mise en place des cibles. Nous prendrons la précaution de réduire cet intervalle à 500 mètres dans les zones moins favorables à la réception GNSS afin de garantir une précision homogène du nuage de points, conformément à la prescription du cahier des charges.

Nous avons également proposé deux méthodes de contrôles des données, conformes à l'arrêté de 2003 portant sur les classes de précision. Par ailleurs, SNCF Réseau étudie de nouveaux instruments (scanners laser) beaucoup plus précis que ceux

actuellement utilisés afin de fournir un échantillon de contrôle robuste.

La fiabilité de ce processus de contrôle et de mise en conformité des données scanners par rapport à l'arrêté de 2003 est un élément crucial pour SNCF Réseau, qui se doit de contrôler à la fois les nuages de points produits en interne, mais également de contrôler et valider les nuages produits par ses sous-traitants.

Notre étude nécessite néanmoins d'être prolongée afin de pouvoir évaluer la densité minimale de points d'appui à mettre en place en cas d'absence totale et prolongée de signaux GNSS (tunnels).

Cette étude permet aussi à SNCF Réseau de pouvoir renseigner, de manière fiable, la précision dans ses bases de données contenant des nuages de points. Cela permet ainsi la mise à disposition des informations fournies par cette technologie à d'autres cœurs de métiers que la topographie au sein de SNCF Réseau. Dans cette optique, un parc informatique relié à une zone de stockage important a été mis en place et la réalisation d'un système d'information géographique 3D, voire d'un BIM ferroviaire recensant l'ensemble des acquisitions effectuées par scanner laser dynamique en "France" sont à l'étude. ●

Contact

Audrey JACQUIN

audrey_jacquin@hotmail.fr

Référence :

- [Choquart, 2014] Choquart, Q. (2014). *Intégration des systèmes d'acquisition de données topographiques par scanner laser dynamique dans les processus de mesure et de contrôle des gabarits de la SNCF*, Travail de fin d'étude, INSA de Strasbourg, 104 p.
- [Glennie, 2007] Glennie, C. (2007). *Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LiDAR system*, Journal of Applied Geodesy, n°1, p. 147-157.
- [Haala et al., 2008] Haala, N., Peter, M., Kremer, J., Hunter, G. (2008). *Mobile LiDAR*

mapping for 3D point cloud collection in urban areas - A performance test, IAPRS n° 37, p. 1119-1124.

[Kasser, 2003] Kasser, M. (2003). *Les nouveaux textes réglementaires français en matière de précision des levés, XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie*, n° 96, p. 31-42.

[Legros et al., 2012] Legros, R., Morel, L., Viguier, F., Birot, F. (2012). *Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 1^{re} partie. Le positionnement statique temps-réel par "filtrage et moyenne de positions NRTK"*. XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie, n° 132, p. 53-59.

[Yang et al., 2010] Yang, M.Y., Forstner, W. (2010). *Plane Detection in Point Cloud Data. Technical Report n°1*, Department of Photogrammetry, Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn.

ABSTRACT

"SNCF Réseau" manages a 33.000 kilometers Railway network, which is one of the densest in Europe in terms of traffic. To ensure the safety of persons, the surveillance of this network is a major issue. Mobile mapping system appears like an obvious solution to quickly respond to their large-scale missions. This technology offers a high productivity and ideal working conditions in terms of safety. The potential of the mobile mapping system has already been proved on the roadway environment. Nevertheless, the railway field is more complex, that is why its application is still recent and the system need to be evaluated. The purpose of this project was to evaluate the accuracy of the mobile mapping system in the railway field and to establish processes to guarantee the conformity of surveying works with the decree of September 16, 2003 dealing with classes of precision. The performance of the VMX-450 Rail has been demonstrated and we have established the means to achieve an accuracy of 5 centimeters. To control the accuracy classes, the point cloud measured by Mobile Mapping System will be compared with a point cloud measured by static Terrestrial Laser Scanning.

Lasergrammétrie sous-marine : Quel apport pour les métrologies et l'Exploration Production ?

■ Yann MOREL

En topographie, la lasergrammétrie est une technologie très largement utilisée pour les opérations terrestres et aériennes. Elle connaît cependant un récent développement pour son déploiement sous-marin. L'objectif de ce projet est d'étudier ce que la lasergrammétrie sous-marine peut apporter au sein de l'Exploration Production du groupe Total. Dans ce rapport, les métrologies sous-marines, qui sont généralement réalisées par méthode acoustique ou à l'aide d'une centrale inertielle, seront particulièrement abordées. Il existe actuellement deux types de scanners laser sous-marins : les scanners laser à temps de vol et à triangulation. Afin d'évaluer cette technologie, ce rapport développera aussi un essai qui a pu être mis en place au cours du mois de juin 2015. Il a été effectué en Angola, à l'aide d'un scanner laser à temps de vol développé par 3D@Depth. Ce projet a ainsi permis à Total de valider cette technologie et ainsi de l'envisager pour les futurs appels d'offres.

Contexte et objectifs de l'étude

La métrologie est l'application la plus largement abordée car elle représente un véritable enjeu au niveau de la durée des opérations. Une métrologie sous-marine a pour but de définir le positionnement relatif d'un *hub* (qui correspond à l'interface sur laquelle vient se connecter la future conduite) par rapport à l'autre dans le but de

concevoir les conduites (*jumpers* ou *spools*) reliant les différentes structures installées sur le fond marin. C'est la dernière étape avant la fabrication des conduites reliant deux structures. La Figure 1 représente les mesures ainsi recherchées sur les deux structures :

- Attitudes des deux hubs (roulis, tangage)
- Distance horizontale séparant les centres des deux hubs

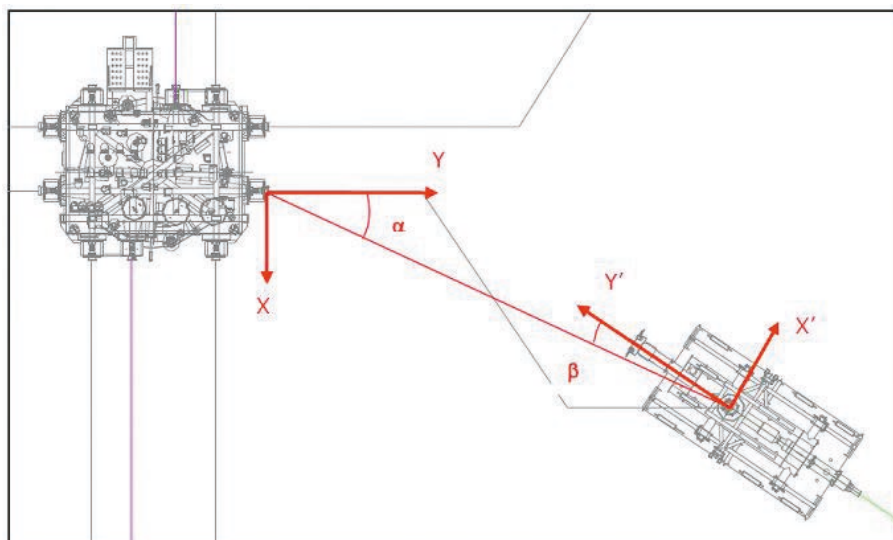


Figure 1. Mesures requises pour une métrologie (Procédure Total).

MOTS-CLÉS

Scanner Laser,
Sous-marin,
Métrologie,
Triangulation,
Temps de vol

- Différence de hauteurs entre les centres des deux hubs
- Altitude des hubs par rapport au fond de mer
- Différences angulaires entre les directions des connecteurs et la ligne passant par les centres des hubs (α et β)
- Profil bathymétrique du fond de mer le long de la future conduite.

Actuellement, il existe plusieurs techniques de métrologie sous-marine. La plus utilisée est la méthode acoustique (LBL – Long BaseLine) mais une métrologie peut aussi être effectuée à l'aide d'une centrale inertielle, par photogrammétrie, à l'aide d'un sonar 3D ou bien par la technique du *Taut Wire* ("fil tendu"). Dans mon mémoire, je décris ces différentes méthodes de mesure, en listant les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles.

La précision (le document de l'IMCA est interprété par TOTAL avec un niveau de confiance de 95 % soit 2σ en une dimension) est un paramètre important puisque l'on ne peut pas se permettre de fabriquer une conduite qui ne reliera pas les deux structures. En effet, le prix de fabrication d'une conduite est de plusieurs centaines de milliers de dollars. La Figure 2 fournit une idée des tolérances typiquement établies pour les métrologies.

La lasergrammétrie sous-marine

■ Les principes

Deux types de scanners laser ont pour le moment été développés. En effet, à l'image des débuts de la lasergrammétrie terrestre, les premiers scanners sous-marins reposent sur les principes de la triangulation et du "temps de vol".



Point	X	Y	Z	Pitch	Roll	Heading
Unit	mm	mm	mm	Degrees	Degrees	Degrees
Hub to hub relative distances	50 to 150	50 to 150	50 to 150			
Hub to hub relative angles				0.5 to 1.0	0.5 to 1.0	0.5 to 2.0

Figure 2. Précisions typiques requises lors d'une métrologie, [IMCA, 2012].

Pour les scanners à triangulation, la détermination des distances repose sur la géométrie du faisceau ainsi que sur la position de l'émetteur et du récepteur, alors que les scanners lasers "à temps de vol" utilisent la vitesse de la lumière. Cette vitesse étant directement liée au milieu de propagation, une sonde CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) est utilisée pour la détermination des différentes caractéristiques de l'eau de mer. Les scanners laser à triangulation ont une portée plus limitée que les scanners reposant sur le principe du temps de vol, qui ont une portée pouvant atteindre les 50 m.

Contrairement aux scanners terrestres qui utilisent principalement des lasers possédant des longueurs d'onde situées dans le proche infra rouge et dans le rouge visible, les scanners sous-marins travaillent dans le vert ou le bleu visible. Ceci est dû au fait que ces couleurs se propagent mieux dans l'eau de mer. Les différents facteurs influençant l'atténuation de la propagation des ondes lumineuses dans l'eau sont décrits dans le mémoire.

■ Les applications

La métrologie sous-marine est l'application majoritairement abordée dans ce papier mais il existe aussi d'autres applications.

Les scanners laser permettent notamment de cartographier les champs pétroliers. La représentation en trois dimensions de la zone entière (structures, câbles, fond marin...) est utile afin de planifier les opérations des ROV (*"Remotely Operated Vehicles"*, qui sont des robots pilotés depuis la surface) et les opérations de maintenance.

Ils permettent également de constater les phénomènes de subsidence, localement, au niveau des structures. En effet, en positionnant des cibles sur le champ pétrolier, il est possible de constater l'enfoncement des structures au cours du temps.

Dans certains cas, il peut aussi être utile de scanner les installations sous-

marines après leurs installations. Un des intérêts peut être de suivre l'évolution des structures. Celles-ci peuvent subir certains dommages au cours du temps, et il est important de pouvoir évaluer ceux-ci afin d'intervenir correctement le cas échéant. Le scanner laser peut aussi être une bonne solution lorsqu'il manque certaines informations sur des structures.

■ Comparaison avec les autres techniques

La lasergrammétrie est une technologie très connue et maîtrisée pour les opérations terrestres. Cependant, son adaptation au monde sous-marin est très récente et les systèmes sont en plein développement.

Un des avantages de la lasergrammétrie sous-marine se situe au niveau de la durée des opérations. Cette technologie représente un gain de temps et donc un coût de location du bateau moins important.

La plupart des techniques actuellement utilisées pour les métrologies nécessitent la mise en place de différentes interfaces sur la structure, visant à accueillir soit des appareils de mesure (centrale inertielle par exemple) soit des cibles (transpondeurs pour une métrologie acoustique par exemple). Ceci est donc une source d'erreur supplémentaire. Le scanner ayant une portée pouvant aller jusqu'à près de 50 m pour des eaux très claires, lors d'une métrologie laser, aucun contact n'est nécessaire entre l'appareil et la structure et de plus, aucun objet n'est à installer préalablement sur la structure. En plus des résultats de la métrologie, les scanners laser permettent d'obtenir les modèles en trois dimensions des différentes structures ainsi qu'une cartographie complète.

De plus, les ondes lumineuses possèdent des propriétés complètement différentes des ondes acoustiques. En effet, les longueurs d'onde de la lumière sont près de 10^8 fois plus petites que les ultrasons. Cette différence permet une

meilleure résolution pour un balayage laser qu'avec un sonar 3D.

Cependant, la portée du laser reste limitée par la turbidité de l'eau. Si l'eau est trop trouble, il ne sera pas possible d'effectuer les mesures puisqu'il n'est possible de scanner que ce qu'il est possible de voir.

Mise en place d'un cas concret en Angola

■ La zone d'étude

Afin d'évaluer la technologie laser, une mission a été organisée au large de l'Angola (Figure 3). La métrologie a été réalisée sur le champ pétrolier de CLOV (*Cravo, Lirio, Orquidea, Violeta*) à environ 1 300 m de profondeur. La zone d'étude a été choisie de façon à traiter un connecteur vertical d'un côté (sur une structure appelée FLET, *Flowline End Termination*) et un connecteur horizontal de l'autre (sur une tête de puits). Ainsi, cette métrologie permet de traiter les deux cas auxquels la société Total peut être confrontée, et cela a permis, par la suite, d'évaluer les différentes contraintes, tant au niveau de l'acquisition qu'au niveau du traitement des données.

■ La métrologie inertielle

Une métrologie inertielle a d'abord été effectuée avec ZUPT, qui est une entreprise américaine basée à Houston. ZUPT est spécialisée dans l'intégration de la technologie inertielle pour les études sur terre et en mer. Cette technologie ayant déjà fait ses preuves, les résultats obtenus ont ainsi permis d'évaluer les performances du scanner laser. La centrale utilisée est le C-PINS et les opérations ont duré 13 h 20. Une telle métrologie se réalise en différentes étapes. En effet, le C-PINS réalise plusieurs "boucles" entre les hubs afin de déterminer la position et les orientations de ceux-ci. Ensuite, un capteur de pression est utilisé afin de calculer les différentes profondeurs recherchées et d'obtenir le profil bathymétrique le long de la future conduite. Les valeurs de pressions obtenues à l'aide de ce capteur sont ensuite converties en profondeurs grâce aux données collectées par une sonde CTD.



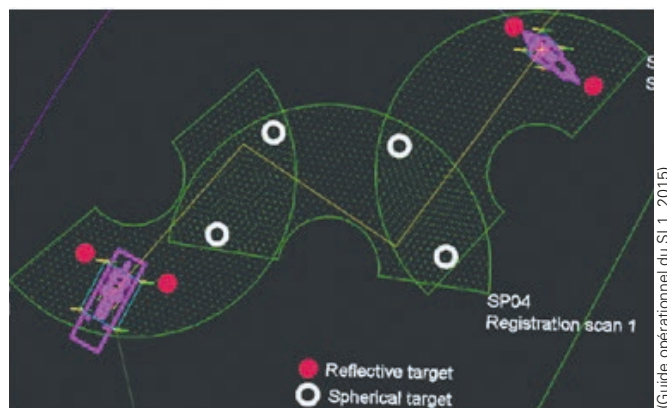


Figure 5. Configuration pour une longue métrologie.

Figure 3. Situation de la zone d'étude.

Traitement des données obtenues

En ce qui concerne le traitement des données, il s'effectue avec les mêmes logiciels que ceux utilisés pour les scanners terrestres. Une fois que les nuages de points sont préparés (Figure 6), il convient de modéliser les hubs et d'effectuer tous les traitements nécessaires.

Les résultats dépendent fortement des choix effectués dans les données utilisées. En effet, il existe différentes façons de traiter les données. Lors de cette mission, plusieurs traitements ont ainsi été réalisés afin de pouvoir comparer les résultats obtenus et ainsi identifier les possibles sources d'erreurs.

Certaines personnes préfèrent ainsi traiter les deux jeux de données séparément (cas du premier traitement effectué par UTEC avec le logiciel Cyclone) alors que d'autres préfèrent les consolider afin d'exploiter au mieux le recouvrement obtenu lors de l'acquisition (cas du second traitement réalisé par UTEC et du traitement effectué par l'auteur au sein de Total avec le logiciel Polyworks). De plus, le traitement étant basé sur les contrôles dimensionnels des structures (effectués sur le chantier de construction) chaque personne n'utilise pas forcément les mêmes points de référence. Les principales sources d'erreurs qui ont été constatées sont le choix d'utiliser des points mal définis sur les données brutes et le choix de surfaces qui ne sont pas strictement alignées par rapport à la structure.

Un inclinomètre (Minisense3) est intégré au sein du SL1. Cet inclinomètre fournit les valeurs de roulis/tangage du

La métrologie laser

La métrologie laser a été réalisée par l'entreprise américaine UTEC. Cette entreprise est l'une des premières à avoir réalisé des métrologies laser (dans le golfe du Mexique). Le scanner utilisé est un SL1, développé par la société 3D@Depth. Des contacts réguliers ont été établis avec UTEC et 3D@Depth afin de préparer au mieux cette mission et d'en garantir le bon déroulement. Le SL1 reposant sur le principe du temps de vol, il convient de déployer une sonde CTD afin de mesurer les différents facteurs environnementaux nécessaires à la détermination de la vitesse de la lumière (pression, salinité, température).

Le scanner est installé sur un ROV (voir Figure 4) qui est déployé sur le fond de mer et piloté depuis la surface. Plusieurs stations (deux dans le cas de cette mission en Angola) sont effectuées afin d'obtenir un recouvrement maximum des structures et du fond de mer.

Le scanner balayant sur seulement 30°, une unité panoramique permet de faire pivoter le scanner afin d'effectuer plusieurs balayages qui viendront couvrir l'ensemble de la métrologie. Depuis une seule station, différents balayages sont effectués (environ une vingtaine), ce qui permet d'obtenir une vue panoramique de la zone étudiée (environ 180°). Le pas de balayage a été réduit au niveau des hubs afin

d'obtenir une plus grande densité de points.

Dans le cadre de cette métrologie réalisée en Angola, les deux structures étaient visibles depuis une seule station mais il peut arriver que la distance soit trop importante. Dans ce cas, des cibles peuvent être disposées sur le fond marin afin de consolider les différents nuages obtenus (Figure 5).

Deux logiciels fournis par 3D@Depth, 2D Viewer et 3D Cloud, permettent la visualisation des données obtenues directement après chaque balayage, ce qui permet de valider ou de recommencer les mesures. Cela nous a été utile à plusieurs reprises du fait de turbulences dans les données ou d'angles de vue mal orientés.



Figure 4. Installation du scanner sur le ROV (SBM Installer, 21 juin 2015).

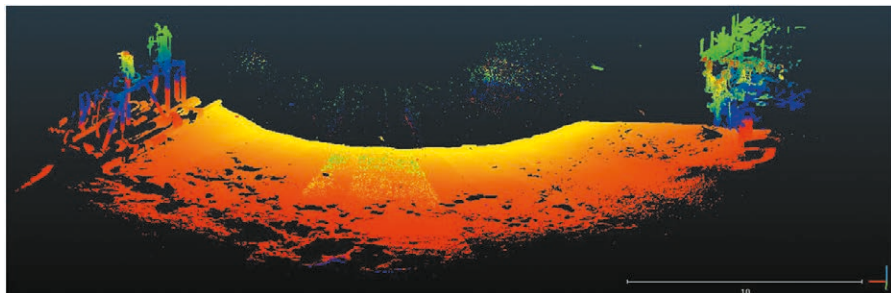


Figure 6. Jeu de données obtenu pour la station SP02 (CloudCompare) colorisé selon la bathymétrie.

scanner au moment de l'acquisition des données avec une précision de 0.04° à 1σ . Lors du traitement, il faut ainsi veiller à bien faire pivoter le nuage de points afin de "niveler" le scanner et ainsi obtenir la vraie verticale du lieu. Enfin, un modèle numérique de terrain (MNT) est réalisé pour le fond de mer afin d'obtenir le profil le long de la conduite.

Résultats et analyses

La mission a permis de constater que l'un des principaux défauts du SL1 est le champ vertical de seulement 30° . En effet, dès la première station, nous avons perdu près d'une heure et demie à positionner correctement le robot sous-marin (*Remote Operated Vehicle*, ROV), car celui-ci était, dans un premier temps, trop proche de la structure. Malgré cette perte de temps, qui aurait pu être évitée en anticipant la position du ROV, il apparaît clairement que le laser représente un gain de temps dans l'acquisition des données. En effet, la durée totale a été de 8 h contre 13 h 20 pour la métrologie inertielle. Ce gain de temps est très important puisqu'il permet tout d'abord de libérer le bateau plus rapidement et donc de le rendre disponible pour d'autres opérations plus vite. Il permet aussi de pouvoir débuter la production de pétrole plus rapidement.

Le résultat obtenu après traitement (consolidation des deux positions grâce à la méthode ICP, *Iterative Closest Point*, définition de la verticale) et qui a permis d'extraire toutes les mesures nécessaires à la métrologie (modélisation des hubs, définition des systèmes de coordonnées, création du profil) est visible sur la Figure 7.

Le Tableau 1 résume les différences obtenues avec la métrologie inertielle. Ce tableau permet de constater que les résultats obtenus peuvent nettement varier d'un traitement à l'autre. En effet, par exemple, un écart maximal de 0.80° au niveau du tangage du côté du FLET est constaté entre les deux traitements différents de UTEC.

Il convient donc d'être extrêmement vigilant et rigoureux lors du traitement des données. Dans un premier temps et pour les prochaines métrologies que Total aura à réaliser, une autre méthode de mesures (acoustique ou inertielle) pourra être mise en place, en parallèle

d'une métrologie laser. Les données laser collectées pourront aussi être traitées par différentes personnes afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Afin d'effectuer un contrôle sur la qualité des résultats obtenus, une solution peut aussi être la consolidation des nuages de points terrestres sur les balayages sous-marins (Figure 8). Des cibles peuvent également être peintes sur les structures lors des contrôles dimensionnels (effectués à terre).

Bilan et perspectives

Cet essai a donc permis de confirmer que la lasergrammétrie est une technique tout à fait opérationnelle pour la réalisation de métrologies sous-marines. Par le biais de cette étude, certains points, pour lesquels la technologie laser peut encore réaliser quelques progrès, ont pu être relevés. Que ce soit au niveau des performances du système ou au niveau du traitement des données obtenues, cette technique peut donc nettement s'améliorer dans les années à venir.

Mesures	Variable	Différences avec métrologie inertielle		
		Laser Total	Laser UTEC 1*	Laser UTEC 2**
Distance Horizontale (mm)	L	39	51	34
Angle XT-Jumper ($^\circ$)	α	0,49	0,49	0,96
Angle FLET-Jumper ($^\circ$)	β	0,01	-0,56	0,06
Hub FLET Tangage ($^\circ$)	RX1	-0,26	-1,05	-0,25
Hub FLET Roulis ($^\circ$)	RY1	-0,21	0,43	-0,13
Hub XT Tangage ($^\circ$)	RX2	-0,05	-0,24	0,08
Hub XT Roulis ($^\circ$)	RY2	-0,09	0,11	-0,42
Différence de profondeur (mm)	Z	7	-24	-19
Altitude par rapport au fond de mer (mm)	Hub XT	150	165	165
	Hub FLET	70	209	-276

Tableau 1. Comparaison des résultats avec la métrologie inertielle.

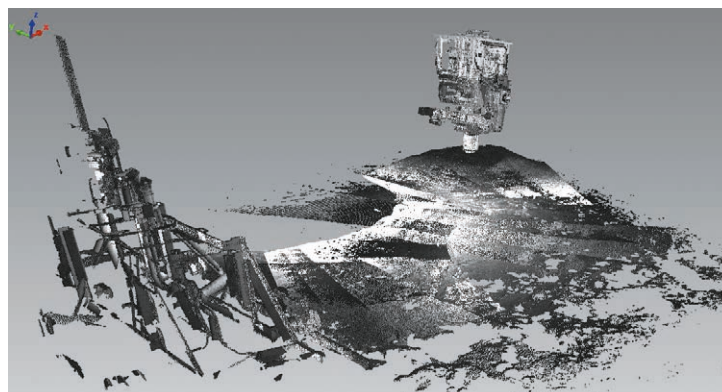


Figure 7. Vue perspective du nuage consolidé (FlowLine End Termination, FLET au premier plan, Christmas Tree, XT au second plan) (Polyworks, sans échelle).

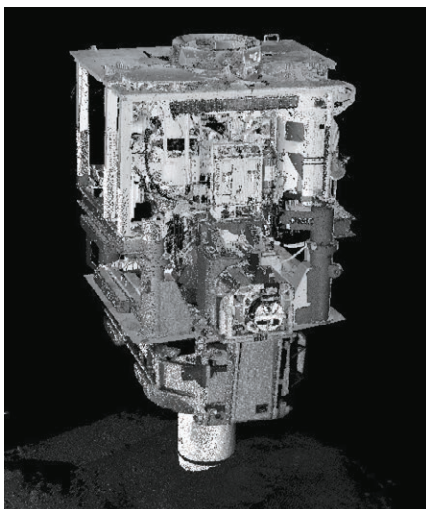


Figure 8. Consolidation du balayage terrestre avec le balayage sous-marin (Polyworks).



La lasergrammétrie sous-marine permet de plus d'obtenir les modèles en trois dimensions des différentes structures et d'avoir une cartographie complète du fond de mer. Ceci est un avantage certain puisque cela permettra à Total d'éviter de revenir effectuer des mesures dans certains cas.

Ainsi, nous pouvons comparer les débuts de la lasergrammétrie sous-marine avec ceux de la lasergrammétrie terrestre. En effet, à l'image des scanners terrestres, deux types de scanners ont pour le moment été développés, l'un reposant sur le principe de la triangulation et l'autre étant un scanner à impulsions, couvrant un champ angulaire de 30° x 30° (contre 40° x 40° à l'époque pour son semblable terrestre). Nous pouvons donc imaginer que le développement des scanners sous-marins suivra le même chemin, et que dans les années à venir, les scanners panoramiques (champ de vision de 360° dans le plan horizontal et au moins 180° dans le plan vertical) feront leur apparition. De même, à l'image des scanners terrestres, le développement sous-marin de scanners laser à différence de phase serait une nette avancée technologique et représenterait un gain de temps considérable au niveau de l'acquisition des données.

Comme prévu, le traitement des données compose la partie la plus complexe de cette technique. En effet, les choix effectués lors des traitements peuvent avoir leurs importances et une

mauvaise interprétation peut très vite influencer les résultats. Cette nouvelle technologie réclame donc énormément de vigilance et d'analyse. Les traitements devront donc être accompagnés de procédures de contrôle qualité qui permettront d'évaluer les précisions du rendu final.

Ce projet a permis d'évaluer cette technologie et de l'envisager pour les futurs appels d'offres concernant les métrologies. En effet, Total lancera prochainement un appel d'offres pour la réalisation de métrologies au Congo. Grâce à ce projet, les scanners laser sont des systèmes qui peuvent maintenant prendre la place des métrologies habituellement pratiquées, à savoir l'acoustique, l'inertielle ou le fil tendu. Actuellement, certains développements sont en cours afin d'associer le système laser avec une centrale inertielle. Ainsi, il sera possible d'effectuer des relevés laser à l'aide d'un véhicule autonome (AUV) qui pourra "survoler" la zone d'étude, tout en la scannant. Il s'agit du lidar mobile, 3D@Depth étudie actuellement un système analogue qui associerait une centrale inertielle au scanner laser. ●

Contacts

Yann MOREL

morel.yann.ym@gmail.com

Directeur de PFE : Frédéric Auger

Correcteur : Gilbert Ferhat

Bibliographie

Auger, F. et Vickery, K. (2011). *The operational evaluation of an inertial navigation technique for the provision of underwater metrology surveys*. International Journal of the Society for Underwater Technology, 30(2):103-112. ISSN 1756-0543.

Embry, C., Nickerson, B. et Hardy, M. (2014). *High Resolution 3D Laser Imaging for Inspection, Maintenance, Repair, and Operations*.

Embry, C., Nickerson, B. et Hardy, M. (2015). *SL1 Subsea LiDAR Operator Guide - User Manual Version 7.4*.

Embry, C., Nickerson, B., Hardy, M., Manning, N., Goodyear, D., Richardson, D. et Pappas, J. (2012). *SS MTS : Subsea Monitoring - «High Resolution 3D Laser Imaging for Inspection, Maintenance, Repair, and Operations»*. In Offshore Technology Conference, 30 April - 3

May, Houston, Texas, pages 1-17.

Gillham, J. (2014). *Underwater laser scanning : For subsea pipeline inspection*. Marine Technology Reporter, 57(3):42-45. ISSN 1559-7415.

Hardy, M. (2015). *3d at depth - bringing laser scanning to new depths in the subsea oil and gas market*. LiDAR News Magazine, 5(2) : 28-33.

Landes, T. et Grussenmeyer, P. (2011). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques*. XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie, 128:37-49. ISSN 0290-9057.

Landes, T., Grussenmeyer, P. et Boulaassal, H. (2011). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications*. XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie, 129:25-38. ISSN 0290-9057.

Matthews, D. (2014). *Development of an innovative 3d subsea laser metrology system*. Deep Offshore Technology International, pages 1-19.

McLeod, D., Jacobson, J., Hardy, M. et Embry, C. (2013). *Autonomous inspection using an underwater 3d lidar*. In Total E & P Angola, pages 1-8.

2G Robotics. <http://www.2grobotics.com/>
3D at depth. <http://www.3datdepth.com/>

ABSTRACT

KEY WORDS: Scanner Laser, Subsea, Metrology, Triangulation, Time of flight

For topographic matters, laser scanning is a very developed technology for terrestrial and aerial operations.

However, it has recently been extended for subsea deployment. The purpose of this project is to study in which way subsea laser scanning can contribute to the operations of Total group. This report deals with subsea metrologies, which are usually carried out by acoustic method or using an inertial navigation system. Currently, there are two types of subsea laser scanners: triangulate and time of flight systems. To assess this technology, this report will develop a trial, which took place in June 2015. This test was performed in Angola, using a time of flight laser scanner developed by 3D@Depth. It allows Total to validate and then to consider this technology for future tenders.

Numérisation 3D du site orné de la Grotta Scritta à Olmeta-di-Capocorso (Haute-Corse)

■ Pierre GRUSSENMEYER - Albane BURENS - Samuel GUILLEMIN - Emmanuel ALBY - Franck ALLEGRIINI SIMONETTI
Marie-Laurence MARCHETTI

Le site de la Grotta Scritta I se trouve sur le versant ouest du Cap Corse, sur la commune d'Olmeta-di-Capocorso (département de la Haute-Corse). L'abri sous roche est implanté sur un éperon ouest de la chaîne la Serra, à quelques 412 m d'altitude. Dans le contexte régional d'un vaste ensemble de sites mégalithiques à vocation funéraire (régions du Nebbiu et des Agriates) et d'un art rupestre préhistorique insulaire particulièrement riche en motifs gravés (essentiellement géométriques), la Grotta Scritta constitue l'unique site à figurations peintes de Corse. La vingtaine de représentations pariétales est agencée dans la partie supérieure du surplomb rocheux et tire partie de la microtopographie de la paroi. Aujourd'hui, la Grotta Scritta est un site vulnérable, rendu fragile par l'action du temps et de l'homme. Le travail de numérisation 3D de l'abri et des peintures de la Grotta Scritta a été réalisé par des topographes et des archéologues de l'INSA de Strasbourg et de l'UMR 5602 GEODE de Toulouse, en combinant des acquisitions de lasergrammétrie et de photogrammétrie terrestre. Ces techniques permettent d'acquérir une documentation 3D complète sans contact avec les parois de l'abri. Elles présentent l'avantage de garantir une parfaite préservation du site. Nous présentons dans cet article la méthodologie de traitement des données images et laser en vue de l'obtention des modèles 3D produits dans le cadre de cette opération (nuages de points, modèles maillés, modèles texturés, orthophotos). Au-delà de leur utilité en terme de valorisation, de communication et de restitution virtuelle, les modèles générés constituent également des outils d'aide à l'analyse et à la perception de la complexité des volumes de l'abri (notamment les formes repliées sur elles-mêmes de la coupole abritant les peintures). L'extraction d'orthophotographies depuis le modèle 3D de la Grotta Scritta a ainsi servi de support au relevé vectorisé des peintures.

MOTS-CLÉS

patrimoine culturel, préhistoire, art rupestre, relevé 3D, photogrammétrie terrestre, balayage laser

En mars 2014, une équipe de chercheurs de l'INSA de Strasbourg (ICube UMR 7357) et de Toulouse (Geode UMR 5602) a réalisé le relevé

3D du site orné de la Grotta Scritta pour le compte de la commune d'Olmeta-di-Capocorso (Haute-Corse, France), propriétaire du site archéo-

logique, à des fins de conservation, de recherche et de valorisation. Nous présentons dans cet article les caractéristiques historiques et archéologiques de ce site remarquable et les premiers résultats issus des travaux de numérisation 3D. La numérisation 3D du site constitue un document essentiel à la demande de classement du site au titre des Monuments Historiques.

Contexte d'intervention

■ Présentation géographique du site

Le site de la Grotta Scritta I se situe à Olmeta-di-Capocorso, commune la plus méridionale du Cap Corse (Haute-Corse, France) (figure 1). La région est formée par une chaîne dorsale schisteuse orientée dans un axe nord-sud, relativement élevée et aux crêtes effilées. La chaîne



Figure 1. Localisation de la Grotta Scritta (Olmeta-di-Capocorso, Corse, France) et vue de la coupole ornée (en haut à gauche).



est caractérisée à l'est et à l'ouest par des éperons et des contreforts délimitant des vallées parallèles. Le village d'Olmata-di-Capocorso est établi dans l'une d'elles, ouverte à l'ouest sur le golfe de Saint-Florent et adossée à la *Serra*. Le site est implanté sur un éperon ouest de la chaîne montagneuse, à quelque 412 m d'altitude. Surplombant la mer Méditerranée, le site domine aujourd'hui la plage de sable et galets noirs de Negro et offre une vue panoramique sur le golfe de Saint-Florent. On accède à la Grotta Scritta à pied depuis le village d'Olmata, par l'ancien chemin reliant Olmeta à Nonza, sur 3,07 km. Il faut compter environ une heure de marche, par ce chemin en partie dallé.

■ *Le site de la Grotta Scritta 1*

La Grotta Scritta 1 (ou "Grotte peinte") constitue l'unique site à figurations peintes de Corse. Elle correspond en réalité à un surplomb rocheux naturel, orienté à l'ouest, formant une coupole en aplomb de la paroi, à quelques 2,50 m du sol actuel. Cet encorbellement d'environ 2 m de large fait saillie par rapport à la falaise. C'est à l'intérieur de cette coupole, à laquelle on accède en escaladant la partie inférieure du surplomb rocheux, que 20 motifs peints à l'ocre rouge et deux graffiti gravés ont été découverts par R. Grosjean dès la fin des années 50 (Grosjean 1959).

Aucune occupation archéologique n'a pu y être associée directement. Cela dit, un petit abri nommé "Grotta Scritta 2", encore récemment utilisé par des bergers, est localisé à quelques mètres en contrebas du site. Un muret de clôture récent ceint l'espace compris entre les deux sites. Le plafond de ce second abri est couvert de gravures et graffiti pour la plupart récents.

Les 20 représentations pariétales répertoriées sur les parois de la Grotta Scritta 1 ainsi que les 2 graffiti récents occupent la partie supérieure du surplomb rocheux, baignée de lumière en fin de journée. Réalisées à l'oxyde de fer, les motifs peints se développent à l'intérieur d'une coupole présentant de multiples petites alvéoles, dépressions et aspérités à l'intérieur d'un espace d'environ 1,30 m de large sur 0,70 m de hauteur. Les motifs semblent

tirer parti de la micro-topographie de la roche (Weiss 2000). Parmi les motifs principaux, on dénombre 7 représentations anthropomorphes dont 3 anthropomorphes représentés avec un appendice caudal ou sexuel (l'un d'eux porte des cornes, les deux autres présentent les bras levés ou baissés), 3 anthropomorphes stylisés et un dérivé d'anthropomorphe. Deux motifs plus complexes paraissent figurer des cavaliers sur leur monture. Des signes secondaires sont associés aux motifs principaux : il s'agit essentiellement de points (ou taches), de traits, mais également d'une ligne brisée et d'un triangle au tracé pointillé. Deux motifs complexes composés de traits et de points ont pu être interprétés comme des motifs en forme de peigne. Deux graffiti modernes ont plus récemment été gravés à proximité directe des peintures, à l'intérieur de la coupole. L'ensemble des motifs peints se répartit à l'intérieur de différents micro reliefs de la cavité (un bandeau central, plusieurs alvéoles et une dépression).

Une chronologie en 5 étapes des différents moments de réalisation des motifs peints a été proposée par M.C. Weiss, sur la base d'une différenciation de la couleur des pigments utilisés, des techniques de réalisation et de la répartition des figures à l'intérieur des micro-reliefs du support rocheux (Weiss 1998).

À l'exception de deux graffiti récents, les motifs peints sur les parois de la Grotta Scritta 1 semblent pouvoir être rattachés à un vaste courant méditerranéen postglaciaire caractérisé par un art schématique dont l'Espagne est considérée comme le centre. On retrouve à la Grotta Scritta quelques-uns des grands principes régissant cet art pictural : la schématisation et la simplification des figures, la répétition des motifs et leur superposition ou encore l'association et la complémentarité de certaines représentations (Hameau 1995). Un nombre important de parallèles a été établi entre les représentations peintes de la Grotta Scritta I et des motifs rupestres et pariétaux bien connus dans la péninsule ibérique, dans le Piémont italien, mais aussi en Provence et en Sardaigne (Grosjean 1959 ; Ripoll Perello 1967 ; D'Arragon 1997 ; Arca

2002). Dans le Sud de la France, cet art a été mis en évidence dans les Pyrénées Ariégeoises, en Languedoc Oriental, dans le Dauphiné et bien sûr en Provence. Les plus importantes concentrations de sites étant enregistrées à l'est du Rhône (Hameau 1995).

L'art schématique est communément daté entre la fin du Néolithique - Chalcolithique et le Bronze Ancien. Cette attribution est fondée sur une contemporanéité supposée entre les peintures et gravures découvertes dans le sud de la France et la présence de vestiges mobiliers à proximité directe. À la Grotta Scritta, en l'absence de tout contexte archéologique et de relations clairement établies entre les motifs, les peintures ne peuvent être datées avec plus de précisions. Il semble toutefois que la représentation de chevaux dans les deux motifs dits des "cavaliers" tire la chronologie vers le haut, la présence d'équidés n'étant pas attestée en Corse avant l'âge du Fer. Ces deux figures pourraient être légèrement plus récentes que les autres représentations anthropomorphes (Weiss 1998). Rappelons que, dans un contexte d'un art rupestre insulaire particulièrement riche en motifs gravés (sites de E Schippiate et de Petra-Frisgiata, Cambia par exemple), la Grotta Scritta constitue l'unique site abritant des motifs peints.

■ *Historique des travaux et études menés sur le site*

Le site de la Grotta Scritta, connu de la population locale de longue date (Kreuzer 1977), a été officiellement découvert par Roger Grosjean dans les années 50 (Grosjean 1959). À la suite de cette première étude, plusieurs archéologues français et étrangers ont visité et étudié le site.

Les premiers relevés des motifs peints ont été publiés à la fin des années 60 puis dans les années 70. Des divergences notables existent entre les différents relevés (Grosjean 1969, Beltran 1968, Kreuzer 1977). Les interprétations des motifs et les propositions de phasage chronologique proposées par les différents chercheurs ne concordent pas toujours (Grosjean 1959, 1960, 1966, 1969 ; Gagnières

1959 ; Beltran 1968 ; Kreuzer 1977 ; Ripoll Perello 1967). C'est en 1997, dans le cadre d'un programme de recherche collectif dédié à l'art rupestre de Corse, que M.-C. Weiss réalise, avec une équipe de 15 personnes, la première étude exhaustive des motifs peints de la Grotta Scritta I et en propose un phasage chronologique (Weiss 1998, 2000). L'auteur recense notamment l'ensemble des motifs secondaires (traits, points...) non encore répertoriés et propose une interprétation des différentes figures et signes. Il perçoit la Grotta Scritta comme une sorte d'"écran" pour des œuvres, certes réalisées sur une certaine durée, mais reflétant une même idéologie, au travers de symboles renouvelés (Weiss 1998). Il attribue d'ailleurs au site une fonction plus religieuse que picturale. Consécutivement à cette étude, d'autres travaux seront consacrés ou citeront le site (Lanfranchi, Weiss 1997 ; D'Arragon 1997 ; Amadei, Ottaviani 1999 ; Weiss 1998, 2000, 2003, 2007 ; Arca 2002, Peche-Quilichini 2003)...

Dans une publication de 2007, M.C. Weiss revient sur la cohésion des trois premières phases de réalisation des peintures de la Grotta Scritta I (groupe stylistique A) et met en évidence des liens stylistiques entre les motifs de la Péninsule Ibérique, de la Corse, de la Provence et de la Sardaigne, sur la base de similitudes observées sur le motif d'anthropomorphe aux bras baissés ou sur l'association récurrente entre les signes (points) et les figures anthropomorphes.

Méthodologie du relevé

■ Objectifs

Dans le but de préserver l'intégrité du site, les méthodes d'acquisition de données 3D mises en œuvre sont non destructives et favorisent le recours à des techniques d'enregistrement et de prise de mesures sans contact. Le travail de numérisation 3D de la Grotta Scritta I, réalisé par des topographes et archéologues des UMR 7357 ICube de l'INSA de Strasbourg et UMR 5602 GEODE de Toulouse, a comme objectif le calcul de modèles 3D à partir de nuages de points denses obtenus par



Figure 2. (a) Scanner Faro Focus 3D à mi-hauteur de la paroi et (b) relevé photo à 7 m du sommet du surplomb rocheux.

lasergrammétrie terrestre et par relevé photogrammétrique. Ces techniques permettent d'acquérir une documentation 3D complète, sans contact avec les parois de l'abri. Elles présentent l'avantage de garantir une parfaite préservation du site.

Actuellement, la plupart des projets de numérisation 3D combinent balayage laser et photogrammétrie terrestre (Grussenmeyer *et al.*, 2012). Ces deux techniques répondent à plusieurs objectifs :

- de conservation : pour visualiser le plus finement possible les altérations de tous ordres ;
- de valorisation et de recherche : en permettant le relevé intégral de l'abri et de la terrasse d'implantation.

La paroi ornée a fait l'objet d'un traitement spécifique le plus fin possible. Ceci afin de pouvoir être utilisé comme base à la restitution virtuelle 3D, de réaliser un relevé détaillé des motifs peints ou encore de réaliser des fac-similés en résine à l'aide d'imprimantes 3D.

■ Solutions techniques utilisées

Le relevé lasergrammétrique a été effectué avec un scanner à balayage Faro Focus 3D S120 avec caméra intégrée (Figure 2 a). Ce scanner a une portée allant de 0,60 m à environ 100 m et le constructeur annonce une incertitude de mesure de 2 mm à 25 m. Notons que cette précision peut dépendre de nombreux paramètres (type de surface mesurée, incidence du rayon de mesure, etc.). La miniaturisation (5 kg) et la souplesse d'utilisation de ce scan-

ner laser a permis sa mise en œuvre dans un contexte particulièrement contraignant (stations de numérisation dans une coupole étroite et à la topographie accidentée, située à environ 2.50 m de hauteur ; présence d'une végétation particulièrement dense à proximité directe du site). Parallèlement, un relevé photogrammétrique a été réalisé à partir de plusieurs stations sur trépied (Figure 2 b) à l'aide d'un boîtier Canon EOS 5D MarkII et de plusieurs objectifs calibrés de 20, 24 et 105 mm utilisés sans auto-focus (focale fixe tenant compte des positions du trépied par rapport à l'objet).

Compte tenu des difficultés d'accès au site, aucun système GPS géodésique ni station totale n'ont pu être emportés sur le site. Les relevés n'ont donc pas été géoréférencés et le canevas local constitué d'un réseau de sphères Faro et de cibles a été utilisé pour recaler entre eux les données lasergrammétriques et photogrammétriques. Des mires tricolores (Figure 3) ont été disposées dans l'abri pour vérifier la



Figure 3. Disposition de deux mires de mise à l'échelle dans la partie supérieure du surplomb rocheux où l'on distingue les représentations pariétales.



mise à l'échelle des modèles. Bien que non géoréférencé, les nuages de points ont cependant été orientés à quelques degrés près grâce à la boussole intégrée au scanner Focus 3D.

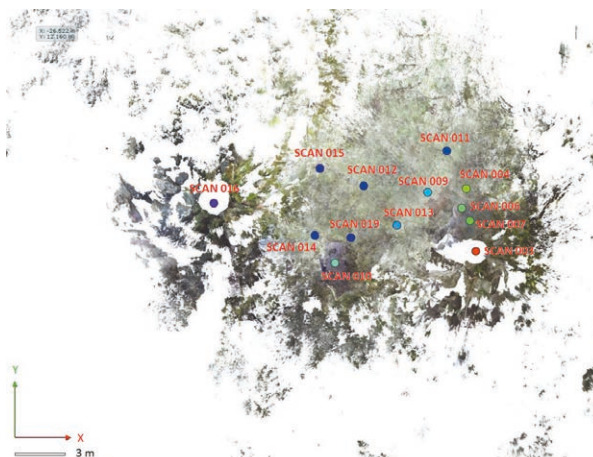
■ Traitement des données

Relevé lasergrammétrique : les nuages de points sont issus de 13 stations, espacées de 1 à 4 m (Figure 4) et réparties en hauteur sur l'ensemble du site (Grotta Scritta 1, terrasse et Grotta Scritta 2). La consolidation et la colorisation ont été réalisées à l'aide du logiciel *Faro Scene*. Après ajustement, les écarts constatés sur les sphères sont inférieurs à 1,5 cm. Pour l'acquisition des nuages de points, le scanner a été paramétré avec une résolution spatiale de 6 mm à 10 m, ce qui compte tenu de la répartition des stations permet d'obtenir un nuage de points très dense. Les travaux de segmentation et de rééchantillonnage ont été réalisés à l'aide du logiciel *3D Reshaper*.

Photogrammétrie : le relevé photogrammétrique a été réalisé avec plusieurs objectifs :

- être en mesure de produire un nuage de points dense susceptible de compléter le nuage de points obtenu par balayage laser (notamment pour la partie du surplomb rocheux accueillant les représentations pariétales) ;
- texturer les modèles maillés ;
- créer un catalogue d'images susceptibles de suivre l'évolution de la paroi et l'éventuel développement des lichens ;
- permettre la production d'orthophotos servant de support au relevé vectorisé des représentations pariétales.

Figure 4. Répartition de 13 stations lasergrammétriques sur l'ensemble du site de la Grotta Scritta (vue du dessus).
Grotta1 (surplomb rocheux) : stations 4, 6 et 7.
Grotta2 : stations 12, 14 et 19.



Le relevé avec l'appareil EOS5D Mark II a été organisé en plusieurs étapes en se plaçant respectivement à environ 1 m (3 stations), 3 m (4 stations) et 7 m (5 stations) du surplomb rocheux et en tenant compte des mises en station possibles. Une séquence de plusieurs photos successives a été réalisée à partir de chaque station en balayant l'espace visible du surplomb rocheux (Tableau 1).

	Taille du pixel-objet (mm)	Nombre d'images
<i>Focale</i>	24 mm	
1 m	0,3 mm	120
3 m	0,8 mm	110
7 m	1,9 mm	48

Tableau 1. Taille du pixel sur l'objet à différentes distances pour une focale de 24 mm (appareil EOS 5D Mark II, matrice-image 5616x3744 pixels, pixel-image de 6,4 microns)

Pour la mise à l'échelle des projets de photogrammétrie, plusieurs solutions sont possibles :

- mise à l'échelle simplifiée avec les mires tricolores (visibles sur la figure 3) ;
- mesure manuelle des sphères et des cibles du projet lasergrammétrique (Figure 5) sur les images ;



Figure 5. Identification des sphères et des cibles dans une image panoramique générée par l'outil "Webshare" de Faro Scene.

- identification des coordonnées de points d'appui dans le nuage de points laser.

Livrables

■ Données lasergrammétriques

Le nuage de points colorisé brut représente 680 millions de points à l'issue de l'assemblage des 13 nuages identifiés sur la figure 4. Après segmentation, le nuage initial est ramené à 208 millions de points (ce qui représente encore 7 Go au format ACSII). Le nuage global a finalement été segmenté en plusieurs parties et rééchantillonné pour être exploitable. À titre d'exemple, le nuage de points colorisé rééchantillonné à 1 cm (Figure 6) et limité à l'emprise de la Grotta Scritta 1 correspond à 1 million de points, soit environ 40 Mo.

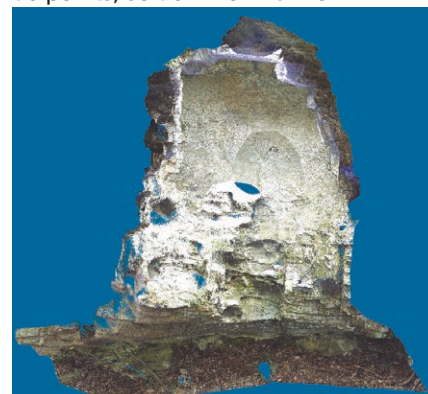


Figure 6. Nuage de points colorisé de la Grotta Scritta 1 (vue de face) rééchantillonné à 1 cm.

■ Données photos et photogrammétries

Les photos du tableau 1 ont été orientées à l'aide des logiciels PhotoModeler et Photoscan, et recalées sur le projet lasergrammétrique en mesurant des points caractéristiques sur le surplomb rocheux dans l'environnement Faro Scene. L'objectif de ces traitements est de calculer la position et l'orientation des photos issues de la caméra EOS 5D destinées à être utilisées pour texturer le modèle lasergrammétrique préalablement maillé. Les paramètres de calibration de l'appareil photo (Incarn) et l'orientation externe des photos (Excam) sont exportés à partir des outils de photogrammétrie pour être utilisés dans le logiciel 3D Reshaper pour l'étape de texturation du modèle 3D.

■ Modèles 3D

Plusieurs types de modèles 3D ont été calculés à partir du nuage de points de la Grotta Scritta 1 rééchantillonné à 1 cm. Un premier maillage a été effectué avec le plug-in "Poisson Surface Reconstruction" du logiciel CloudCompare 2.6, suivi d'une segmentation du maillage clos produit par cet algorithme. À l'issue de cette opération, on effectue un rendu en PCV "Portion of Visible Sky" pour la visualisation sans texturage des détails du surplomb rocheux (Figure 7).

Le texturage est effectué dans 3D Reshaper. Les figures 8 et 9 représentent des orthophotos issues de la projection orthographique d'informations tridimensionnelles sur un plan, selon un axe défini (en l'occurrence celui du regard du visiteur des lieux dans la coupole, face au panneau orné). L'extraction d'une orthophoto depuis le modèle 3D de la Grotta Scritta nous a servi de support au relevé vectorisé et référencé des peintures, qui a été confronté avec les peintures *in situ* en juin 2015.

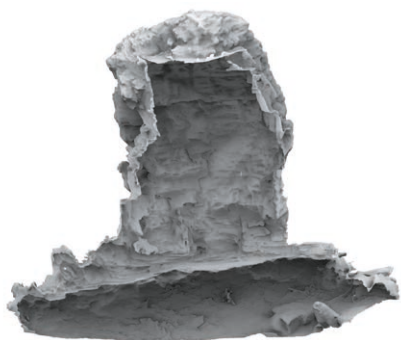


Figure 7. Modèle maillé avec un rendu en mode "Portion of Ciel Visible".

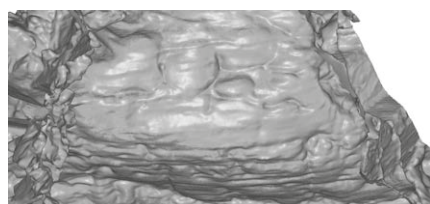


Figure 8. Orthophoto issue du modèle 3D ombré favorisant la compréhension du relief (à comparer avec la figure 3).



Figure 9. Orthophoto issue du modèle 3D texturé.

■ Sections et coupes calculées à partir du nuage de points

L'exploitation du nuage de points a permis de générer une coupe verticale (Figure 10) et des sections horizontales (Figure 11) de l'abri. Ces tracés vectoriels ont été réalisés à partir des outils proposés par le logiciel Cloudcompare.

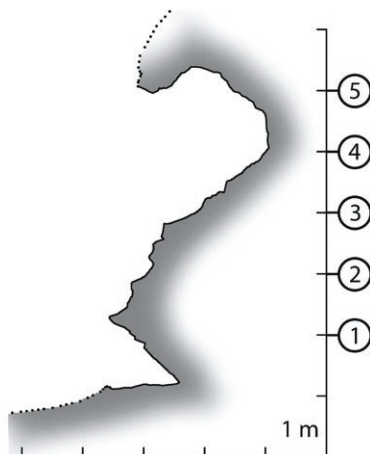


Figure 10. Coupe verticale de l'abri. Les représentations pariétales sont situées entre les sections 4 et 5.

Apports de la 3D à la problématique et à la connaissance du site

Ainsi que nous l'avons précisé, la campagne de numérisation 3D réalisée en 2014 sur le site de la Grotta Scritta s'est inscrite dans une démarche de préservation et d'inscription aux monuments historiques de ce site exceptionnel, à l'initiative de la Collectivité Territoriale de Corse et la Commune d'Ometta-di-Capocorso. La modélisation numérique 3D produite répond à la nécessité de disposer d'une documentation complète et à haute résolution de cet important site du patrimoine culturel corse, à un instant T.

Si les modèles numériques 3D ne constituent ni une alternative à la réalité archéologique, ni un substitut aux méthodes traditionnelles de documentation, ils sont une interprétation de cette réalité et forment un nouveau type de documentation, complémentaire aux photographies, qui permet de nouveaux modes de représentation graphique et de performants outils d'étude des sites et de leurs contextes... En ce sens ils sont parties intégrantes des processus de description, de compréhension et

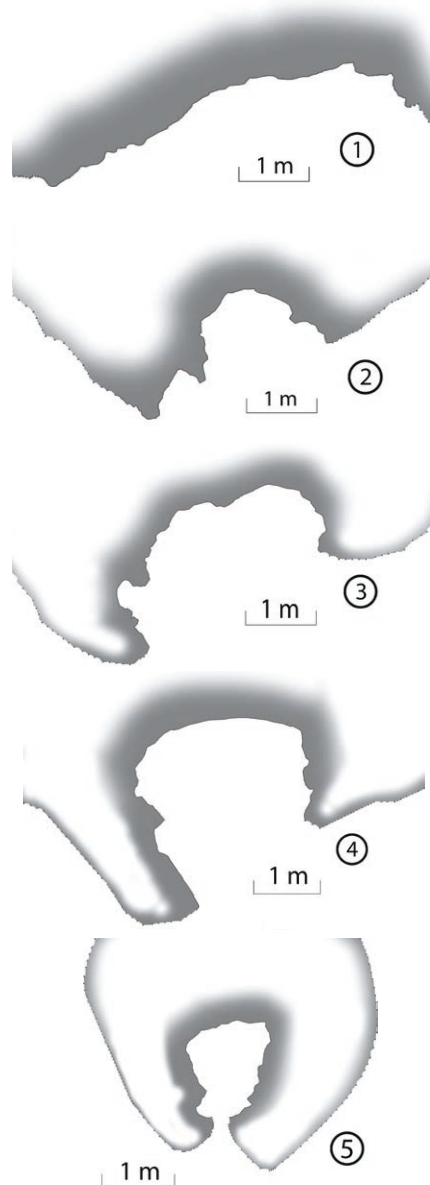


Figure 11. Sections horizontales de l'abri (voir la position des sections sur la figure 10).

d'interprétation de la complexité des sites archéologiques (Campana 2014). À la Grotta Scritta, la modélisation numérique tridimensionnelle produite (modèle hybride associant lasergrammétrie et photogrammétrie) peut être appréhendée comme une documentation relativement objective, dans le sens où le site n'a pas fait l'objet de fouilles archéologiques et que les techniques d'enregistrement développées ne sont pas invasives et sont sans contact avec les parois et les peintures rupestres. Au-delà des traditionnelles fins conservatoires et de visualisation, le modèle 3D de la Grotta Scritta avait pour objectif de permettre la mise en œuvre d'un suivi longitudinal des processus de



dégradation des peintures rupestres, particulièrement vulnérables à l'action des agents météorologiques et aux dégradations d'origine anthropique (effacements, graffitis). Les premières mesures conservatoires du site, visant à protéger les peintures de l'action conjointe des agents météorologiques (pluie, vent, ensoleillement) avaient indirectement favorisé le développement de lichens sur la paroi ornée. Cette altération, qui avait déjà retenu l'attention de M.C. Weiss au moment du travail d'inventaire qu'il réalisa en 1997 (Weiss 1998), fait l'objet d'un contrôle depuis 2010. La comparaison entre les clichés de Nicolas Mattei réalisés en 1997 et le modèle 3D réalisé en 2014 confirme l'absence de réelle progression du développement de ces organismes.

Par ailleurs, le modèle 3D de la Grotta Scritta constitue un réel outil d'aide à l'analyse et à la perception de la complexité des volumes de l'abri, notamment les formes repliées sur elles-mêmes de la coupole abritant les peintures. En ce sens, la 3D apporte une véritable valeur ajoutée par rapport aux représentations cartographiques traditionnelles. Les possibilités de manipulation interactive du modèle texturé, de modification des conditions d'éclairage mais surtout d'affichage de tout ou partie des tracés sont essentielles. L'extraction d'une orthophotographie depuis le modèle 3D a servi, (après un traitement numérique d'optimisation de l'image) de support au relevé vectorisé des peintures. Cette technique a

permis l'élaboration d'un relevé non tributaire de la perspective, combinant une grande précision métrique et la restitution de la texture du support (figure 12). Le document produit constitue un apport significatif à l'étude des peintures car il apporte un haut degré de précision du relevé. Il a notamment permis d'inventorier de nouveaux points et taches (dans les motifs 1, 10, 14 et 17), de confirmer la présence de l'amorce d'un appendice sexué sur la figure 1 (appendice absent du relevé publié en 1998), de révéler la présence de coulées d'ocre sur les motifs 5, 11 et 12, de réunir en un seul motif deux tracés inventoriés jusque là séparément, d'affiner certains tracés et de mettre en lumière l'effacement récent des signes 14 et 15.

Conclusion

Cet article a permis de présenter les travaux de relevé 3D conduits sur le site de la Grotta Scritta. Les données disponibles sous la forme de nuages de points et de photos à haute résolution constituent une archive numérique de qualité. Les techniques actuelles de lasergrammétrie et de photogrammétrie permettent de produire une documentation 3D à très haute résolution. Les exemples présentés montrent que l'on peut générer différents types de modèles 3D favorisant la compréhension du site. Ainsi, le modèle 3D constitue une interprétation de la réalité archéologique et forme un nouveau type de documentation, complémen-

taire aux photographies, permettant de nouveaux modes de représentation graphique, de nouvelles façons de prendre des mesures. Aujourd'hui, la Grotta Scritta est un site vulnérable, rendu fragile par l'action du temps et de l'homme. Les relevés effectués sur ce site par la commune en 2010 ont permis d'engager le processus de conservation et de valorisation. Depuis le 7 avril 2014, le site est inscrit au titre des monuments historiques. ●

Remerciements

L'équipe remercie le Service Régional de l'Archéologie en la personne de M. le Conservateur Régional Franck Léandri, ainsi que Mme Mireille Boncompagni Maire d'Olmata-di-Capocorso pour leur confiance et leur soutien tout au long de ce projet.

Note de la rédaction :

La version anglaise de cet article a été présentée en septembre 2015 au XXV^e Symposium du CIPA à Taipei (Grussenmeyer *et al.*, 2015).

Contacts

Pierre GRUSSENMEYER
pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr
Samuel GUILLEMIN
samuel.guillemine@insa-strasbourg.fr
Emmanuel ALBY
emmanuel.alby@insa-strasbourg.fr
INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie
Laboratoire ICube, Equipe TRIO, UMR 7357,
Strasbourg, France
Albane BURENS
albane.burens@univ-tlse2.fr
Laboratoire de Géographie
Environnementale, CNRS, UMR 5602 GEODE
Toulouse, France

Franck ALLEGRINI SIMONETTI
franck.allegri-simonetti@ct-corse.fr
Marie-Laurence MARCHETTI
marie-laurence.marchetti@ct-corse.fr
Collectivité territoriale de Corse, Direction
de la culture et du patrimoine,
Service des Patrimoines-Archéologie,
Ajaccio, France

Références

Amadei, A., Ottaviani, J.-C. 1999. *Les peintures rupestres d'Olmata du Cap*. In: Le mémorial des corses. Dir. Arrighi, Jean-Marie et Vinciguerra, Marie-Jean, T.3, 1999, p. 48.



Figure 12. Relevé vectorisé des motifs de la Grotta Scritta¹ (Olmata-di-Capocorso, Corse, France). En rouge : motifs peints (n°1 à 20) ; en gris : graffitis modernes (n°21) ; en gris-vert : lichens. Le relevé est réalisé à partir d'une orthophotographie extraite du modèle 3D (Figure 9).

Arca A., Gambarin, F. M., 2002. *Influenze mediterranee nelle pitture nel Neolitico finale in Piemonte*. In: Il declino del mondo neolitico. Ricerche in Italia centro-settentrionale fra aspetti peninsulari, occidentali e nordalpini. Atti del convegno (Pordenone, 2001), Quaderni del Museo Archeologico del Friuli Occidentale, 2002, 4, p. 421-425.

Beltran Martinez, A., 1968. *Breve nota sobre tres nuevos abrigos con pinturas de la Edad del Bronce en eceite (Teruel), Villafames (Castellon) y Olmetta du Cap (Corcega)*. In: La Préhistoire, problèmes et tendances. Paris : CNRS, 1968, p. 19-24

Burens, A., Grussenmeyer, P., Carozza, L., Leveque, F., Guillemin, S., Mathe, V. (2014). *Benefits of an accurate 3D Documentation in Understanding the Status of the Bronze Age Heritage Cave „Les Fraux“ (France)*. International Journal of Heritage in the Digital Era, ISSN 2047-4970, Vol. 3(1) : 179-196. DOI: 10.1260/2047-4970.3.1.179.

Campana, S., 2014. *3D Recording in Archaeology and Cultural Heritage – Theory and best practice*. In : F. Remondino, S. Campana ed. : 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage – Theory and best practices. BAR International Series 2598, 2014, p. 7-12.

D'Arragon, B., 1997. *Nuove figure schematiche antropomorfe dalla Sardegna prenuragica: le pitture rupestri della Grotta del Papa, isola di Tavolara (SS – I) Sardinia - Sardegna*. 2nd International Congress of Rupestrian Archaeology. 2-5 Darfo Boario Terme, October 1997.

Gagniere, S., 1959. *Aix-en-Provence*. In: Gallia Préhistoire. T. 2, 1959, p. 252.

Grosjean, R., 1959. *Les premières peintures rupestres de Corse*. Chronique d'Archéologie Préhistorique. Etudes Corses, 1959, 22, p. 77-78.

Grosjean, R., 1960. *Rapports Corse-Sardaigne-Pouilles – Art et monuments circulaires du Bronze moyen*. In BSPF, n° 5-6, volume 57, Informations – Communications, 1960, p. 296.

Grosjean, R., 1966. *La Corse avant l'histoire*. Paris: Klincksieck, 1966, 95 p.

Grosjean, R., 1969. *A propos de l'article d'A. Beltran, de Saragosse, sur les peintures rupestres de la Grotta Scritta (Olmata du Cap Corse)*. Comptes rendus des séances mensuelles. Bulletin de la Société préhistorique française, 1969, T. 66, p. 132-133.

Grussenmeyer, P., Burens, A., Guillemin, S., Alby, E., Allegrini Simonetti, F. and Marchetti, M.-L., 2015. *3D Recording methodology*

applied to the Grotta Scritta Prehistoric Rock-Shelter in Olmeta-Di-Capocorso (Corsica, France). Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5/W7, 179-185, doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-179-2015, 2015.

Grussenmeyer, P., Alby, E., Landes, T., Koehl, M., Guillemin, S., Hullo, J.-F., Assali, P., Smigiel, E., 2012. *Recording approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry and terrestrial laser scanning*. 22nd ISPRS Congress, Melbourne, 25-31 August, 2012. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B5, 553-558, 2012.

Hameau, Ph., 1995. *Les peintures postglaciaires en Provence. Inventaire étude chronologique, stylistique et iconographique*. Documents d'archéologie Française, n°22, ed. de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 124 p.

Kreuzer, G., 1977. *Die felsbilder Korsikas, Antike Welt, zeitschrift für archäologie und kulturgeschichte*. n°2. 1977, p. 61-62.

Lanfranchi, F. (de), Weiss, M. C., 1997. *L'aventure humaine préhistorique en Corse*. Ajaccio : Albiana, 1997, 503 p.

Peche-Quilichini, K., 2003. *L'art rupestre de la Corse : essai de mise en relation iconographique et technique avec les grands sites de Méditerranée occidentale*, Bulletin d'Archéologie et d'Histoire de la Corse, 1, 2003, p. 16-37.

Ripoll Perello, E., 1967. *Nota acerca de las pinturas rupestres de la grotta Scritta en Olmeta-du-Cap (Corcega)*, revue Ampurias. XXIX, Barcelona : (s.n.), 1967, 262-267 p.

Weiss, M. C., 1998. *Préhistoire de l'art corse : les peintures rupestres d'Olmata du Cap, département d'archéologie expérimentale et de moulage, université de Corse*. Bastia : Siciliano, 1998, 61 p.

Weiss, M. C., 2000. *Nouvelle lecture des peintures rupestres préhistoriques d'Olmata-du-Cap et étude de deux mocreaux récupérés de la statue-menhir de Renno*. Rencontres Méridionales de Préhistoire Récente. Troisième session, Toulouse 1998, Ed. Archives d'Ecologie Préhistorique, 2000, p. 257-263.

Weiss, M. C., 2003. *L'art rupestre de la corse è petre scritte*. Ajaccio : Albiana, 2003, 241 p.

Weiss, M. C., 2007. *L'art rupestre de la Corse*. In : *Corse et Sardaigne préhistoriques – relations et échanges dans le contexte méditerranéen*. Dir. André D'Anna, Joseph Cesri, Laurence Ogel, Jean Vaquer. CTHS, 2007, 185-195 p.

ABSTRACT

KEY WORDS: Cultural Heritage, Prehistory, Rock art, 3D Recording, Terrestrial Photogrammetry, Laser Scanning

The Grotta Scritta I prehistoric site is located on the west side of Cap Corse, in the territory of the municipality of Olmeta-di-Capocorso (Haute-Corse, France). The rock shelter is located on a western spur of the mountains La Serra, at 412 m height above sea level. In the regional context of a broad set of megalithic burial sites (regions Nebbiu and Agriates) and a rich insular prehistoric rock art with several engraved patterns (mainly geometric), the Grotta Scritta is the only site with painted depictions of Corsica. Around twenty parietal depictions are arranged in the upper part of the rock overhang and takes advantage of the microtopography of the wall. Today, the Grotta Scritta is a vulnerable site, made fragile by the action of time and man. The 3D scanning of the rock-shelter and paintings of the Grotta Scritta was carried out by the surveyors and archaeologists from INSA Strasbourg and UMR 5602 GEODE from Toulouse, by combining accurate terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques. These techniques are based on a full 3D documentation without contact with the walls of the rock shelter, with the advantage of guaranteeing a perfect preservation. The paper presents the data acquisition methodology followed an overview of data processing solutions based on both image and laser scanning techniques. Several deliverables as point clouds, meshed models, textured models and orthoimages are proposed for the documentation. Beyond their usefulness in terms of valorization, communication and virtual restitution, the proposed models also provide support tools for the analysis and perception of the complexity of the volumes of the shelter (namely for the folded forms of the dome housing the paintings) and for the accuracy of the painted depictions recorded on the orthophoto processed from the 3D model.

Auscultation de l'état de surface de revêtements routiers par photogrammétrie automatisée

■ Gildas ALLAZ - Michel KASSER

Les développements récents en matière de photogrammétrie permettent d'établir une méthodologie automatisée de relevé de l'état de surface des chaussées qui remplace des procédés mécaniques, visuels, ou suréquipés en appareils de haute technologie et donc fort onéreux. Il est maintenant non seulement possible de générer une orthophoto et un modèle numérique de surface (MNS) mais aussi de détecter et d'évaluer les dégradations et déformations des revêtements, le tout à un coût très faible. La large panoplie de produits géoréférencés qui en résulte en fait un outil d'aide à l'analyse et à la décision à échelles géographiques et temporelles multiples pour les spécialistes du domaine routier.

MOTS-CLÉS

photogrammétrie, télédétection, relevé de l'état de surface des revêtements routiers, détection des dégradations et des déformations, carte de synthèse, signalisation horizontale.

sionnels de la route et des transports (*Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute, VSS*) au travers de divers indices d'état correspondant à des notes de 0 à 5.

Un premier indice I1 qualifie les dégradations en fonction de leur étendue et de leur gravité pour chaque tronçon d'une longueur de 50 m. Ce relevé se faisant visuellement, sans aucune mesure, la note finale dépend uniquement d'une estimation et donc de l'observateur. De plus, la localisation des dégradations n'est qu'indicative, à 50 m près. Cela a pour conséquence de rendre difficile la comparaison entre différentes périodes d'observation.

La planéité longitudinale (indice I2) est définie par l'écart-type de la variation de la pente à l'axe de la chaussée. Pour qualifier cette valeur, la pente est mesurée à des intervalles réguliers de 1 m sur un tronçon complet de 250 m. L'écart-type de la pente déterminé à partir des mesures est ensuite introduit dans une table qui détermine quelle note lui correspond.

La planéité transversale (indice I3) est déterminée à partir de la profondeur des ornières. Celles-ci sont introduites dans une table qui attribue une note en fonction de la profondeur mesurée à intervalles réguliers de 50 m.

Un autre indicateur, appelé "exactitude des niveaux", qualifie la planéité de la chaussée par l'écart-type de la différence d'altitude entre un niveau théorique et un niveau réel du revêtement.

Le résultat attendu par les gestionnaires de réseaux routiers est une carte mentionnant pour chaque tronçon les notes des indices. Aucune

alors possible de remplacer certaines méthodes actuelles de relevé d'état des revêtements par un processus d'acquisition basé sur des appareils photo fixés sur un véhicule, avec un post-traitement largement automatisé et donc à très bas coût, offrant un résultat parfaitement géolocalisé et facilement consultable avec les outils logiciels SIG maintenant courants.

Le développement du processus présenté ici s'est réalisé dans le cadre d'un travail de master (Master of Science en Ingénierie du territoire de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale) en étroite collaboration avec la ville de La Chaux-de-Fonds (Canton de Neuchâtel, Suisse) dont les plus de 100 km de revêtements routiers s'usent plus rapidement que la moyenne, dû à la situation géographique à 1 000 m d'altitude.

Techniques actuelles

En Suisse, l'auscultation de la surface des revêtements routiers est normée par l'Association suisse des profes-

Contexte général

L'auscultation de l'état de surface des revêtements routiers en Suisse se base actuellement tantôt sur des relevés visuels et mécaniques, tantôt sur des combinaisons de multiples capteurs embarqués sur des véhicules. Ces méthodes sont fort onéreuses en ressources humaines et/ou en matériel. Les méthodes d'appréciation visuelle, dépendantes de la subjectivité de l'observateur et par essence mal géolocalisées, rendent en outre difficile la comparaison entre différents relevés d'état successifs. En pratique, les méthodes modernes sont actuellement sous-exploitées car les valeurs mesurées doivent être dégradées afin de produire des indices d'état définis autrefois (dès 1977), selon des méthodes maintenant dépassées.

En parallèle, la photogrammétrie bénéficie du développement récent des appareils photo grand public (haute résolution, prise de vues en rafale sans limitation du nombre d'images, très grande dynamique), des logiciels et des capacités informatiques. Il devient

cartographie détaillée des dégradations n'est générée.

Pour réaliser les mesures, des moyens mécaniques sont encore employés de nos jours. Par exemple, pour mesurer la profondeur des ornières, une barre métallique est posée en travers de la route. Une roulette déplacée le long de la barre et reliée à un cylindre permet de noter le profil sur un ruban de papier. Les valeurs doivent ensuite être saisies manuellement pour être informatisées. Cette méthode exige évidemment l'interruption du trafic durant les mesures.

Depuis plusieurs années, des méthodes modernes ont toutefois été développées dans le domaine routier. Il s'agit de véhicules munis de capteurs multiples pouvant collecter des données jusqu'à une vitesse de 100 km/h. Les capteurs de mesures laser, radar ou vidéo (caméra linéaire) sont accompagnés de récepteurs GNSS, de plates-formes inertiels (INS) et d'odomètres pour géolocaliser les mesures. La multiplication de ces appareils en fait des équipements particulièrement onéreux (jusqu'à 900 000 €). Leur précision est notamment dépendante de la disponibilité des constellations GNSS, particulièrement limitée en milieu urbain.

De plus, les équipements utilisés en Suisse se contentent de mesurer des profils en long et des profils en travers à des intervalles de 1 ou 5 m. Des images servant à détecter des dégradations sont traitées individuellement, sans être orthorectifiées. Le but final étant d'établir les indices d'état pour des tronçons d'au moins 50 m, aucune géodonnée continue (MNS ou orthophoto) n'est générée.

Ailleurs, et notamment en France, il existe de multiples autres équipements [Revue générale des routes et de l'aménagement, mars-avril 2015]. Cependant, nous n'avons rencontré qu'un seul équipement permettant de scanner la chaussée à une résolution millimétrique tant longitudinale que transversale (système LDTM de la société canadienne Pavemetrics), sans toutefois générer d'orthophoto, ni d'indice d'état. Tous les équipements consultés dans le domaine routier ne produisent des données que sur une largeur de chaus-

sée de 4.0 à 4.5 m, sans prendre en compte les trottoirs qui présentent pourtant aussi un enjeu important d'entretien.

Dans le domaine de la géomatique, il existe évidemment les équipements de type *mobile mapping* qui offrent à des prix de plusieurs centaines de milliers d'euros des nuages de points à résolution centimétrique et à précision décimétrique.

Les équipements du marché permettent souvent de consulter les résultats au travers de logiciels propriétaires dépendant uniquement du fournisseur de données, sans exportation possible et donc ne permettant pas la superposition avec d'autres données (exemple : conduites souterraines) dans un système d'information géographique (SIG).

Finalement, il semblerait qu'il n'existe actuellement aucun procédé bon marché générant un MNS et une orthophoto à résolution millimétrique et précision centimétrique, accompagnés d'indicateurs d'état, le tout au travers de géodonnées parfaitement interopérables. Le présent travail a été conçu afin de les obtenir à partir de méthodes photogrammétriques automatisées. En effet, on peut considérer que les dernières évolutions de ce domaine (logiciels accessibles à des non-spécialistes et peu onéreux, puissance de calcul disponible) devraient désormais permettre d'atteindre cet objectif.

Étapes du processus

La méthode de relevé d'état par photogrammétrie présentée ici peut être décomposée en deux phases (1). La première consiste à acquérir des images d'une chaussée selon un protocole précis et avec du matériel judicieusement choisi, puis de les orienter par aérotriangulation et enfin d'en extraire un modèle numérique de surface (MNS) et une orthophoto. Durant la deuxième phase, le MNS est traité pour en extraire notamment les dégradations et déformations du revêtement qui sont ensuite mises à disposition des ingénieurs civils au travers de différents supports.

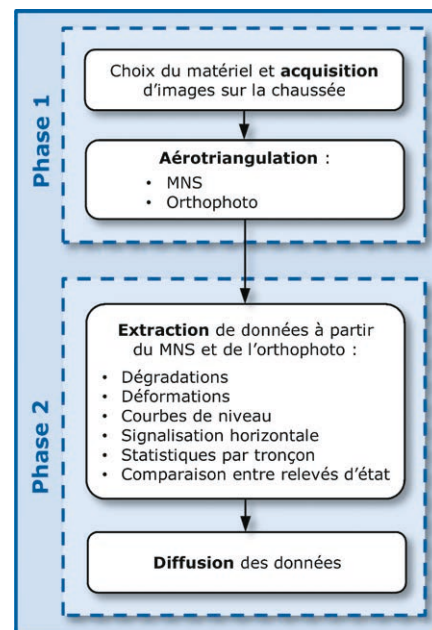


Figure 1. Phases de production.

Équipement

L'équipement de mesure utilisé est particulièrement simple et bon marché.

Du côté photographique, il suffit d'appareils photo capables de prendre des images en rafale sans limitation du nombre d'images, munis d'objectifs grand angle assurant une résolution au sol de l'ordre du millimètre, d'un récepteur GNSS avec mesure sur le code, d'une carte mémoire haute capacité et d'accessoires de communication. Nos travaux ont été effectués avec un *Canon EOS 5D Mark III* et un capteur *GPS Canon GP-E2*.

À cela s'ajoute une structure de support permettant de fixer les appareils photo à l'arrière d'un véhicule, ancrée sur des barres de toit classiques, à une hauteur de l'ordre de 2.50 m en dessus de la chaussée.

Une configuration avec un champ de vision particulièrement large permet d'inclure les trottoirs dans le relevé d'état, ceux-ci comportant aussi des enjeux d'entretien pour les collectivités publiques.

Au niveau informatique, un logiciel de photogrammétrie à bas coût complète l'équipement. Dans notre cas, le logiciel *PhotoScan* de la société Agisoft, après une optimisation approfondie de ses paramètres de calcul, a permis de traiter



correctement des images acquises sur un tronçon de chaussée expérimental de 250 m de long. D'apparence facilement accessible, voire tout public, ce logiciel offre une bonne panoplie de paramètres professionnels qu'il faut prendre le temps d'apprivoiser et configurer adéquatement si l'on veut obtenir un résultat géométriquement acceptable tout en optimisant les temps de calcul.

Afin de coordonner le flux des données tout au long du processus (plusieurs centaines de milliers d'images pour un réseau routier urbain), d'exécuter des traitements sur des données rasters et vectorielles puis diffuser les résultats, le tout le plus automatisé possible à l'aide de scripts, un logiciel de SIG et de télédétection est indispensable. Dans notre cas, nous avons travaillé avec *ArcGIS*.

Un capteur GNSS de type géodésique à mesure sur la phase, pour déterminer une valeur précise des centres de projection des images, ne s'est heureusement pas avéré nécessaire. La méthode développée étant destinée à un milieu urbain, la disponibilité des satellites n'y aurait pas toujours été assurée. De plus, son exploitation aurait nécessité le calcul par interpolation de la position de chaque image entre les positions mesurées par GNSS et donc exigé une synchronisation temporelle parfaite entre les prises de vues et les mesures GNSS, problèmes toujours assez délicats à résoudre. La bonne disposition des appareils photo et la répartition des points de calage permettent de travailler sans récepteur GNSS ni plate-forme inertielle.

Aérottriangulation

Les enjeux photogrammétriques principaux sont de faciliter la mesure automatique des points de liaison (*tie points*), assurer l'autocalibration des objectifs et minimiser le nombre de points de calage (GCP – *ground control points*), le tout avec le moins d'intervention humaine possible afin de limiter les coûts.

L'utilisation de la position indicative ($\sigma = \pm 2$ à 3 m) des images déterminées par mesure GPS sur le code s'avère très souhaitable pour économiser un

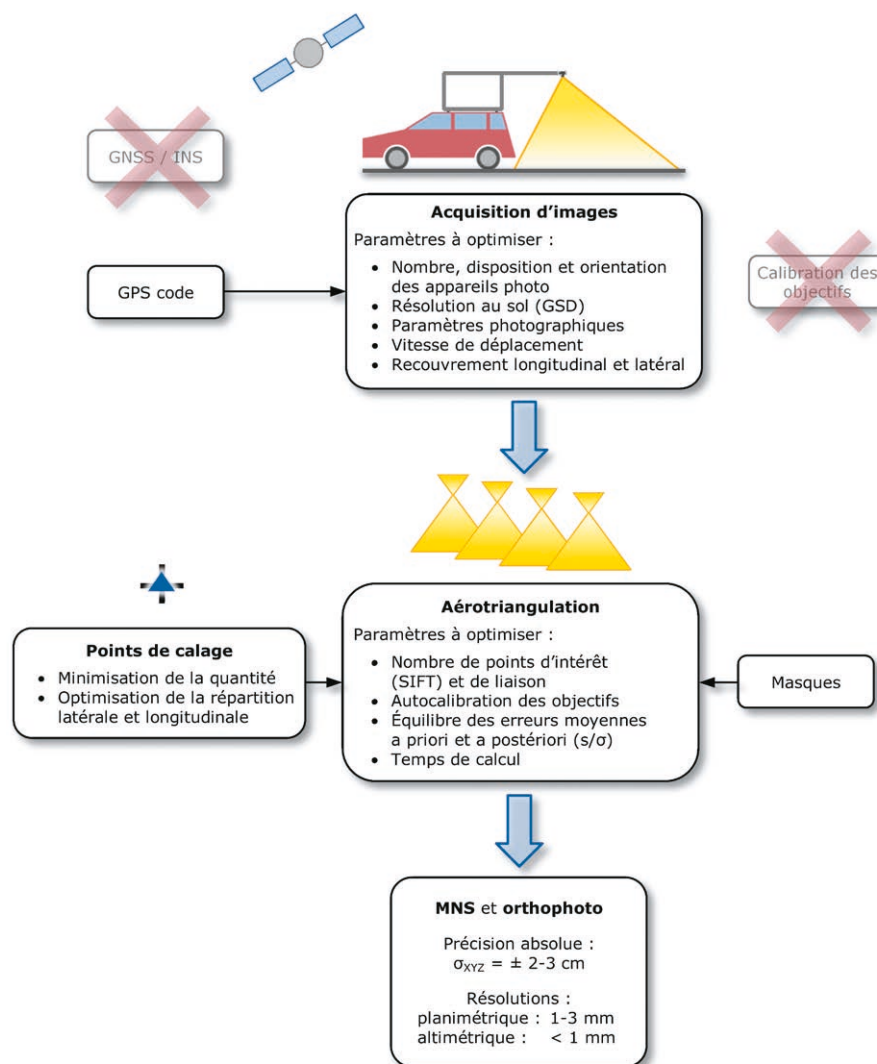


Figure 2. Enjeux et choix photogrammétriques.

temps de calcul important lors de la mesure automatique des points de liaison. Sans cette information, le logiciel perd un temps considérable à chercher des correspondances entre des images prises à deux extrémités de la rue analysée.

Dans le cadre de ce développement, une calibration des objectifs sur un polygone de calibration juste avant ou après l'acquisition d'images dans une rue s'est avérée inutile. Il a fallu par contre opter pour une disposition des appareils photo sur le véhicule d'acquisition qui permette d'autocalibrer les objectifs directement avec les images acquises sur la chaussée. L'entrée dans le champ de vision d'objets sortant du plan horizontal de la chaussée (exemple : pied de façade) s'avère très utile pour ce processus. De plus, les objectifs optimisés pour

le grand public peuvent présenter des imperfections optiques qui ne peuvent être modélisées correctement avec les modèles de distorsion utilisés en photogrammétrie. Des zones périphériques du champ de chaque image doivent alors être masquées.

Quant aux points de calage, il est bien évidemment nécessaire, pour des raisons économiques, d'éviter de devoir matérialiser de nombreux repères dans les rues et d'en déterminer la position par des méthodes topométriques. Des objets déjà connus tridimensionnellement dans des bases de données peuvent être utilisés, tels que les points de référence du cadastre ou les plaques de regards du réseau d'assainissement. De plus, cette combinaison d'objets permet une bonne répartition des points de calage sur la largeur de



Figure 3. Extrait de l'orthophoto (à gauche) et du MNS (à droite) de la rue de l'Helvétie à La Chaux-de-Fonds (longueur de l'extrait : env. 70 m).

la rue (repères cadastraux sur les trottoirs, regards au milieu de la chaussée), évitant ainsi un basculement latéral du bloc d'images. Longitudinalement, ces points peuvent être espacés de 60 à 70 m tout en assurant une précision absolue de l'ordre de ± 2 à 3 cm (1σ) selon des observations faites avec de nombreux points de contrôle fixés sur le tronçon d'essais.

À la fin de cette phase photogramétrique, un MNS au format raster (GeoTIFF) et une orthophoto à une résolution millimétrique sont produits de manière automatique (3). La résolution altimétrique du MNS (précision relative) s'avère submillimétrique, permettant ainsi d'observer des objets de très faible épaisseur (exemples : joints à la lance thermique, marquages routiers, pertes de gravillons).

Détection des dégradations

Une orthophoto et un MNS ne sont pas suffisants pour une analyse des revêtements par les responsables de la gestion de réseaux routiers. Pour eux, il est non seulement vital de détecter chaque dégradation individuellement mais aussi de qualifier l'état du revêtement par des notes attribuées à chaque tronçon routier. Le MNS, d'une extrême richesse en matière de détails géométriques, est ainsi le point de départ de toute une série d'exploitations automatisées en vue de produire des indicateurs directement interprétables par l'utilisateur.

À partir du MNS millimétrique (5), les aspérités correspondant à des dégradations de différentes longueurs d'ondes spatiales peuvent être détectées par calcul puis qualifiées en fonction de leur géométrie. Le principe consiste à déterminer un MNS du revêtement, lissé de

manière à supprimer les petites aspérités, puis à le comparer au MNS mesuré original (4) par une soustraction (calcul de déblai-remblai).

Le traitement s'effectue principalement à l'aide de filtres et d'analyses par fenêtres glissantes (valeur statistique attribuée à un pixel en fonction de ses pixels voisins, exemple : erreur moyenne de la pente dans un rayon de 5 cm). À préciser qu'une analyse sur les seules valeurs altimétriques s'avérerait inappropriée, dû aux dévers de la chaussée et à la pente longitudinale. Il est nettement plus efficace d'appliquer les filtres aux valeurs de pente qui, elles, devraient être localement constantes. Un traitement de la courbure (dérivée seconde, pente de la pente) se révèle beaucoup trop bruité.

En premier lieu, des aspérités de grandes tailles, telles que les bordures de trottoirs et d'îlots, doivent être détectées puis éliminées du traitement. Elles sont définies par une très forte variation locale de la pente. Leur détermination consiste donc à calculer

l'erreur moyenne de la pente par une fenêtre glissante d'une taille bien déterminée, puis de sélectionner les erreurs moyennes excessives.

Ensuite, les aspérités de tailles variables (fissures, perte de gravillons, nids de poule, etc.) sont détectées par filtrage du MNS à différentes résolutions. Les zones couvertes par ces dégradations sont retirées du MNS (6) avant que celui-ci soit lissé (7).

La différence entre le MNS lissé et le MNS original est déterminée par une simple soustraction, équivalente à un calcul de déblai-remblai. Les valeurs du raster résultant de cette étape sont les profondeurs des dégradations (8). Ce résultat est déjà intéressant, mais pas encore suffisant pour les analyses à l'échelle d'un réseau routier complet.

Il vaut la peine de vectoriser chaque dégradation pour en tirer un polygone vectoriel indépendant pour chacune d'elles. Cela permet bien sûr d'alléger le volume de données à publier sur un géoportail, mais surtout de renseigner attributairement chaque dégradation sur

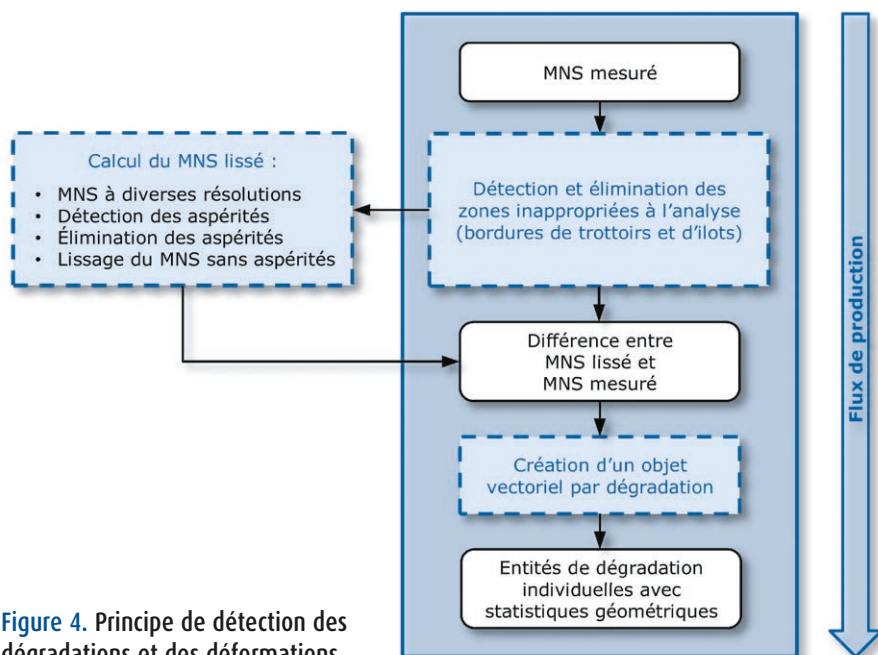


Figure 4. Principe de détection des dégradations et des déformations.

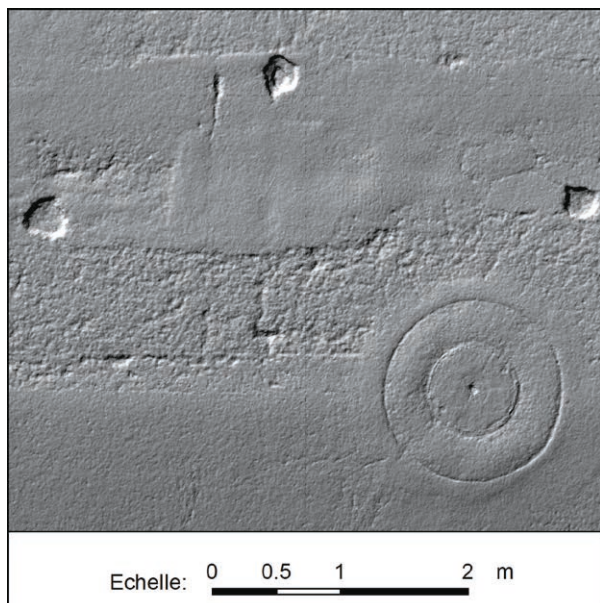


Figure 5. Extrait du MNS mesuré original.

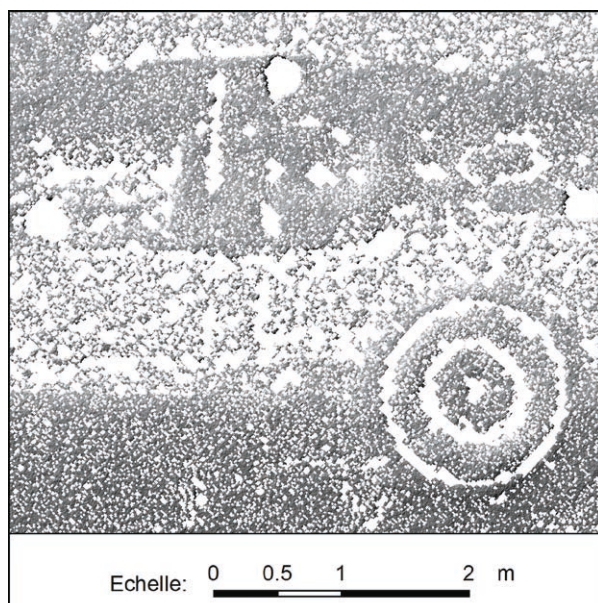


Figure 6. MNS extrudé, sans aspérités.

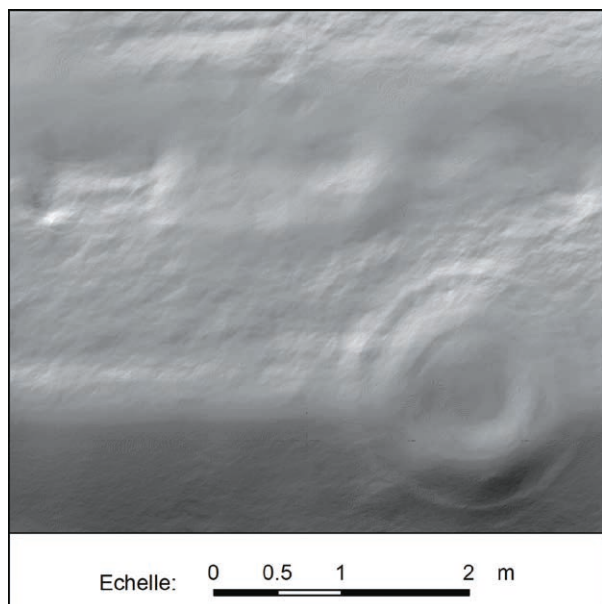


Figure 7. MNS lissé, sans dégradations.



sa géométrie (exemples : profondeur maximale, surface, volume).

Un traitement similaire peut être appliqué à des déformations du revêtement correspondant à des aspérités de tailles plus grandes, telles que des ornières (9).

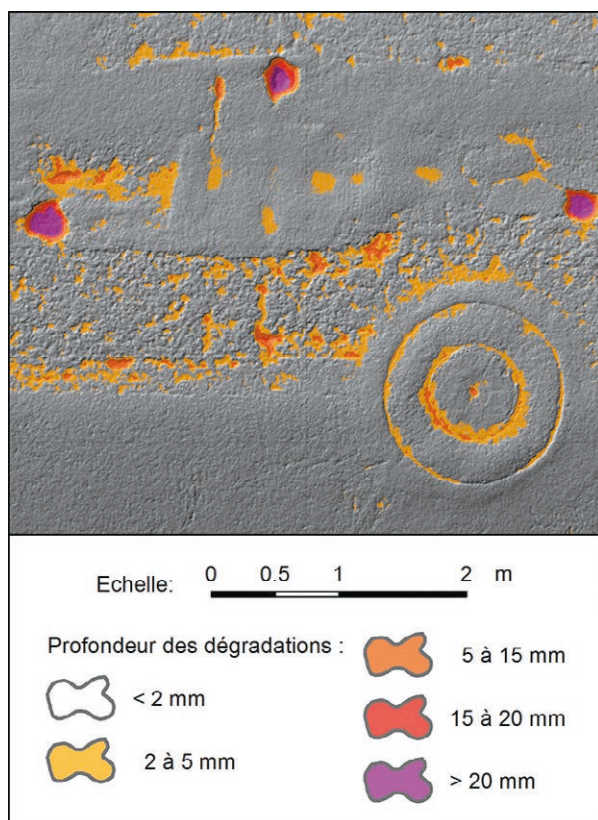


Figure 8. Profondeur des dégradations.

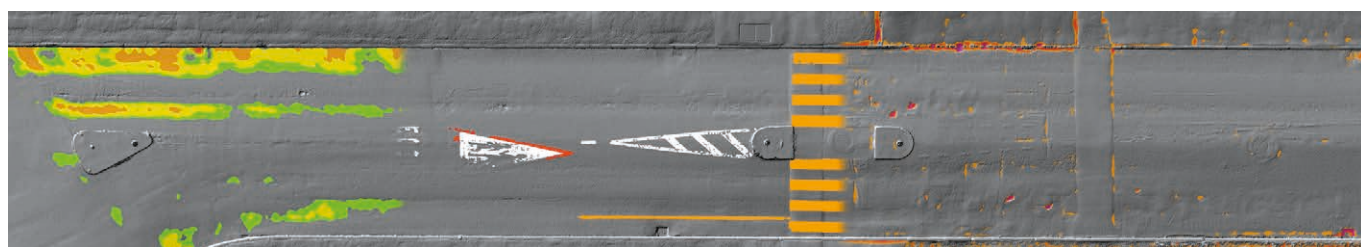


Figure 9. Détection des déformations (ornières), de la signalisation horizontale et des dégradations sur la rue de l'Helvétie à La Chaux-de-Fonds.

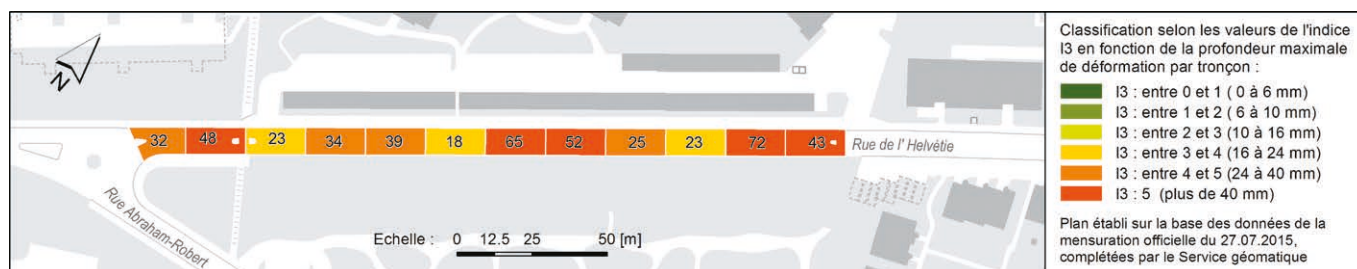


Figure 10. Carte de synthèse des déformations, classification selon la profondeur d'ornièrre maximale par tronçon de 20 m (indice I3 de la norme VSS).

Afin d'obtenir une vue d'ensemble d'un réseau routier, les valeurs géométriques des dégradations peuvent être synthétisées par tronçon routier à l'aide d'outils SIG conventionnels. Ces valeurs de synthèse peuvent être par exemples les indices de planéité longitudinale (I2) et transversale (I3) édictés par les normes VSS (10), ou la somme du volume des aspérités. Ce type de carte permet de mettre en évidence l'évolution des dégradations entre différents relevés.

Il s'est également avéré que la représentation de courbes de niveau à faible équidistance (exemple : 2 cm) est un outil très utile pour une analyse visuelle rapide (ornièrage, écoulement de l'eau de surface) pour les ingénieurs civils (11).

Quant à l'orthophoto, elle permet, par classification supervisée d'image, d'extraire la signalisation horizontale (marquages routiers) sous forme vectorielle (9).

Tous ces processus peuvent être automatisés s'ils sont exécutés à l'aide d'outils combinant des fonctions de SIG et de télédétection (exemple : *ArcGIS* et ses extensions *Spatial Analyst* et *3D Analyst*, et des scripts en langage Python).

Chaque paramètre de calcul et de représentation est adaptable aux différents types de revêtement et aux besoins des responsables de l'entretien des réseaux routiers.

Diffusion

Un guichet cartographique (géoportail) permet aisément de mettre à disposition la grande diversité de données extraites tant à l'échelle d'un réseau urbain (carte de synthèse par tronçon routier) qu'à une échelle de détail (position et caractéristiques de chaque dégradation).

De plus, certaines plateformes de géoportail permettant d'éditer des données en ligne, l'interaction avec les utilisateurs finaux est assurée. Il devient possible aux gestionnaires d'un réseau routier d'éditer des dégradations détectées automatiquement, de modifier les indices d'évaluation d'un tronçon routier et d'ajouter des commentaires, y compris à partir d'un support mobile (exemples : smartphone, tablette) lors d'une visite sur le terrain.

Exemples d'utilisation et avantages

Ce procédé, ayant été initialement conçu pour le relevé d'état de surface des revêtements au travers des indices édictés par les normes suisses du domaine routier, permet de déterminer les indicateurs de planéité ainsi que de qualifier la géométrie des dégradations (superficie, profondeur, volume). L'évolution de leur état devient facilement comparable entre différentes époques de manière objective. Mais en plus, cette solution répond à d'autres besoins.

Lors du projet de réfection d'un tronçon routier, l'observation des déformations, notamment à l'aide des courbes de niveau, permet aux ingénieurs civils de mieux cibler l'emplacement de sondages, de visualiser en détail l'état de la chaussée et de ses alentours depuis le bureau et de faciliter la communication avec les riverains et les décideurs des collectivités publiques.

À la fin de travaux, il est possible d'établir un relevé de l'état initial d'un revêtement afin de pouvoir le comparer à un deuxième relevé espacé de quelques années servant d'appui à la gestion de la garantie d'exécution.

Il en va de même dans le cas de preuve à futur lorsqu'un événement (exemple : chantier privé aux abords d'une route publique) peut amener des dégradations à un revêtement. Le relevé d'un état initial avant travaux est utilisé comme preuve comparable à un état après travaux.

L'espace public occupé par une chaussée est muni de multiples équipements qui sont nombreux à pouvoir être observés sur l'orthophoto. Les grilles de collecte des eaux de pluie, les regards de visite des conduites d'assainissement, d'eau potable et d'autres conduites souterraines peuvent être ainsi documentés avec précision. Dans le même ordre d'idées, les marquages routiers et leur usure sont aussi facilement cartographiables.

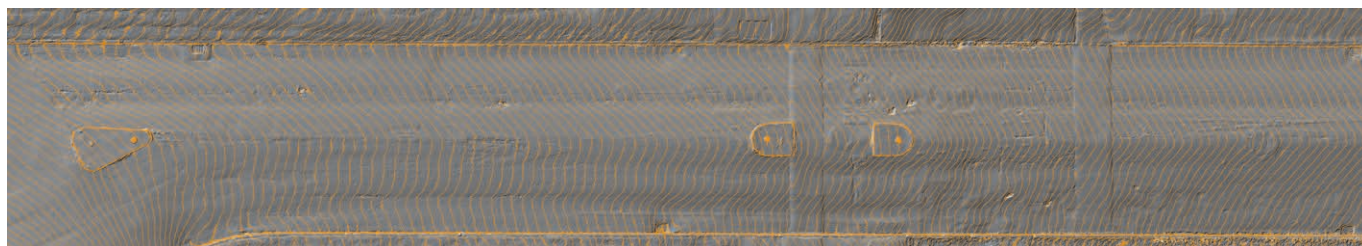


Figure 11. Courbes de niveau à une équidistance de 2 cm sur la rue de l'Helvétie à La Chaux-de-Fonds.



Par la finesse des résultats obtenus, ce procédé est une aide précieuse à la recherche et au développement dans le domaine routier. Lors d'essais de nouveaux revêtements, il est possible d'inspecter de manière très détaillée leur évolution à des fréquences temporelles rapprochées afin d'en qualifier l'usure. Pour un tronçon d'une longueur restreinte, il est possible d'améliorer encore les précisions et résolutions citées ci-dessus.

Par rapport aux méthodes actuellement sur le marché, soit du domaine routier (mécanique ou embarqué), soit du *mobile mapping*, cette méthode a l'avantage d'être basée sur un seul type de capteur, bon marché et facile à prendre en main, incluant les trottoirs dans son champ de vision, ne nécessitant pas l'interruption du trafic, indépendante de la subjectivité d'un observateur et donc permettant la comparaison temporelle objective. L'équipement sans récepteur GNSS de type géodésique à mesure sur la phase ni INS permet de s'affranchir du manque de disponibilité des satellites en milieu urbain et des coûts élevés en matériel. À l'aide de logiciels judicieusement choisis, le procédé est largement automatisable. À partir d'une unique acquisition de données sur le terrain (images), il est possible d'extraire, à l'aide de processus adaptables à chaque situation, une panoplie complète de produits et indicateurs, tous parfaitement géoréférencés et ainsi superposables à d'autres géodonnées dans n'importe quel système d'information géographique.

Conclusion

À partir d'images acquises sur une chaussée, la méthodologie développée offre la production d'un modèle numérique de surface (MNS) accompagné d'une orthophoto à une précision absolue centimétrique et une résolution millimétrique, puis la détection des dégradations et des déformations ainsi que leurs statistiques géométriques sous la forme de cartes de synthèse par tronçon, permettant la comparaison objective entre différentes époques successives. Le tout est accompagné de la cartographie de la signalisation

horizontale et de courbes de niveau. L'intégralité des traitements des images est automatisable dès maintenant, ce qui conduit à des coûts très faibles. Les données géographiques résultant de ce processus sont pleinement interopérables avec toutes autres géodonnées et intégrées dans un système d'information géographique (SIG) répondant ainsi à une grande variété de besoins de la gestion du domaine public. Il s'agit donc d'un outil d'aide à l'analyse et à la décision à échelles géographiques et temporelles multiples pour les spécialistes du domaine routier. ●

Remerciements

Nous remercions Bertrand Cannelle et Francine Laferrière, professeurs à la HEIG-VD, pour leurs conseils durant ce travail, ainsi que la ville de La Chaux-de-Fonds pour son soutien et ses apports au développement de cette méthode.

Contacts

Gildas ALLAZ

Ingénieur en géomatique MSC - Service géomatique de la ville de La Chaux-de-Fonds
gildas.allaz@ne.ch

Michel KASSER

Professeur de Géodésie - HEIG-VD - Institut de Géomatique, Gestion de l'environnement, Construction et Surveillance d'ouvrages (G2C)
michel.kasser@heig-vg.ch

ABSTRACT

Recent developments in photogrammetry make possible to establish an automated methodology to survey the state of road pavement surfaces that replaces mechanical, visual, or over-equipped with high-tech and very expensive devices. It is now not only possible to generate an orthophoto and a digital surface model (DSM) but also to detect and assess the cracks, damages and deformations, all at a very low cost. The wide quantity of georeferenced products that results of this process is a tool to assist in analysis and decision at multiple geographic and temporal scales for the road's specialists.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BAILLY André,
ingénieur, Paris

BOTTON Serge,
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée

CHRISMAN Nicholas,
Rédacteur, Sciences géographiques
(États-Unis)

DUQUENNE Françoise,
ingénieur général des Ponts honoraire,
Saint-Mandé

DURAND Stéphane,
maître de conférences, ESGT Le Mans

FLACELIÈRE Bernard,
ingénieur topographe, Pau

GRUSSENMEYER Pierre,
professeur des universités,
INSA Strasbourg

HULLO Jean-François,
Dr.-Ing., ingénieur de recherche,
EDF R&D, Clamart

KASSER Michel,
professeur des universités,
HEIG-VD (Suisse)

KOEHL Mathieu,
maître de conférences, INSA Strasbourg

LANDES Tania,
maître de conférences, INSA Strasbourg

MAILLARD Jean-Pierre,
géomètre-expert foncier,
Marne-la-Vallée

MAINAUD DURAND Hélène,
ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique,
ingénieur topographe, CERN Genève

MOREL Laurent,
maître de conférences, ESGT Le Mans

NATCHITZ Emmanuel,
ingénieur, EIVP Paris

PANTAZIS N. Dimos,
professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent,
professeur CNAM, ESGT Le Mans

REIS Olivier, ingénieur,
traducteur Sarreguemines

ROCHE Stéphane,
professeur, Université Laval (Québec)

TROUILLET Michel,
ingénieur topographe, Lyon

VINCENT Robert,
ingénieur, Paris

Le GPS dévoile les liens entre les grands séismes de subduction au Chili

Le séisme d'Illapel (16 septembre 2015) a-t-il été déclenché par les déformations post-sismiques du séisme de Maule (27 février 2010) ?

■ Émilie KLEIN

Le 16 septembre 2015, le séisme de Mw 8.4 d'Illapel se produit au large des côtes Chiliennes, dans la région de Coquimbo. Dans cette région, le dernier séisme de Mw équivalente s'est produit en 1943 et on y observe une activité sismique anormale depuis 1997. Les campagnes de mesures GPS qui y sont réalisées annuellement depuis plus de 15 ans, nous ont permis d'étudier la déformation en surface associée au chargement de contraintes avant le séisme. En 2010, à 500 km au Sud, se produit le séisme géant de Maule (Mw 8.8), dans une région elle aussi densément instrumentée en station GPS. En plus d'avoir mesuré la phase co-sismique associée à ce séisme, nous avons observé le phénomène post-sismique de relaxation viscoélastique qui se déclenche dans les couches profondes de la Terre tout de suite après le séisme. Les déformations engendrées sont mesurées encore aujourd'hui à travers tout le continent et en particulier dans la région du séisme de 2015. Dans cette étude, menée au Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure (Paris), nous retraçons deux décennies de déformations observées par GPS dans ces deux régions voisines, en essayant de comprendre les interactions entre les deux séismes.

MOTS-CLÉS

Séisme géant de subduction, Chili, positionnement par GPS, déformations post-sismiques

subduction Chilienne, commençons par définir un certain nombre de concepts de la tectonique des plaques, typiquement le fonctionnement d'une faille.

Comment une faille fonctionne-t-elle ?

Une faille est simplement la limite entre deux blocs tectoniques qui se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ces blocs représentant d'énormes quantités de matière ont un déplacement lent (jusqu'à 10 cm/an) et régulier, très stable sur au moins des centaines de milliers d'années. Si le contact entre les deux plaques est assez lisse, alors la faille va glisser en continu, on parle alors de fluage. A l'opposé, si la rugosité du contact empêche ce fluage, alors la faille ne glisse pas : elle est bloquée. Le déplacement des plaques ne change en rien. C'est donc la bordure des plaques qui va se déformer en accumulant la déformation élastique créée par le déplacement en champ lointain et le blocage local. Comme un ressort qui se tend, la bordure de plaque va encaisser la déformation jusqu'à ce qu'elle soit suffisante pour faire sauter le blocage sur la faille : c'est à ce moment que se produit le séisme.

Par la suite, la faille va de nouveau se bloquer et le cycle accumulation lente – rupture sismique se reproduira à l'infini. Bien évidemment les choses sont un peu plus complexes que ce modèle simple. En particulier, le séisme peut n'absorber qu'une partie de la déformation accumulée, le reste se faisant par du glissement

Parce qu'il permet un positionnement précis à quelques millimètres près, le GPS est un merveilleux outil pour la mesure de la déformation de l'écorce terrestre. En particulier les mesures en continu permettent d'établir des séries temporelles qui ont mis en évidence des phénomènes variables dans le temps à l'échelle de quelques jours à quelques années dans des contextes tectoniques où l'on parlait plutôt en termes de millions d'années auparavant. Dans les premiers temps du GPS, on se satisfaisait de déterminer des vitesses de déformation à partir des déplacements constatés entre deux campagnes de mesures. Aujourd'hui que l'on dispose de mesures en continu sur bon nombre de structures actives, on constate de plus en plus :

1. que les modèles standards (ie.

Okada) d'accumulation de déformation élastique n'expliquent pas toute la déformation constatée,

2. que la déformation n'est pas constante dans le temps, et ce sur des durées assez courtes,
3. que des déformations transitoires (parfois périodiques) se produisent de manière épisodique, et peut être parfois en lien avec le déclenchement des séismes.

Il y a donc beaucoup de choses à découvrir sur le fonctionnement des failles à l'aide de cette méthode relativement récente. Le Chili s'avère être un terrain de jeu parfait pour comprendre comment se prépare la rupture d'un segment de faille et ce qui contrôle le timing de son déclenchement. Mais avant de nous lancer dans l'étude de la



asismique avant ou après le séisme. Au cours des 10 dernières années, la densification des stations permanentes dans les zones de faille nous permet de quantifier de plus en plus précisément l'amplitude et la durée de ces déformations pré- et post-sismiques, en particulier dans les zones de subduction.

Rappelons que le mécanisme de la subduction est le plongement d'une plaque océanique sous une autre plaque océanique ou continentale (Figure 1). Les deux plaques convergent l'une vers l'autre et la zone de contact entre ces deux plaques est bien souvent bloquée. Ces zones de subduction font parties des contextes tectoniques les plus actifs avec des vitesses de convergence très rapides et sont le théâtre de séismes majeurs réguliers. Typiquement, le Japon, l'Indonésie, et l'Amérique du Sud, ont tous les trois subi un méga-séisme de magnitude proche ou supérieure à 9 au cours des 20 dernières années. Par rapport aux séismes en contexte de collision continentale, tel que le séisme du Népal en avril dernier, les séismes de subduction sont moins destructeurs, parce qu'ils se produisent au large, et génèrent des ondes relativement basses fréquences.

En revanche, les tsunamis qu'ils engendrent ont eux des conséquences dramatiques. On se souvient tous du tsunami indonésien en 2004, dont le bilan s'élève à plus de 250 000 morts à travers les pays de l'Océan indien, ou encore de la catastrophe nucléaire japonaise en 2011. L'étude des séismes géants de subduction présente donc un intérêt de premier ordre et la géodésie spatiale nous apporte pour cela des données précieuses.

La zone de subduction Chilienne : contexte géodynamique et sismicité historique

Avec une vitesse de convergence de l'ordre de 7 cm/an entre la plaque Nazca et la plaque Amérique du Sud, la subduction chilienne est l'une des plus rapides sur Terre. Sa côte est située à moins de 100 km en moyenne de la

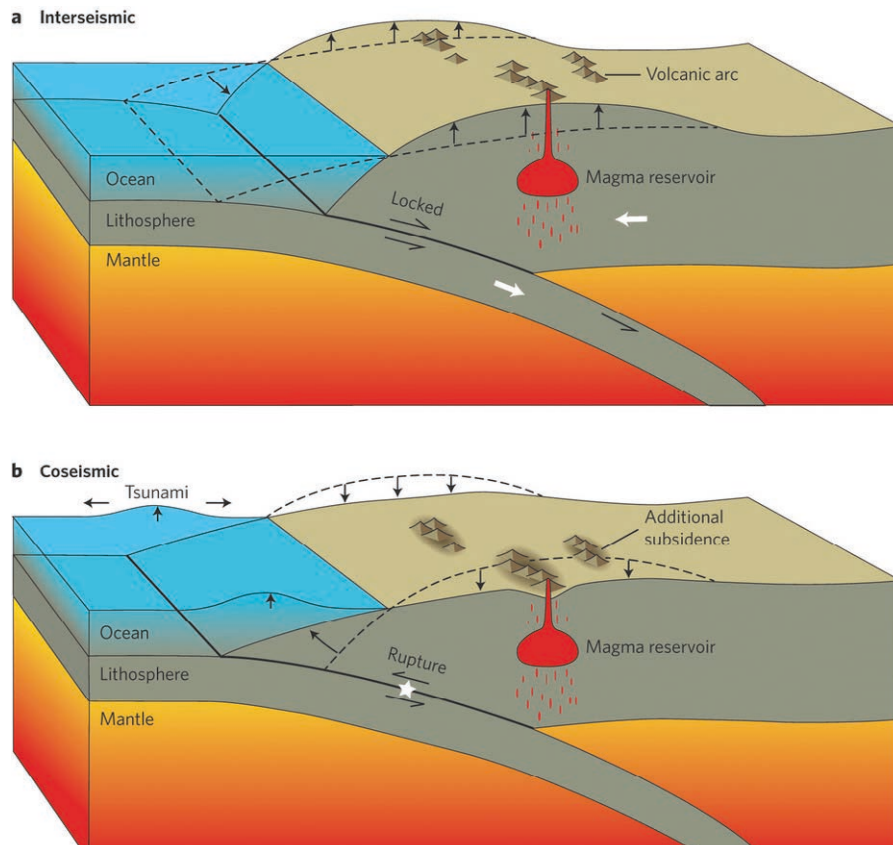


Figure 1. Cycle sismique en zone de subduction : (a) phase inter-sismique ; (b) phase co-sismique (tiré de Jonsson, 2013).

fosse de subduction, 70 km au plus proche, contre 200 km dans le cas du Japon ou de Sumatra. Cela nous permet de faire des mesures denses proches de la zone d'accumulation de contrainte. De plus, le continent Sud-Américain offre une continuité terrestre spatiale sans précédent contrairement au Japon et à Sumatra qui sont des archipels, rendant impossible les mesures par géodésie spatiale sur une large partie de la surface au dessus de l'interface. Même si de gros efforts sont menés pour développer les techniques de géodésie fond de mer, elles restent actuellement encore expérimentales et surtout très coûteuses. Elles sont donc encore difficiles à déployer en réseau dense et à petite maille, condition nécessaire pour obtenir une résolution suffisamment haute pour l'étude des déformations au niveau de l'interface.

Le Chili apparaît donc comme un laboratoire naturel idéal pour étudier la subduction, dont malheureusement la connaissance de la sismicité historique ne remonte pas au delà du XVI^e siècle. Théâtre du plus gros séisme

jamais enregistré sur Terre, séisme de Valdivia en 1960, de Mw 9.5 (Mw ou magnitude de moment, échelle logarithmique quantifiant l'énergie émise par le séisme), on y observe un séisme de magnitude supérieure ou égale à 8 en moyenne tous les 10 ans et des séismes de magnitude $6 < Mw < 7$ très réguliers (Figure 2), apportant ainsi des données précises pour l'étude du cycle sismique.

Au cours des cinq dernières années, ce ne sont pas moins de 3 séismes de magnitude supérieure à 8 qui se sont produits au Chili : le séisme de Maule, de Mw8.8 en février 2010, le séisme d'Iquique de Mw8.1 en avril 2014 et tout dernièrement le séisme d'Illapel de Mw8.4 en septembre 2015. Ce dernier séisme est particulièrement intéressant puisqu'il se produit dans une région située à quelques 500 km de la zone de rupture du séisme du Maule (2010) pour lequel 5 ans de données post-sismiques ont été analysées précisément et modélisées au laboratoire de Géologie de l'Ecole normale supérieure de Paris. La densité des données GPS recueillies depuis 2004 dans les deux

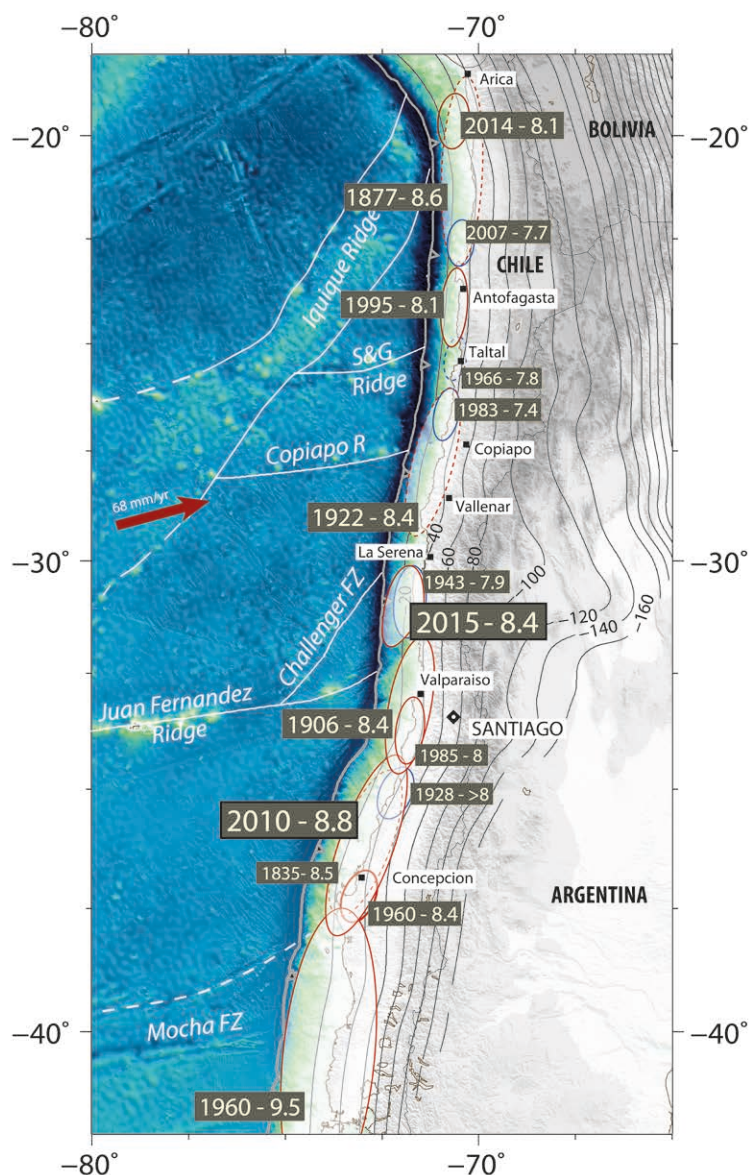


Figure 2. Distribution temporelle et spatiale des grands séismes de subduction de $M_w > 7.5$ depuis le 19^e siècle au Chili (Kelleher 1972, Lomnitz 2004, Beck 1998). La vitesse de convergence entre les plaques Nazca et Amérique du Sud est indiquée en rouge. Topographie et bathymétrie issues de ETOPO1. Les lignes blanches représentent les principales structures bathymétriques de la plaque Nazca.

régions nous permet ainsi d'observer l'effet du premier séisme (Maule) sur les déformations en surface dans la région du deuxième séisme (Illapel), et de mieux comprendre leur incidence sur l'occurrence de ce séisme.

Dix ans de déformation étudiées par GPS au Centre-Chili

L'histoire commence en 1997 lorsqu'une soudaine augmentation de la sismicité est observée au mois de juillet dans la région de Coquimbo-La Serena (32-29°S) (Figure 3). Six séismes dits

de subduction (séisme inter-plaque entre la plaque chevauchante et la plaque subduite) de magnitude proche de 6 se produisent en deux mois. Le 15 octobre 1997, un séisme intra-plaque de $M_w 7.3$ se produit juste sous la ville de Punitaqui, occasionnant de nombreux dégâts. La sismicité dans la région continue d'augmenter et pas moins de 17 séismes de $M_w > 6$ s'y sont produits depuis. A partir de 2004, l'équipe de recherche sur la subduction Chilienne du laboratoire de Géologie de l'Ecole normale supérieure de Paris commence à installer un réseau de marqueurs GPS avec pour objectif de mesurer préci-

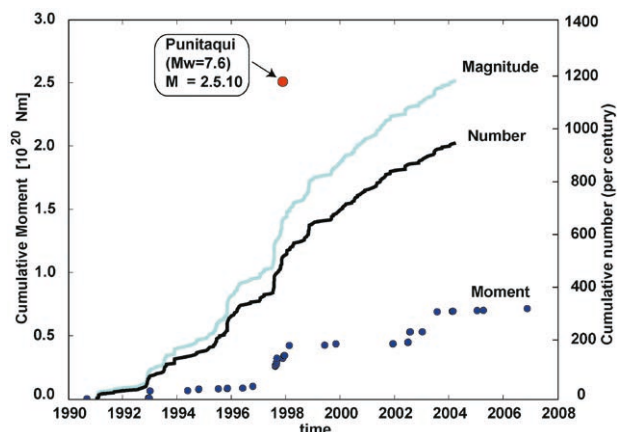


Figure 3. Moment sismique cumulé comparé au nombre de séismes en fonction du temps entre 1990 et 2008 dans la région de Coquimbo (Vigny et al., 2009).



Figure 4. Point géodésique en centrage forcé sur un marqueur.

sément la déformation de la plaque chevauchante [Vigny et al 2009].

En effet, avec plus de 4 000 km de côte chilienne, il n'est pas envisageable de couvrir la totalité de l'interface de subduction de stations GPS permanentes avec une densité suffisante. Mais les techniques de positionnement GPS permettent aujourd'hui d'atteindre des précisions millimétriques sur les positions horizontales des points mesurés lors d'une campagne de quelques jours. Une cinquantaine de marqueurs sont ainsi installés. Le principe est simple, on scelle un marqueur dans un affleurement rocheux, *a priori* stable (non fracturé) et solidaire de la croûte. Ce repère est muni d'un pas de vis, sur lequel l'antenne GPS peut être vissée directement à chaque visite (Figure 4). Par rapport à l'installation classique de trépieds, cette technique présente l'avantage de limiter les erreurs de centrage, de mise à niveau et de mesure de hauteur d'antenne.



Installée très proche du sol, l'antenne est nettement moins visible que sur un trépied, ce qui permet l'installation de sites relativement proches des routes, donc facilement accessibles.

La mesure est en contrepartie plus sensible aux trajets multiples, ainsi qu'aux masques. Il est donc indispensable de choisir des sites offrant un ciel bien dégagé, opération facilitée par l'environnement chilien, relativement désertique à ces latitudes. Une équipe munie d'un 4x4, 25 récepteurs et batteries externes, il n'en faut pas plus pour mesurer, en moins de trois semaines, une cinquantaine de points. Une telle organisation permet aussi de mesurer de nombreux points en simultanément, condition nécessaire à un traitement des données efficace en différentiel. La répétition annuelle de telles campagnes permet finalement de définir des vitesses de déplacements horizontales avec une précision de l'ordre de quelques mm/an en quelques années.

Le processus de traitement des données GPS utilisé est donc relativement classique, une stratégie différentielle avec le logiciel GAMIT [King and Bock 2000]. Mais le point capital réside dans leur combinaison (avec le filtre de Kalman GLOBK) et surtout leur mise en référence. En effet, nous étudions des déformations dont l'amplitude et les variations sont millimétriques, un système de référentiel robuste et stable est donc impératif. Avant 2010, ce système était défini par une douzaine de stations réparties sur tout le continent Sud-Américain, depuis son extrémité Sud jusqu'à la Guyane. Or, nous verrons un peu plus loin dans cet article que les déformations post-sismiques engendrées par le séisme géant de Maule en 2010 perturbent une très grande partie du continent, jusqu'à la côte Est de l'Argentine. Plusieurs stations du système initial doivent donc être éliminées. Fragilisé par une faible quantité de station, ce système devient d'autant plus sensible aux très fortes variations saisonnières qui rythment le bassin amazonien, dans lequel se trouvent un autre couple de stations du système. La fragilité technique (nombreux changements d'antenne notamment) de certaines stations

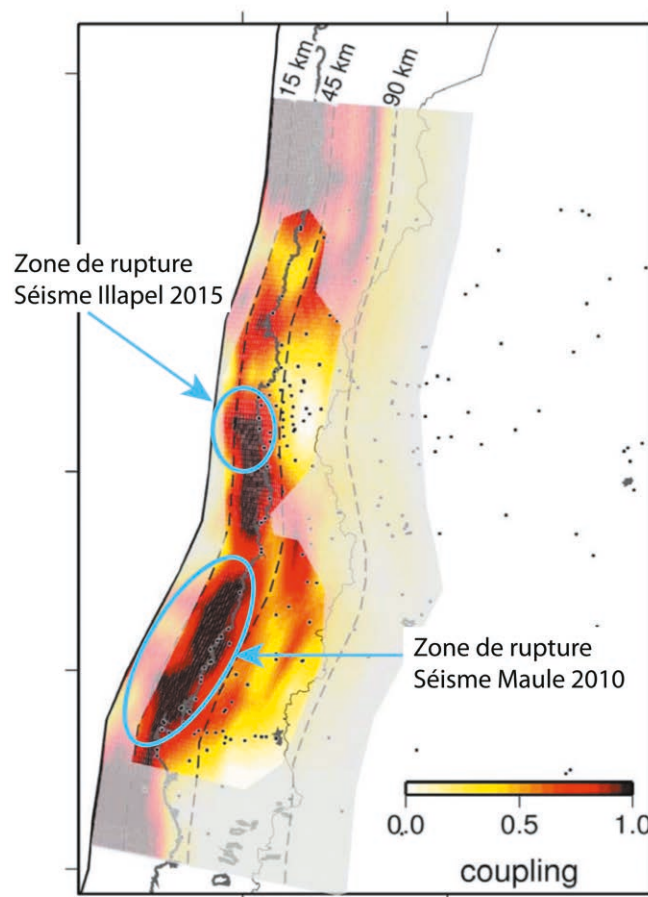


Figure 5. Modèle de couplage inter-sismique déterminé à partir des données de campagnes GPS entre 2004 et 2010 dans la région de Coquimbo (modifié d'après Métois et al., 2012).

restantes déstabilise complètement notre système initial.

Nous revoyons donc toute notre stratégie de mise en référence et décidons de stabiliser notre solution en la combinant avec les données mondiales traitées et mises à disposition par la SOPAC. Pour cela, nous fixons une trentaine de stations IGS réparties sur le globe, soigneusement choisies pour leur longueur, stabilité ainsi que pour leur éloignement des zones de déformation tectonique. Finalement, afin d'étudier la déformation engendrée par la subduction, il ne nous reste plus qu'à déterminer un référentiel appelé "Amérique du Sud stable" par minimisation des vitesses des stations localisées sur la partie supposée stable du continent, le craton brésilien. A noter que le référentiel Amérique du Sud stable défini par NNR Nuvel-1A ne permet en effet pas de minimiser ces vitesses, laissant des vitesses résiduelles systématiques de quelques 2 mm/an orientée vers le Nord. Vingt ans de campagne tout au long de l'interface chilienne ont ainsi permis de déterminer un champ de vitesse quasi-

continu avec un point environ tous les 20 km. On observe ainsi des vitesses de l'ordre de 20 à 40 mm/an, orientées Nord-Est, lorsqu'exprimées dans notre référentiel Amérique du Sud stable. Les vitesses obtenues sur l'interface chilienne exprimées dans ce référentiel témoignent de l'accumulation des contraintes sur le plan de faille et nous permet d'estimer le niveau de blocage, que l'on appellera couplage, entre les plaques Nazca et Amérique du Sud.

La densité spatiale de points de mesure a permis de mettre en évidence d'importantes variations latérales de ce couplage tout au long de l'interface, qui se traduisent par des variations d'amplitudes des vitesses de surface. Plus celles-ci sont fortes, plus le couplage est important. On observe aussi clairement sur certains profils une décroissance des vitesses en allant vers l'intérieur des terres, associée à une rotation dans le sens horaire des vecteurs. Plus ce comportement est marqué, plus il traduit là aussi un fort couplage. Enfin, si la rotation se fait sur une courte distance (~50 km), le couplage est superficiel sur l'interface. Nous construi-

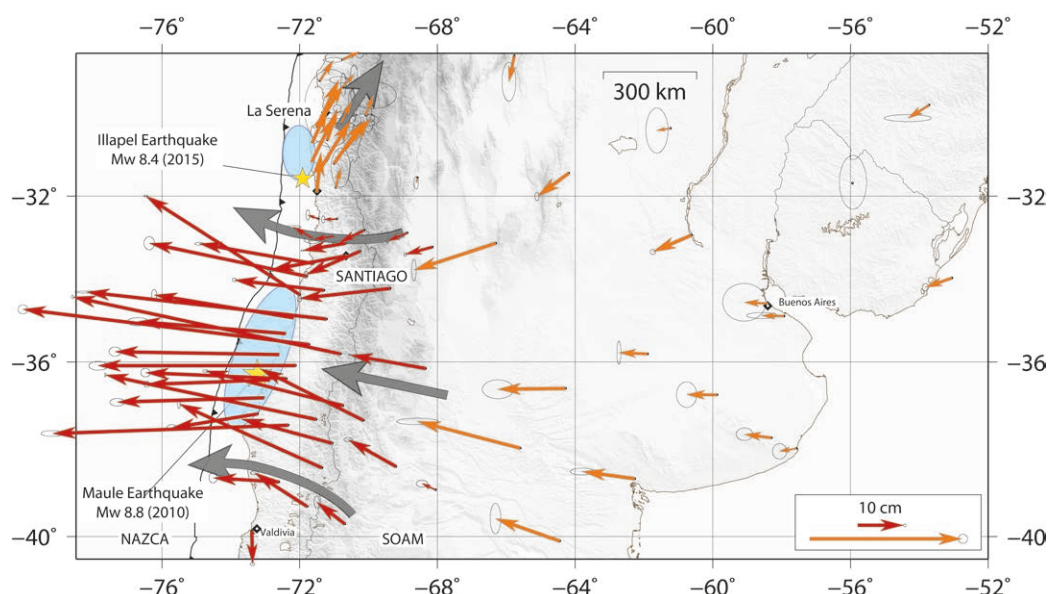


Figure 6. Déplacements horizontaux cumulés (cm) entre le lendemain du séisme du Maule et fin 2014, corrigé de l'inter-sismique. Attention au changement d'échelle (couleurs différentes). Les flèches épaisses grises représentent les différentes tendances. Les étoiles jaunes localisent les épicentres des séismes de Maule (~36°S) et d'Illapel (~31.5°S), les ellipses bleues leurs zones de rupture (modifié d'après (Klein et al., 2016)).

sons donc des réseaux de marqueurs denses et serrés, afin de capturer ces variations à très faible longueur d'onde. Finalement, on image une alternance entre segments fortement couplés et inter-segments faiblement couplés [Métois et al 2012].

Les travaux menés jusqu'ici ont permis de montrer que cette segmentation présente une bonne corrélation avec la segmentation sismo-tectonique de la subduction chilienne, c'est-à-dire les précédentes grandes ruptures et la sismicité de fond. Ainsi, les segments dits fortement couplés coïncident avec les zones où se sont déjà produits des séismes de magnitude supérieure à 8 au cours des 150 dernières années et présentant une sismicité de fond très faible.

A l'inverse, les inter-segments sont caractérisés par une sismicité de fond plus importante et l'absence de rupture majeure. Situés généralement aux terminaisons des précédentes grandes ruptures, ils semblent même se comporter comme des barrières. Dans la région de Maule (celle du séisme historique de Darwin, de 1835), le couplage est très élevé, proche de 100 % et la sismicité de fond est extrêmement faible. Dans la région de Coquimbo, où les derniers séismes de subduction majeur remontent à 1943 et encore avant à 1880 [Nishenko 1985], un couplage supérieur à 60 % est estimé à partir des mesures GPS faites entre 2004 et 2010 (Figure 5 - [Métois et al 2012]).

Le séisme de Maule et ses déformations post-sismiques

Le 27 février 2010, se produit le séisme de Maule, dans une zone qui avait été identifiée comme une lacune sismique [Ruegg et al 2009]. Avec une Mw de 8.8 et une zone de rupture de plus de 400 km de long, il se place dans les 10 plus gros séismes connus et surtout, il est le 3^e plus gros séisme du 21^e siècle, après les séismes de Banda-Aceh (Mw9.2, Indonésie, 2004) et de Tohoku-Oki (Mw9.1, Japon, 2011). Dans cette région, les premières stations permanentes GPS sont installées depuis 2004 et un large réseau de campagne (installé à partir de 1996) a déjà été mesuré 3 fois. Il a donc été possible de capturer une partie de la phase inter-sismique précédant le séisme et d'enregistrer très précisément la phase co-sismique du 27 février 2010, c'est-à-dire le déplacement du séisme lui-même. Un déplacement maximum de presque 5 mètres est ainsi enregistré à la côte. Dès le lendemain du séisme, un large effort de densification du réseau de stations permanentes est engagé par l'ensemble de la communauté géophysicienne internationale, permettant d'enregistrer les déformations post-sismiques.

Ces déformations qui se déclenchent tout de suite après le séisme, ont 3 sources différentes, caractérisées par différentes échelles temporelles et spatiales. Pour en comprendre les effets

à différentes échelles, nous diviserons la zone d'étude en trois zones géographiques, fonctions de leur distance à la fosse. On parlera de champ proche pour parler des 300 premiers kilomètres de la fosse face à la zone de rupture, de champ moyen entre 300 et 500 km et de champ lointain au-delà et au Nord et Sud de la rupture.

Le premier mécanisme post-sismique est le rebond poro-élastique [Jonsson et al. 2003]), dû à la circulation des fluides à l'intérieur des couches superficielles qui conduirait à un rééquilibrage de la pression hydrostatique. Ce mécanisme est caractérisé par des déformations très localisées, de l'ordre de 30 km et durant quelques mois. Le second mécanisme est appelé afterslip. Il s'agit d'un glissement asismique, lent, qui se produit sur le plan de faille, au niveau de la zone de rupture co-sismique. Ce glissement peut durer plusieurs jours à plusieurs années et affecte les champs proches et moyens [Marone et al 1991]. Enfin, le 3^e mécanisme est la relaxation viscoélastique dans les couches profondes de la Terre. Les contraintes co-sismiques générées par un séisme se propagent et se relaxent dans ces couches qui se comportent de manière visqueuse [Savage 1983]. Ce mécanisme engendre des déformations sur de très grandes distances et sur plusieurs décennies.

Cinq ans de données GPS enregistrées suite au séisme de Maule au Chili, mais aussi en Argentine et au Brésil,

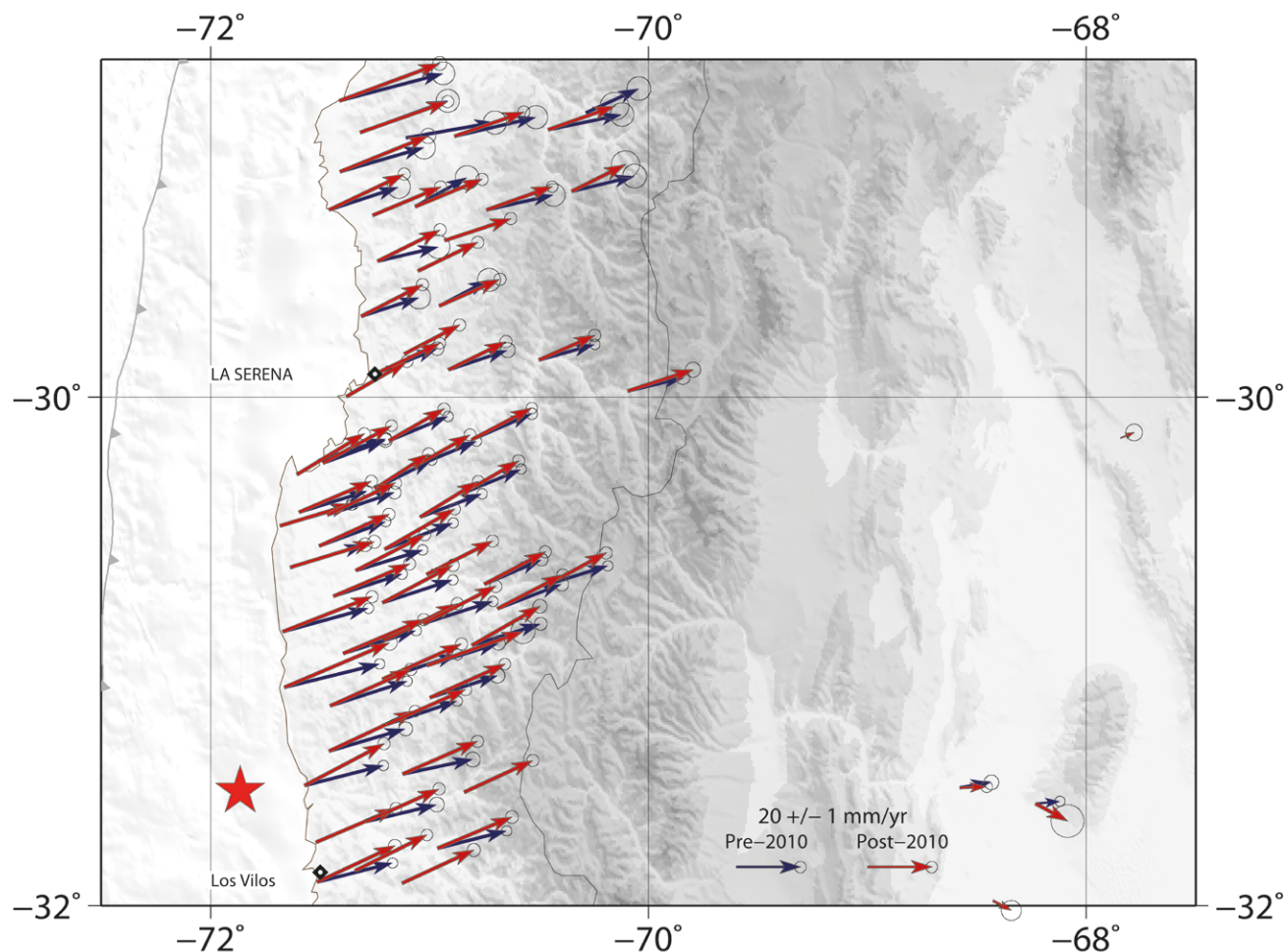


Figure 7. Champ de vitesse inter-sismique (mm/an) déterminé à partir des mesures de campagnes entre 2004 et 2010 en bleu, entre 2010 et 2015 en rouge. L'étoile rouge localise l'épicentre du séisme d'Illapel (16 septembre 2015).

nous a permis d'observer les déformations post-sismiques jusqu'à plus de 1 600 km du séisme lui-même. Pour cela, toutes les données sont corrigées de leur vitesse inter-sismique, estimée directement sur les séries temporelles. En horizontal, dans la zone située directement face à la zone de rupture du séisme, on observe des déplacements orientés plein Ouest, donc vers la fosse de subduction. L'amplitude de ces déformations décroît en fonction de la distance à la fosse mais reste mesurable jusqu'à Buenos Aires, sur la côte Est Argentine (plus de 1 600 km de la fosse). Après 5 ans, on mesure un déplacement cumulé de plus de 50 cm au Chili, et de l'ordre du cm à l'Est argentin (Figure 6). Aux limites Nord (~33°S) et Sud (~39°S) de la zone de rupture, on observe une rotation très nette des déformations, impliquant un mouvement de divergence par rapport à la zone de rupture. A partir de 32°S, dans la région de Coquimbo et plus au

Nord, les stations se déplacent vers le Nord-Est avec des vitesses de l'ordre de 5 mm/an.

On réalise des modélisations aux éléments finis (en adoptant une géométrie 3D sphérique) pour interpréter ces observations par une combinaison des mécanismes de relaxation viscoélastique dans l'asthénosphère et d'after-slip [Klein et al, 2016]. Ces modèles nous permettent de conclure que l'amplitude des déformations horizontales ainsi que le champ de déformation vertical (que nous ne détaillerons pas plus dans cet article) en champ proche est majoritairement due à l'after-slip. En revanche, le champ de déformation en champ moyen et lointain, c'est-à-dire en Argentine mais aussi au Nord et au Sud de la zone du séisme de Maule peut être reproduit par de la relaxation viscoélastique dans l'asthénosphère, pour laquelle on définit une viscosité d'environ 5.10^{18} Pa.s

Le séisme d'Illapel a-t-il été déclenché par celui de Maule ?

Revenons maintenant à la région de Coquimbo, située pour rappel à plus de 500 km au Nord de la zone de rupture du Maule, où l'on compare les vitesses estimées entre 2004 et 2010 à celles estimées entre 2010 et 2015. Comme on l'a vu, les déformations post-2010 enregistrées dans cette région (Figure 6) présentent une orientation quasiment identique à celles des vitesses inter-sismiques pré-Maule (Figure 7 – vecteurs bleus), c'est-à-dire Nord-Est. Les déformations post-sismiques s'ajoutent donc aux déformations inter-sismiques, impliquant une augmentation des vitesses dans la région (Figure 7 – vecteurs rouges). Cette augmentation de quelque 15 % induit finalement une augmentation des contraintes dans ce qui correspond à la zone de rupture du séisme d'Illapel du 16 septembre 2015,



soit plus de 5 et demi après le séisme de Maule.

Ce type de séquence n'est pas inédit. En Indonésie par exemple, le séisme de Benkulu (Mw 8.4) se produit au Sud de la zone de rupture du séisme géant de Banda-Aceh (Mw9.2, 2004) 3 ans après celui-ci, en 2007. Cependant, comme expliqué en introduction, l'Indonésie s'avère particulièrement difficile à étudier par géodésie spatiale, étant un archipel d'îles. Cette fois encore, le Chili représente une occasion sans précédent de mieux comprendre l'enchaînement des séismes de Maule et d'Illapel, grâce à la quantité de données disponible. En effet, moins d'un mois après le séisme d'Illapel, une intervention post-sismique a été menée dans la région, au cours de laquelle la cinquantaine de sites du réseau d'Ovalle – La Serena ont été remesurés. Connaissant la vitesse pré-sismique, nous pouvons interpoler la position théorique des sites au moment du séisme et donc déterminer, par différence avec la position réelle issue de la dernière mesure, une valeur de saut co-sismique. Ces données, en cours de traitement au laboratoire de Géologie de l'ENS, permettront de définir précisément la zone de la rupture du séisme ainsi que la distribution de glissement co-sismique sur l'interface de subduction. Nous disposons maintenant d'un échantillonnage précis de toutes les phases du cycle dans les deux régions voisines :

- La phase inter-sismique pré-Maule, 2004-2010
- La phase co-sismique du séisme géant de Maule, 2010
- La phase post-Maule, 2010-2015, pendant laquelle se mélangent les déformations post-sismiques et inter-sismiques dans la région d'Illapel
- La phase co-sismique du séisme d'Illapel 2015

En plus de l'étude autour du séisme lui-même, nos recherches se concentrent maintenant à quantifier précisément la propagation des contraintes dues au post-sismique du Maule. L'enjeu est en effet de déterminer si les déformations post-sismiques du Maule ont pu accélérer l'occurrence voire déclencher le séisme d'Illapel, à plus de 500 km au Nord de la zone du Maule [Ruiz et al, Submitted]. ●

Contact

Emilie KLEIN

Post-Doc à l'Institut Physique du Globe de Strasbourg
klein.emilie1@gmail.com

Références

- [Beck S., 1998] Beck S., Barrientos S., K. E. R. M. (1998). *Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction zone*. Journal of South American Earth Sciences, 11:115-129.
- [Jonsson, 2013] Jonsson, S. (2013). *Volcanology: Sunken volcanoes*. Nature Geoscience, 6(8):591-592.
- [Jonsson et al., 2003] Jonsson, S., Segall, P., Pedersen, R., and Bjornsson, G. (2003). *Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients*. Nature, 424.
- [Kelleher, 1972] Kelleher, J. (1972). *Earthquakes and some predictions*. Journal of Geo-physical Research, 77.
- [King and Bock, 2000] King, R. and Bock, Y. (2000). *Documentation for the GAMIT Analysis Software, release 10.0*.
- [Klein et al., 2016] Klein, E., Fleitout, L., Garaud, J.D., and Vigny, C. *Afterslip and viscoelastic relaxation model inferred from the large scale postseismic deformation following the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake (Chile)*. Accepted in Geophysical Journal International.
- [Lomnitz, 2004] Lomnitz, C. (2004). *Major earthquakes of Chile: A historical survey, 1535-1960*. Seismological Research Letters, 75:368-378.
- [Marone et al., 1991] Marone, C. J., Scholtz, C. H., and Bilham, R. (1991). *On the mechanics of earthquake afterslip*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96(B5):8441-8452.
- [Métis et al., 2012] Métis, M., Vigny, C., and Socquet, A. (2012). *Interseismic coupling, segmentation and mechanical behavior of the central Chile subduction zone*. Journal of Geophysical Research, 662:120-131.
- [Nishenko, 1985] Nishenko, S. P. (1985). *Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 90(B5):3589-3615.

[Ruegg et al., 2009] Ruegg, J.C., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R., de Chabaliér, J.C., Campos, J., Kausel, E., Barrientos, S., and Dimitrov, D. (2009). *Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between constitucion and conception in Chile*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, pages 78-85.

[Ruiz et al., Subm] Ruiz, S., Klein, E., del Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Métis, M., Vigny, C., Baez, J.C., Vargas, G., Leyton, F., Madariaga, R., and Fleitout, L. *The seismic sequence of the 16 September 2015, Illapel Mw8.3 earthquake*. Submitted to Seismological Research Letters.

[Savage, 1983] Savage, J. C. (1983). *A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88(B6):4984-4996.

[Vigny et al., 2009] Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J. C., Madariaga, R., Campos, J., and Alvarez, M. (2009). *Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 175(1):86-95.

ABSTRACT

On 16th September 2015, the Mw8,3 Illapel earthquake occurred in the region of Coquimbo, central Chile. In this area, the last Mw 8+ megathrust earthquake had occurred in 1943 and we observe an unusual seismicity since 1997. The GPS campaigns conducted in the region for 15 years allowed us to study the deformation in surface associated with stress accumulation before the earthquake. In 2010, 500 km South, occurred the giant Maule earthquake (Mw8,8) in a region also closely monitored by GPS. Moreover, we observed the postseismic deformation controlled by the viscoelastic relaxation of the deep layers of the earth, that was triggered by the Maule earthquake. This deformation is still measurable nowadays across the whole continent, and especially in the region of the 2015 earthquake. In this study, conducted in the Geology Laboratory of ENS (Paris), we relate two decades of deformation monitored by GPS in those two nearby regions, trying to understand the possible interactions between the two earthquakes.

Le canal de Marseille quand Massilia dépasse Rome

L'aqueduc de Roquefavour, ouvrage phare du canal, bien plus important que le fameux Pont du Gard.

■ PAUL COURBON

Au cours de leur histoire, la Provence et Marseille ont été souvent confrontés au manque d'eau. Un adage local disait : Eici, l'aigo es d'or (Ici, l'eau est d'or). Déjà, au XVI^e siècle, avait été proposée la construction d'un canal pour alimenter les principales villes de la région marseillaise à partir de la Durance, avec un captage à Canterperdrix, près du Pont de Mirabeau. Mais à l'époque, la puissance romaine qui avait construit le Pont du Gard et son canal avait disparu. Aussi ce projet relevait plutôt de l'utopie. Cela ne l'empêcha pas de ressortir à plusieurs reprises, aux XVII^e et XVIII^e siècles, mais toujours sans aboutir. Il faut cependant signaler l'étude Floquet, faite en 1733 et qui amena en 1753 la constitution d'une société émettant 9 600 actions de 160 F pour constituer un capital. Après un démarrage laborieux, le projet fut abandonné. Les grandes idées ont la vie dure et celle du canal réapparut en 1817, puis en 1827 avec le projet étudié et présenté par l'ingénieur Garella. En 1832 un arrêté préfectoral ordonnait une enquête sur un projet de canal d'irrigation à partir de Canterperdrix. Ce projet concernait l'alimentation en eau, non seulement de Marseille, mais aussi d'autres communes, Aix en particulier. Ce projet en suscitait d'autres et, en octobre 1833, paraissait un rapport de la commission pour l'examen des mémoires des divers projets présentés sous le nom Canal de Provence.

■ Le coup de pouce du choléra

En 1834, après une sécheresse sévère, les grosses pluies d'automne firent déborder l'Huveaune et le Jarret, les deux petits fleuves côtiers traversant Marseille. En décembre, se déclara une épidémie de Choléra qui fit 865 morts. En 1835, une autre épidémie plus grave toucha plus de 5 000 personnes, faisant 2 576 morts. Outre les nombreux bateaux arrivant au port de Marseille, on pressentait aussi que la mauvaise qualité de l'eau était liée à ces épidémies. On soupçonnait les deux petits fleuves côtiers qui servaient de tout-à-

l'égout à toute la région d'altérer l'eau alimentant les nombreux puits de la ville.

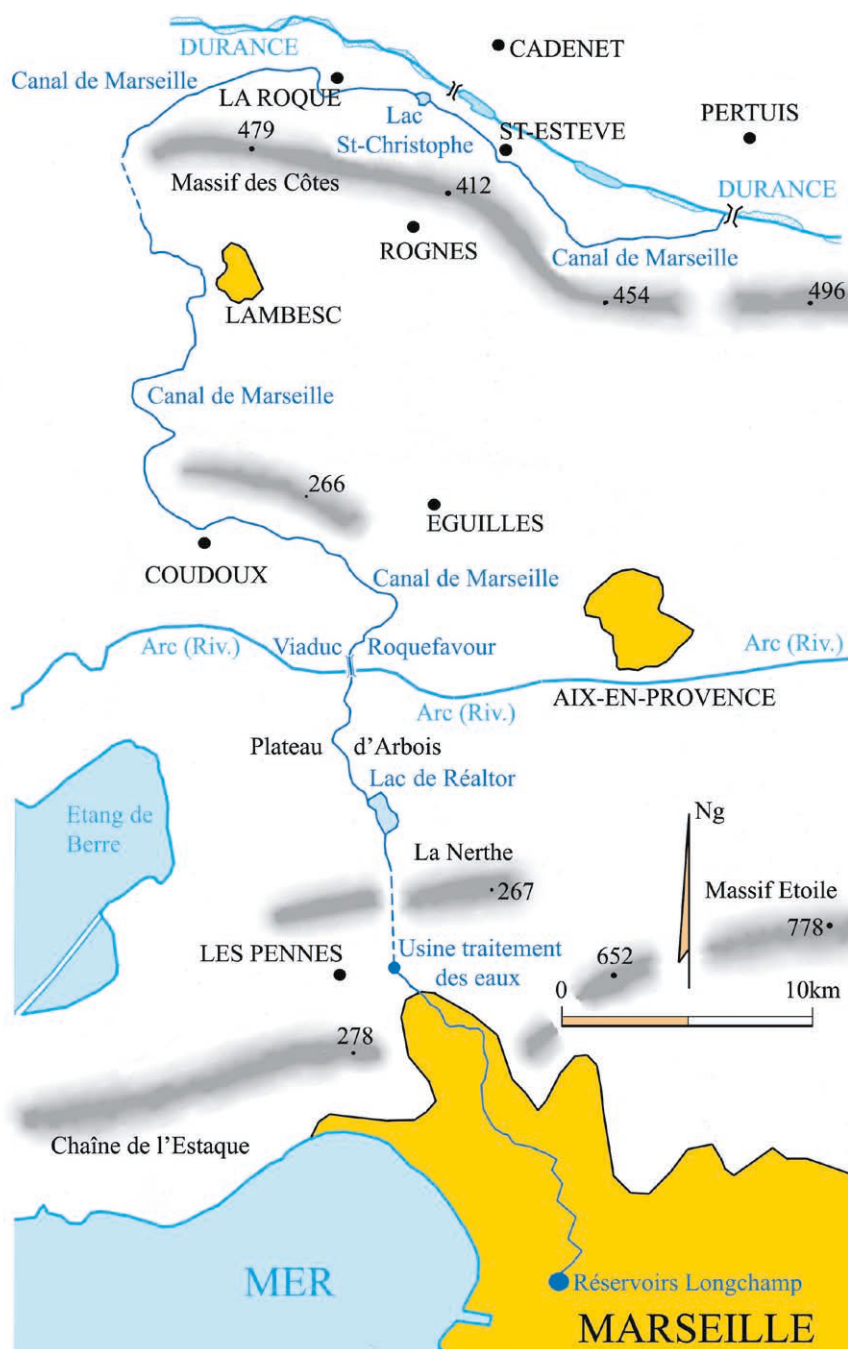
Cela incita à la recherche d'une autre alimentation en eau potable, relançant le projet de captage de l'eau de la Durance. Mais, faute d'obtenir la participation financière des autres communes, il fut pris en main par la seule commune de Marseille. En 1835, Maximin-Dominique Consolat, maire de la ville proposa la réalisation d'un canal de plus de 80 km, amenant l'eau de la Durance depuis Pertuis (Alt. 186 m), jusqu'au plateau de Longchamp

(Alt. 75 m), qui dominait la ville. Parmi les projets ou contre-projets présentés, on retint celui de Franz Mayor de Montricher (1810-1858), jeune ingénieur d'origine suisse, issu de Polytechnique et appartenant au corps des Ponts et Chaussées. Son avant-projet fut adopté par le conseil municipal le 27 avril 1838. Le coût du canal était estimé à 10 000 000 francs, non compris le passage de l'Arc à Ventabren pour lequel la décision d'un siphon ou d'un aqueduc n'avait pas encore été prise. L'aqueduc de Roquefavour sera soumis à adjudication, deux ans plus tard, pour un montant de 3 800 000 de francs.

■ L'itinéraire

Il y a 41 km à vol d'oiseau entre le captage sur la Durance et Longchamp, mais avec les contournements des reliefs, la longueur du canal dépasse 84 km. La description de l'itinéraire du canal dans l'avant-projet de 25 pages, en date du 11 novembre 1836 et présenté par de Montricher, correspond dans ses grandes lignes à l'itinéraire que l'on trouve aujourd'hui.

Nous n'avons pu retrouver le plan qui était joint à cet avant-projet, comme le stipule le courrier qui l'accompagne. Le captage de la Durance devait se faire près du nouveau pont de Cadenet (Alt. 165 env.), 25 km en aval de Canterperdrix proposé par les autres projets. Il fallait ensuite contourner le massif des Côtes, dont les hauteurs (Alt. 478 m) bordent la rive sud de la Durance. Un tunnel



Le canal a fait de longs détours, dont les détails n'apparaissent pas sur ce plan généralisé.

de 4 km devait permettre de franchir son extrémité S.O. Puis dans le long parcours pour rejoindre ensuite Marseille, il fallait franchir l'entaille creusée par le fleuve côtier de l'Arc qui va du massif de Sainte-Victoire (1 011 m) à l'étang de Berre. Après le passage de l'Arc, le plateau d'Arbois présentait toute une série de reliefs à franchir par des tunnels et petits aqueducs. Aux abords de Marseille, il fallait encore choisir le bon passage pour franchir le seuil de la Nerthe (267 m) entre la chaîne de l'Estaque (278 m)

et la Chaîne de l'Étoile (778 m). Durant tout ce trajet, on devait maintenir une pente de l'ordre de 0,5/1 000, nécessaire pour que la vitesse d'écoulement de l'eau respecte un débit convenable, en accord avec la section choisie pour le canal.

Les travaux vont commencer en novembre 1839. Bien que l'eau arrive au plateau Longchamp en 1849, ils vont se terminer en 1854 avec la construction de deux immenses réservoirs de décantations sous le jardin Longchamp.

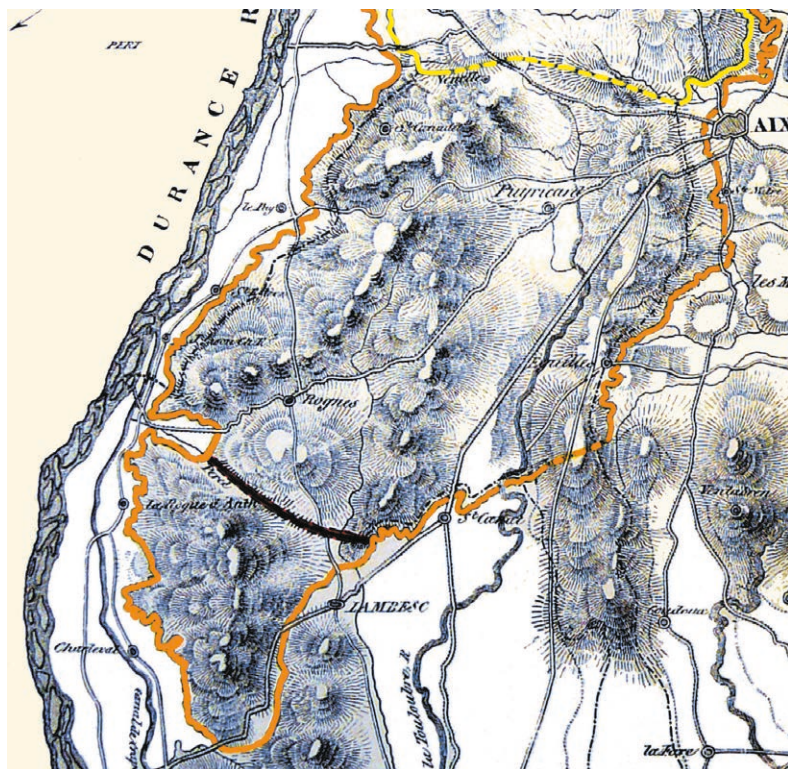
Examen des archives de Marseille

Marseille possède un excellent service des archives municipales, nous y avons retrouvé de nombreux dossiers concernant le canal de Marseille et l'aqueduc de Roquefavour. Mais, il faut rappeler qu'à l'époque, il n'y avait ni machines à écrire, ni les moyens de reproduction actuels, aussi les dossiers étaient beaucoup moins volumineux qu'ils ne le seraient aujourd'hui ! L'avant-projet de Montricher n'a que 25 pages écrites à la plume.

Cependant, si les archives comptent de nombreux documents administratifs concernant la description des avant-projets, les délibérations, les arrêtés, les demandes d'enquête, les estimations de prix, le financement, on n'y trouve rien sur les opérations topographiques et pas de plans précis. Les deux seuls plans trouvés sont de format réduit : le premier concerne le projet Garella de 1827 et le second, daté de 1833, regroupe l'ensemble des projets Floquet, Garella et Bazin. Ces deux plans comportent une représentation figurative du relief par des hachures et ils ne donnent aucune altitude. Nous ne savons comment ont pu être déterminés les itinéraires à suivre.

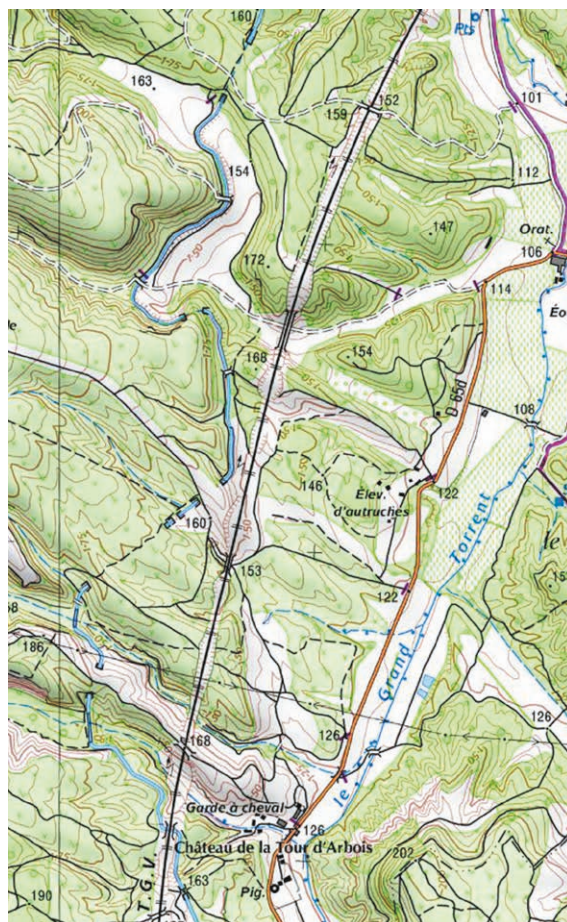
Nous avons aussi retrouvé le contre-projet du Vicomte de Barrès et Cie du 26 avril 1836, proposant pour 20 millions de francs un captage de l'eau du Verdon à hauteur de Gréoux : *"Le projet de conduire six mètres cubes par seconde des eaux du Verdon sur le territoire de Marseille est le résultat d'une idée simple (Sic) qui ne représente aucune difficulté réelle d'exécution (Sic). Le succès de ce projet dépend uniquement de la pente reconnue et à faire vérifier de nouveau, pour plus grande précaution, ainsi que nous le proposons..."*

Ce projet laisse un flou au sujet de la pente du canal et de l'itinéraire qui en résulte, y avait-il eu des mesures rigoureuses ? Il faut rappeler que le canal du Verdon réalisé de 1964 à 1970, à partir de Gréoux, a un parcours dont plus de la moitié est souterrain ! On devine dans ce contre-projet l'intervention d'un opportuniste recherchant la bonne affaire !



Ce plan de 1833 regroupe trois avant-projets. Seulement un figuré du relief, mais aucune altitude. On juge des problèmes pouvant en résulter lors de la réalisation.

Le report du canal sur la carte moderne montre la complexité du trajet pour suivre la courbe de niveau : petits tunnels et aqueducs. Avaient-ils tous été prévus ?



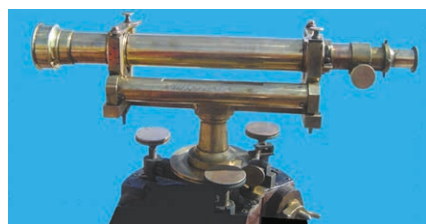
Cette absence de déterminations précises incite de Montricher à écrire que les difficultés trouvées sur le terrain *"présentent des chances d'augmentation dans les dépenses et de retard dans l'exécution"*. Nous verrons plus loin l'augmentation faramineuse des dépenses prévues initialement.

■ Considérations topographiques

Retrouver les documents topographiques aurait été très importante sur le plan historique et pour connaître les méthodes de travail utilisées. Rappelons que le nivellement Bourdalouë (1798-1868), prenant pour zéro le trait 0.40 de l'échelle de marée du Fort Saint-Jean à Marseille, ne commença qu'en 1857 pour se terminer en 1864, soit bien après la réalisation du canal. Quant à la carte d'Etat-Major, nous n'avons pu savoir si en 1835, elle existait sur tout le trajet de Marseille à Pertuis. Rappelons qu'elle était rattachée en altitude, par triangulation, à plusieurs échelles des marées du territoire français.

La mise au point de l'avant-projet de de Montricher ne lui demanda que six

mois. Bien sûr, il devait s'appuyer sur des observations faites précédemment, mais il nous aurait intéressé de savoir comment il avait déterminé le passage du canal sur un terrain accidenté et comportant des points hauts nécessitant de longs passages en souterrain. Quels types de mesures furent utilisés pour établir cet avant-projet ? Avec les moyens techniques de l'époque, il serait logique qu'une triangulation ait été réalisée sur tout le tracé du canal. Mais, nous n'en avons pas trouvé de traces. En ce qui concerne le nivellement, rappelons que le niveau d'Egault fut inventé en 1806 et que la mise parlante ne fut mise au point par Bourdalouë qu'en 1830. Ils ont donc pu être employés lors des travaux du canal.



Le niveau d'Egault, avec sa lunette réversible, fut amélioré par Bourdalouë.

La découverte de documents techniques aurait pu satisfaire notre curiosité. Par exemple, comment s'éclairaient les topographes lors des mesures dans les tunnels ? Sans électricité pouvant alimenter des ventilateurs, comment se faisait l'aérage des tunnels après les explosions pour creuser la roche ? Quand cela le permettait, avait-on creusé des puits intermédiaires qui à partir de la surface permettaient une meilleure ventilation ?

Un travail de romains

Le canal passant par le Pont du Gard pour alimenter Nîmes, faisait 50 km. Ici, nous avons plus de 84 km serpentant dans une vaste zone de reliefs. Malgré les longs détours pour contourner ces reliefs et suivre les courbes de niveau, il fallut prévoir 18 ponts (dont l'aqueduc de Roquefavour) et 17 km de galeries souterraines, dont les deux plus longues ont près de 4 km. Nous verrons plus loin les dimensions exceptionnelles de l'aqueduc de Roquefavour.



L'un des nombreux petits tunnels creusés pour franchir les crêtes rocheuses.



Le large lit de cailloux de la Durance est trompeur. Lors des crues, il est submergé par un flot tumultueux. La largeur de la rivière peut être multipliée par 6 ou 8.

■ ...Et son financement

Comme toujours, ce fut le nerf de la guerre et il explique la réalisation du projet par Marseille seule. Les prévisions initiales tablaient sur 10 000 000 francs, hors l'aqueduc de Roquefavour dont la construction coûta à elle seule 3 800 000 francs. Or, au fur et à mesure de l'avancement des travaux, des difficultés rencontrées et des ouvrages supplémentaires réalisés, la note augmentait et, en décembre 1850, elles atteignaient 33 400 000 F ! On peut en déduire que l'absence de plans précis et de mesures fines avant les travaux avait empêché une estimation correcte des dépenses, peut-être optimisées pour faire aboutir le projet (comme c'est souvent le cas aujourd'hui encore !).

Dès février 1837 était décidée la création d'obligations à 4 % pour une valeur de 10 millions de francs. Des taxes furent perçues sur la farine aux octrois de Marseille pour le paiement des intérêts ! Mais, on dut vite recourir à des emprunts, le premier, de 9 500 000 F fut lancé le 7 août 1839. En 1843, le montant total des divers emprunts atteignait 18 millions !

En 1835, Marseille ne comptait que 145 000 habitants, en 1850, on frôlait les 200 000 habitants. On juge de l'investissement qui en découlait par habitant et, surtout, par foyer fiscal ! D'autant plus que les impôts et charges étaient certainement moins élevés qu'aujourd'hui.



Hors les travaux de l'aqueduc de Roquefavour, environ 3 000 ouvriers furent employés à la construction du canal.

Le captage sur la Durance

Aujourd'hui, avec les grands travaux de l'EDF, en particulier le barrage de Serre-Ponçon et sa retenue de 1 272 Mm³, la Durance a été en partie assagée. A l'époque, un vieux proverbe provençal disait : Les trois fléaux de la Provence sont le mistral (lou mistrau), le parlement (lou parlamen) et la Durance (la Duranço). Les mesures faites au pont de Pertuis au cours des différents projets donnaient un débit d'étiage de 60 m³/s avec des crues dépassant 2 000 m³/s (plus que le débit moyen du Rhône en Arles). De ce fait, le captage pour les besoins du canal posa de nombreux problèmes.

Les mesures modernes, sans doute plus précises, ont donné 1 700 m³/s à la crue de 1957, la dernière avant la mise en service du barrage de Serre-Ponçon. Du pont de Cadenet au pont de Pertuis, la Durance peut s'étaler entre 300 et 400 m de large lors des crues, à l'intérieur des digues qui l'enserrent, soit plus que la largeur du Rhône en Arles.

Aussi, avant la construction de ce captage, un "Durancomètre" fut installé près du pont de Pertuis où pendant 4 ans, la hauteur de l'eau fut relevée et notée quatre fois par jour. Dans le projet initial, le captage était prévu au Défens d'Alleins, 1 100 m en aval du pont de Cadenet, en fait il fut réalisé 10 km en amont, au pont de Pertuis. Les premiers travaux commencèrent en août 1843, mais le 1^{er} novembre de cette même

année, une crue dévastatrice emporta six ponts de la région, causant d'importants dégâts dans la vallée. En 1844 et 1845, la reprise des travaux s'appliqua en premier lieu à créer d'importantes digues pour protéger la zone de la prise d'eau. Pourtant en 1845 et 1846, les travaux furent encore contrariés par des crues, celle d'octobre 1846 occasionnant de nouveaux dégâts. La prise pouvait être mise en service fin 1846. Sept ouvertures réglables, de 2 m de haut par 1 de large, permettaient d'alimenter le canal (Alt. 186 m).

L'exceptionnel aqueduc de Roquefavour

Le principal obstacle sur le parcours du canal était le franchissement de la vallée de l'Arc, fleuve côtier qui entaille, sur 85 à 100 m de profondeur, le plateau calcaire que doit traverser le canal. Après étude, malgré le coût qui en résultait, un pont-aqueduc en maçonnerie, s'inspirant du Pont du Gard, fut préféré à un pont siphon en fonte. L'abandon du siphon en fonte, qui aurait coûté deux fois moins cher, suscita de nombreux débats. Les techniques de l'époque pour la construction de tuyaux et leur raccordement n'offraient-elles pas les garanties nécessaires ? Y eut-il l'affrontement de deux écoles parmi les concepteurs ? Nous n'en avons pas trouvé trace. L'adjudication des travaux fut faite en 1840 et ceux-ci commencèrent en 1841. Au vu des difficultés rencontrées, les entreprises demandèrent la résiliation du marché début 1842. Le 16 avril 1842, le Ministère de l'Intérieur accepte de prendre la construction de l'ouvrage en régie





La photo de gauche montre que Roquefavour est presque un copié-collé du Pont du Gard. Les pierres sont de dimensions comparables, seule leur technique de taille, en bossage à Roquefavour, les différencie.

Avec cet exceptionnel aqueduc en pierres taillées de 393 m de long et 82,5 m de haut, les Romains sont battus !

directe. Franz Mayor de Montricher (1810-1858), ingénieur des Ponts et Chaussées auteur du projet, prend la direction des travaux.

Fin 1843, les piles atteignaient 13 m de hauteur. Le deuxième étage était commencé en janvier 1846 et le pont aqueduc était terminé en mai 1847. L'eau de la Durance franchissait l'aqueduc le 30 juin 1847. Environ 5 000 ouvriers, dont 300 tailleurs de pierre avaient été mobilisés pour mener à bien cette œuvre gigantesque. Les Romains étaient surpassés, bien plus grand que le Pont du Gard (82,5 m de haut contre 48,8), l'aqueduc de Roquefavour devint et est toujours le plus grand ouvrage en pierres taillées du monde.

Pourquoi un aqueduc de cette importance en pierres taillées ? Gustave Eiffel (1832-1923) ne s'était pas encore lancé dans ses structures métalliques de grande ampleur, tel le Viaduc de Garabit dont la construction fut lancée en 1880 ; ce viaduc étant ouvert au trafic en 1887. Quant à Joseph-Louis Lambot (1810-1887), il n'avait pas encore inventé le ciment armé, qui en 1880 fut amélioré en béton armé par François Hennebique (1842-1901). Mais il fallut attendre la fin du XIX^e siècle pour voir apparaître les premières arches de grande portée (40 m) et le XX^e siècle pour avoir des portées beaucoup plus

longues. Le pont sur l'Artuby, près des Gorges du Verdon, avec une arche unique de 107 m, fut construit de 1938 à 1940. Il faut cependant noter que les ponts de pierres furent construits encore durant longtemps pour des ouvrages de moyenne dimension. Ce fut le cas de la ligne de chemin de fer de la Côte

bleue, de Marseille à Miramas, dont la construction débuta en 1904.

La grande explosion technologique arriva à la fin du XIX^e siècle. Moins de 50 ans plus tôt, avant 1850, mis à part l'emploi de la poudre pour le creusement de la roche, les techniques de génie civil n'avaient guère évolué



En 40 ans, la technique fait un bond de deux millénaires, avec Eiffel et son viaduc de Garabit.



Il fallut attendre le XX^e siècle pour voir le béton armé sur de grandes portées, ici le pont sur l'Artuby (Var). En 1904, les viaducs de la nouvelle voie ferrée de Marseille à Martigues sont toujours en pierres taillées.



depuis les Romains, ce qui donne encore plus de mérite à la construction de cet aqueduc exceptionnel. Pour s'en persuader, il suffit de faire une comparaison entre le Pont du Gard et l'aqueduc de Roquefavour : par son aspect, Roquefavour est une copie-collée du Pont du Gard. Seule la taille des pierres varie un peu : pierres à bossage sur les piliers de Roquefavour, mais les pierres des piliers ont des dimensions du même ordre sur les deux aqueducs.

L'aqueduc de Roquefavour, épousant le profil en travers de la vallée, est composé, comme le Pont du Gard, de trois rangs d'arcades. Le premier rang comporte 12 arches de 15 m d'ouverture, dont la plus haute domine l'Arc de 34 m de hauteur. Le second rang, plus étendu, est composé de 15 arches d'une hauteur totale de 37,60 m, dont les piliers prolongent ceux du premier rang. Enfin, le dernier rang est composé de 53 petites arches de 5 m d'ouverture pour une hauteur totale de 10,95 m. La hauteur totale de l'aqueduc est ainsi de 82,5 m au dessus de l'Arc, et cet ouvrage s'étire sur 393 m de long. Les fondations pour supporter un tel ouvrage, ont entre 9 et 10 m de profondeur. Il faut aussi signaler, que compte tenu du poids que les piliers devaient supporter et des pressions qui pouvaient en résulter à leur base, de Montricher avait fait effectuer des essais de résistance de la pierre à la compression. Pour être complet sur cette partie technique, sachez enfin que le débit de l'eau empruntant l'ouvrage est de 4,4 m³/seconde.

Autres ouvrages

Mais, peu de temps après la mise en service, il apparut que les bassins de Longchamp n'arrivaient pas à résoudre le problème de décantation des eaux de la Durance. Le Bassin de Réaltor (Alt. 157 m), à cheval sur les communes de Cabriès et d'Aix, fut construit de 1860 à 1869 dans le but de décanter les eaux de la Durance et d'en programmer le débit ; il a une capacité de 4 Mm³. Mais, ne donnant pas entière satisfaction, il fut complété de 1877 à 1882 par le bassin de Saint-Christophe (Alt. 180 m et 2 Mm³) près de la Roque d'Anthéron.



Le bassin de Réaltor long de 1,5 km et le lac de Saint-Christophe.



Avec une capacité de 400 000 m³/j, l'usine de traitement des eaux de Ste-Marthe est la plus importante de Marseille.

Aujourd'hui

Après les travaux entrepris par l'EDF pour l'équipement de la Durance, le canal a perdu 10 km en amont. Il démarre depuis 1963 à la chute de St-Estève de Janson.

Arrivé en banlieue marseillaise, le canal alimente l'usine de traitement des eaux de Giraudet aux Pennes-Mirabeau, laquelle dessert les quartiers ouest. Continuant plus loin, il alimente la seconde usine de traitement des eaux de St-Marthe, puis, en bout de course cette de St-Barnabé. Les réservoirs de Longchamp ont été abandonnés, mais l'eau coule toujours dans les cascades du palais du même nom.

Quant à l'aqueduc, reconnu comme le plus grand ouvrage en pierres du monde, il est inscrit à l'inventaire des Monuments Historiques depuis 2002 et classé Monument Historique en 2005.

En 2015, le monument est en service depuis 168 ans ! Aussi, durant tout le mois de mars de cette année a été mené un diagnostic complet de l'aqueduc. Les piliers ont été inspectés visuellement par des équipes de cordistes afin de relever les types de désordres constatés sur les pierres. Le programme prévoyait aussi des carottages de contrôle en pied de piliers. Les pierres de l'aqueduc de Roquefavour sont de la taille de celles du Pont du Gard et leur assemblage est aussi soigné, aussi, l'exemple de l'illustre prédécesseur incite à l'optimisme !

Conclusion

Deux millénaires après la construction du fameux Pont du Gard et du canal qui le traverse, la réalisation du canal de Marseille et de l'aqueduc de Roquefavour fut elle aussi un "travail de Romains" ! S'ils avaient été entrepris, seulement 40 ans plus tard, peut-être Gustave Eiffel aurait-il été contacté pour faire enjamber la vallée de l'Arc par une construction métallique arachnéenne. Ou encore, les progrès accomplis sur les conduites en fonte et leur raccordement nous auraient valu un siphon. C'eût été dommage !

Quant à Franz Mayor de Montricher (1810-1858), la réalisation du canal de Marseille lui apporta une grande renommée. Il mourut prématurément de la typhoïde, lors de la visite du chantier d'assèchement du lac Fucin, en Italie. Le canal de Marseille a été complété en 1970 par le canal de Provence qui capte les eaux du Verdon à Gréoux-les-Bains, faisant bénéficier une grande partie de la Provence d'un réseau d'irrigation. Tout proche, le Canal du Bas-Rhône Languedoc arrose le Gard et une partie de l'Hérault. De ce fait, paradoxalement, les années de grande sécheresse, les départements du "Nord" souffrent bien plus du manque d'eau que nos départements du Midi ! ●

Contact

paul.courbon@yahoo.fr

Isabelle de Gouyon Matignon et Charles Bézie dans la lumière

■ Jean-Pierre MAILLARD

On ne se lasse pas d'arpenter le quartier du Marais à Paris. Le charme des XVI^e et XVII^e siècles est resté vivant grâce aux multiples hôtels particuliers, à l'église Saint-Paul ou encore à la splendissante place des Vosges. La réalisation du centre Pompidou et la création du musée Picasso dans l'hôtel de Salé ont renforcé une dimension plus culturelle du quartier et suscité l'ouverture de nombreuses galeries¹. La visite du Marais conduit cette fois dans la rue du Parc royal, précisément à la galerie Lahumière qui présente des œuvres d'art contemporain géométrique, dans un écrin architectural des plus classiques.

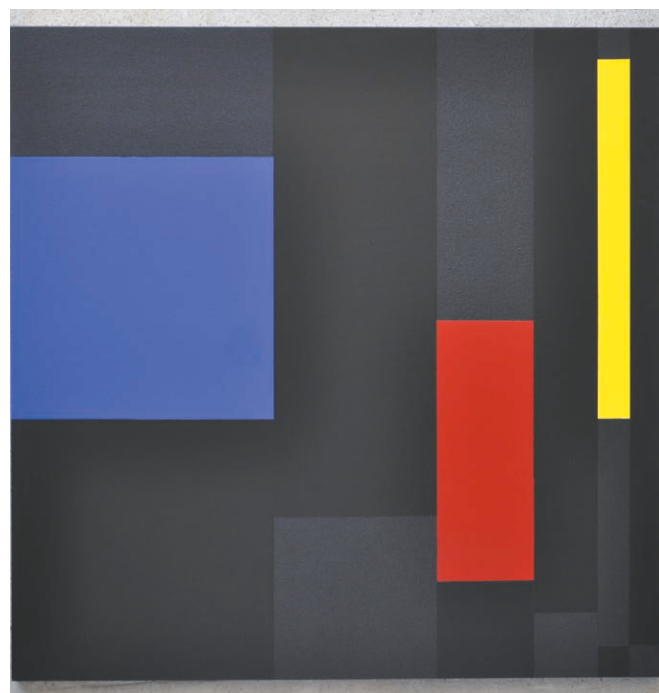
La galerie Lahumière

Dans le monde de la peinture, les marchands d'"Art et géométrie" qui les défendent sont peu nombreux. Sans doute inhérente à leur première rencontre au musée Rodin, la galerie éponyme naît à l'initiative d'Anne et Jean-Claude Lahumière, jeunes passionnés d'art. Créée en 1963, la galerie est successivement localisée rue d'Aguesseau, puis boulevard de Courcelles et enfin, en 1993, rue du Parc royal. Le couple s'intéresse d'abord, époque oblige, aux travaux de deux peintres de la "Jeune peinture", Gérard Tisserand et Michel Paré, appartenant à la mouvance des Malassis, un groupe d'artistes militant de la transformation sociale. Il n'en fallait pas plus pour que leur galerie fut un temps cataloguée « la plus rouge de Paris » ! La galerie a élargi son offre grâce à l'œil averti de Jean-Claude et en proposant des estampes à la signature renommée. Son intérêt pour la géométrie c'est progressivement imposé notamment avec la présentation de travaux de Bauduin, Jean Dewasne, Auguste Herbin, Gottfried Honegger, Aurelie Nemours et Victor Vasarely pour ne citer que les noms des artistes qui ont fait l'objet d'une rubrique "Art et géométrie". C'est Jean Dewasne qui a eu la primeur d'engager cette mutation géométrique de la galerie. Anne Lahumière a également été active dans le cadre de la profession de marchand d'art. Elle s'est mise au service de ses pairs en enseignant la gestion, en participant puis présidant, pendant onze ans, le comité des galeries d'art, ensuite, pendant trois ans, celle de la fédération européenne des galeries d'art et, enfin, assurer pendant quatre ans la présidence du comité des ventes volontaires. Ainsi, depuis plus de cinquante ans Anne et Jean-Claude Lahumière (ce dernier

décédé en 2014) ont été au premier rang des défenseurs de leur profession et de l'art concret sous toutes ses formes. Avec leur fille, Diane, Anne Lahumière poursuit l'activité et s'exprime avec engagement et convictions. Recherchant l'harmonie entre les formes et les surfaces elles privilégient désormais la présentation d'un peintre et d'un sculpteur. En début d'année 2016 la galerie a monté l'exposition "Calculs" de Charles Bézie et "Visions" d'Isabelle de Gouyon Matignon opposant d'un côté une réflexion mesurée, de l'autre une méthode empirique où l'acte transcende la pensée.

Ortholude n° 1617

Des figures géométriques orthogonales, trois couleurs primaires et des déclinaisons de noir constituent Ortholude n° 1617 comme toute la série éponyme, les "Ortholudes" prolongeant un thème déjà développé dans les années 1990 alors sur fond blanc les "Trois primaires". Alternativement peint au pinceau et au rouleau le même noir est donc lisse ou brossé. Le grain de la partie brossée accrochant mieux la lumière, le noir est perçu plutôt gris, une cinquième couleur qui multiplie la combinaison des aplats. Comme Soulages Charles Bézie démontre bien que le noir est couleur. La



Charles Bézie Ortholude n° 1617 - 2015 - 120 x 120 cm acrylique sur toile marouflée sur bois.

1 cf. XYZ n° 105

peinture s'aborde comme un problème de géométrie et l'on s'interroge sur la réflexion calculée de l'artiste. Quelle est la relation entre les carrés et/ou les rectangles ? Quelle est la progression de la largeur des bandes dans lesquelles les formes s'inscrivent et pourquoi cette largeur est-elle dégressive ?

Charles Bézie

L'artiste est né en 1934 à Varades (Loire-Atlantique). Après des études techniques de dessin d'application, il approfondit son goût pour l'esthétique en suivant les cours du soir de l'école de peinture de Saint-Nazaire, puis celui de l'atelier libre de l'académie Jullian à Paris et enfin les cours des Beaux-arts de Reims. Il s'installe à Paris en 1960 où il réside toujours. En 1974, après la production de ce qu'il qualifie d'œuvres de jeunesse, il reprend le tire-ligne de son savoir-faire de base et travaille sur la rigueur du trait estimant que les pionniers de l'abstraction géométrique, Malevitch et Mondrian, et leurs suivants Herbin et Vasarely, notamment, n'avaient pas tout exprimé. Ensuite le trait s'élargit, devient bande et finalement surface jusqu'à déborder du cadre.

Son approche est essentiellement mathématique, centrée sur le nombre d'or et la suite de Fibonacci. Une des séries est justement dénommée "Fibonacci" elle même suivie de "Fiborythms". Elles s'ajoutent à "Orthogonales", "Gradations", "Cadences"... et enfin à "Ortholudes" dont plusieurs pièces ont été présentées à la galerie Lahumière avec le n° 1617. Attaché à cette galerie qui l'expose cycliquement, il est présent dans de nombreux salons et manifestations internationales et ses œuvres ont l'honneur des musées de Cholet, Mâcon, Montbéliard et Nantes et à l'étranger (Allemagne, Suisse, Japon, aux États-Unis...).

Sans titre n° 20136

La sculpture 20136 accroche le regard dès la porte d'entrée. Suivant une ligne brisée, la section parallélépipédique hésite à s'élever au gré des pliures dans un souci d'équilibre. La perception de l'œuvre change à chaque mouvement de rotation autour de la pièce. D'aucuns pourront y deviner un canon puis un navire au gîte préoccupant, d'autres un trombone de bureau martyrisé ou encore un miroir protéiforme. Cet aspect miroir rendu par l'acier inox est dominant. La sculpture brille non seulement de la matière mais aussi de tous les feux de l'éclairage et images renvoyés par la surface même si, paradoxalement et de façon discontinue, le poli miroir semble se fondre dans l'espace. Les peintures de Charles Bézie profitent ainsi d'une restitution inattendue.

Isabelle de Gouyon Matignon

L'artiste vit et travaille à Paris et Hossegor. Elle est née en 1964 à Mont-de-Marsan (Landes) et sa jeunesse se passe dans le Sud-ouest. Après ses études elle se marie avec le désir d'avoir des enfants et de les élever. Trois naissent de



© Galerie Lahumière

Isabelle de Gouyon Matignon Sans titre - n° 20136 - 2013 - 30 x 70 x 30 cm acier inoxydable.

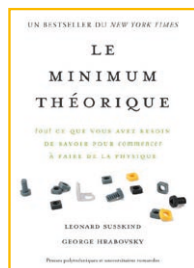
son union. Le plaisir du dessin s'éveille dans le quotidien de la mère de famille. Les enfants grandissant, Isabelle de Gouyon Matignon prolonge son intérêt pour le concret et le besoin de la matière en suivant de 2001 à 2005 les cours de Jaildo Marinho professeur à l'association pour le développement de l'animation culturelle de Paris (ADAC) en charge de l'atelier sculpture et fonderie. Elle se découvre alors une aptitude pour la géométrie et n'hésite pas à se former à la soudure. Ses sculptures lui apparaissent sous forme d'image mentale, elles s'imposent à son esprit d'un seul tenant. Leur présence obsédante oblige l'artiste à donner vie à chacune dans l'espace, d'abord couchée sur le papier, puis maquette de carton et enfin produite dans le métal, en forme pleine ou juste soulignée de ses contours. Elle travaille sur le vide et le plein, l'équilibre et le déséquilibre dans l'espace.

L'aboutissement de ses réalisations et l'harmonie qui s'en dégage la conduisent à s'exposer. Elle rejoint le groupe "Art construit international" (ACI)² qui fait connaître et promeut les artistes "géométriques". Son passage du salon des réalités nouvelles à la galerie Lahumière est une grande reconnaissance de son travail.

En France, on l'a vu, bien peu de galeries se mettent exclusivement au service de l'art et de la géométrie ; elles se comptent sur les doigts d'une seule main, encore moins les musées puisque seul l'Espace de l'art concret de Mouans-Sartoux³ y est entièrement consacré. En revanche, en Allemagne d'où est originaire Anne Lahumière, aux États-Unis, au Japon, aux Pays-Bas, ou encore en Suisse l'art géométrique a la place qui lui revient. Le mérite de la galerie Lahumière qui, depuis des décennies, promeut cet art géométrique avec motivation et apporte un éclairage averti sur la discipline est à louer. ●

² cf. XYZ n° 132

³ cf. XYZ n° 122



■ Mécanique quantique le minimum théorique

Tout ce que vous avez besoin de savoir pour commencer à faire de la physique

Léonard SUSSKIND et Art FRIEDMAN

Léonard Susskind nous a enseigné la mécanique classique dans le premier volume de cette série, *Le Minimum Théorique*. Avec son co-auteur Art Friedman, il nous expose maintenant les bases théoriques et les concepts mathématiques associés au monde étrange de la physique quantique. Dans ce deuxième ouvrage, Susskind et Friedman proposent une introduction claire et vivante à ce domaine notoirement ardu et déroutant pour le néophyte. Ils nous font comprendre le comportement des objets sub-atomiques au travers d'abstractions mathématiques simples. À la différence de la plupart des ouvrages de vulgarisation - souvent mal à l'aise quant à la façon d'aborder les singularités de la mécanique quantique -, le livre embrasse cet univers dans sa totalité, y compris les paradoxes si contraires à notre logique. Susskind et Friedman proposent des explications limpides aux problématiques et l'état quantique, d'incertitude, d'intrication quantique ou de représentation de l'état d'une particule. Accessible mais rigoureux, *Mécanique Quantique* s'adresse, comme le *Minimum Théorique*, à tous ceux désireux de s'initier à la physique, à leur propre rythme.

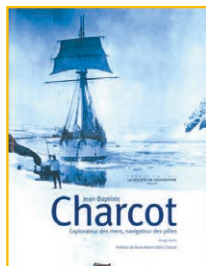
*Léonard Susskind est professeur en physique théorique à l'Université de Stanford depuis 1978. Auteur de nombreux ouvrages (et notamment avec Georges Hrabovsky du best seller *Le Minimum Théorique*), il vit actuellement à Palo Alto, en Californie.*

Art Friedman est ingénieur en systèmes de données. Il a passé quinze ans chez Hewlett-Packard, et vit actuellement à Murphys, en Californie.

► Presses polytechniques et universitaires romandes

19 € - 355 pages

ISBN : 978-2-88915-115-8



■ Jean-Baptiste Charcot, explorateur des pôles

Serge KAHN

Préface Anne-Marie VALLIN CHARCOT

Les explorations polaires de Jean-Baptiste Charcot à travers des documents inédits !

Que serait devenue la recherche polaire en France sans les expéditions de Jean-Baptiste Charcot ? En effet, depuis la découverte de la terre Adélie par Dumont d'Urville en 1840, il aura fallu attendre Jean-Baptiste Charcot et ses deux importantes expéditions en Antarctique, en 1903-1905 à bord du *Français*, puis en 1908-1910 sur le *Pourquoi-Pas ?* pour que la France s'intéresse aux régions polaires. Grâce à ses missions, dont les résultats scientifiques sont impressionnants, Charcot s'inscrit dans la grande tradition polaire aux côtés d'Amundsen, Byrd, Nordenskjöld, Shackleton et Scott. Naviguant dans des conditions extrêmes à la lisière de la banquise, le commandant Charcot longe la terre de Graham et découvre à 70° sud un territoire totalement inconnu qu'il baptise "terre Charcot" en l'honneur de son père, Jean Martin, le célèbre neurologue français. Abondamment illustré par des documents issus des archives de la famille Charcot, cet ouvrage rend également compte des nombreuses campagnes menées par le navigateur dans les mers du Nord, de 1912 à 1936 : aux îles Féroé, à Jan Mayen, en Islande et sur la côte orientale du Groenland où, en 1934, il installe la mission ethnographique de Paul-Emile Victor. Ce coffret propose au lecteur 35 reproductions en fac-similés* de documents rares et inédits : télégrammes, cartes postales de Charcot à ses filles, menu dessiné par Pierre Le Conte, dessins de cartes de la main de Charcot, lettre à Paul-Émile Victor, rapport d'expédition, ordonnance médicale rédigée par l'explorateur, carton d'invitation à une soirée organisée par le Yacht Club de France, courrier de Scott, etc. Lire les articles de J. Bourgoïn, Y. Valette consacrés à l'histoire polaire dans des numéros d'XYZ.

Président des "Amis du Commandant Charcot et du Pourquoi Pas", membre de

* Les documents et fac-similés appartiennent à la collection Anne-Marie Vallin Charcot.

l'Académie européenne de philatélie, Serge Kahn se passionne depuis de nombreuses années pour les activités françaises dans les régions polaires et s'intéresse plus particulièrement à Jean-Baptiste Charcot à travers l'histoire postale qu'il découvre la réalité du monde polaire.

► Éditions Glénat

La société de géographie

45 € - 176 pages - (240 x 320)

ISBN : 9-782-344-00834-8



■ Demain l'espace

Jacques ARNOULD

Avant-propos de Jean-Yves LE GALL, président du CNES

Préface d'Irina BOKOVA, directrice générale de l'UNESCO

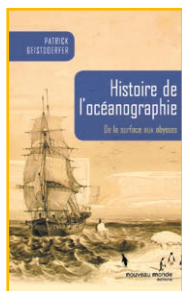
L'espace. Depuis le lancement de Spoutnik en 1957, il s'est imposé à une vitesse rarement atteinte par les autres domaines techniques, semblant ainsi se diluer au sein de nos sociétés. Mais que seraient-elles aujourd'hui sans les télécommunications et les géopositionnements, sans les images et les cartes généreusement distribuées par les réseaux numériques ? Personne n'ose imaginer une journée, voire une heure sans satellite. Dans le même temps, les sondes interplanétaires explorent les tréfonds de notre système solaire et les télescopes spatiaux sondent les profondeurs de l'univers ? Et demain ? L'espace devra affronter de nouveaux défis : le suivi du changement climatique et la gestion de ses conséquences sur les populations humaines, l'apparition de nouvelles puissances spatiales et d'acteur privés.

L'espace de demain devra ainsi franchir de nouvelles frontières, explorer de nouveaux territoires inconnus. Mêlant l'information scientifique et technologique, l'interrogation sociétale et éthique, mais aussi l'émerveillement et l'émotion esthétique, cet ouvrage se propose de les faire découvrir. L'espace restera, demain encore, un lieu d'exigence et d'excellence, d'audace intellectuelle et de courage, de créativité et de rêve.

Jacques Arnould, historien des sciences, est chargé des questions éthiques au Centre national d'études spatiales (CNES).

► 29 € - 168 pages (235 x 280)

ISBN : 978-2-7491-3



■ Histoire de l'océanographie de la surface aux abysses

Patrick GEISTDORFER

Il y a quelque quatre milliards d'années, la mer a été le berceau de la vie. Pourtant, elle est longtemps restée un univers impénétrable, régi par des mécanismes mystérieux, peuplé d'animaux fantastiques que les hommes ont reproduits sur les murs de leurs temples et de leurs palais, aussi bien que sur les objets du quotidien.

La connaissance des zones côtières s'est développée dès l'Antiquité, puis celle des espaces plus lointains grâce aux voyages d'exploration qui culminent en Europe à partir de la fin du XVIII^e siècle. L'océanographie ne prend réellement son essor qu'au siècle suivant. Elle recueille, précise et complète les savoirs accumulés, ceux des grands découvreurs et des savants, aussi bien que ceux des innombrables anonymes qui ont appris à lire la mer et ont transmis leur expérience. Surtout, elle ouvre une troisième dimension, celle des profondeurs, que les progrès techniques rendent peu à peu accessibles. Au fil des deux siècles écoulés, la recherche océanographique n'a jamais cessé de se développer et de se diversifier. Elle est devenue dynamique, physique, chimique, géologique ou biologique. Appuyés sur de puissantes organisations étatiques ou internationales, elle mobilise des moyens toujours plus nombreux et perfectionnés, déployés sur les navires au large, aussi bien qu'à terre dans les instituts, les laboratoires et les stations marines. Les mécanismes les plus complexes sont ainsi peu à peu percés, ceux qui commandent la vie aussi bien que ceux qui contribuent par exemple à régenter notre climat. Mais la mer est loin encore

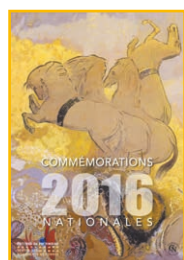
d'avoir livré tous ses secrets...

Cet ouvrage comporte un glossaire et une importante bibliographie.

Patrick Geistdorfer, océanographe, directeur de recherche au CNRS, est également capitaine de frégate et membre de l'académie de Marine. Il a dirigé le département environnement et le laboratoire d'océanographie de l'École navale, et effectué de nombreuses campagnes océanographiques.

► **Nouveau monde éditions**
Collection "Histoire des sciences"

24 € - 380 pages
ISBN : 978-2-36942-330-0



■ Commémorations nationales 2016

Rédigé par des spécialistes incontestés, le recueil des Commémorations nationales, dont le premier exemplaire remonte à 1986, présente une palette exceptionnelle d'anniversaires sélectionnés dans tous les domaines de l'histoire de France et abordés cette année chronologiquement : la politique, l'art militaire, l'économie, les beaux arts, les sciences, y trouvent leur juste place. Certes, en 2016, le souvenir des batailles de Verdun et de la Somme témoigne avec gravité de l'atrocité de la guerre, tandis que le centenaire de la publication du Feu d'Henri Barbusse rend justice à cet ouvrage dont beaucoup ont perdu la mémoire. Mais quantité d'autres personnages, d'autres événements, se croisent et se côtoient dans ce recueil, malicieusement réunis par les hasards du calendrier : Diane de Poitiers et Françoise Giroud, Nostradamus et Erik Satie, Jean-Marc Nattier et Vassili Kandinsky, Guillaume le Conquérant ou Alberto Giacometti... Fondation de l'abbaye de Monts-Saint-Michel en 966, création de l'Académie des sciences en 1666, une multitude de manifestations culturelles mettront en lumière ces anniversaires

tout au long de l'année 2016 sur l'ensemble du territoire français. Autant de raison de découvrir les richesses de ce nouveau millésime. À noter des informations destinées à compléter les articles comme des orientations bibliographiques, les coordonnées des associations organisatrices de manifestation et leurs sites internet.

► **Éditions du patrimoine**
12 € - 304 pages
ISBN : 978-2757-704165

À lire dans la revue :

L'ingénieur constructeur n° 536

Revue technique des ingénieurs ETP Le dossier de 24 pages sur :

■ "le BIM dans le domaine du BTP"

2^e partie avec au sommaire :

Les formations "BIM" à l'ESTP Paris - Le message de Bertrand Delcambre, président du Plan de Transition Numérique dans le bâtiment - La vision du BIM dans le bâtiment par un assistant à maîtrise d'ouvrage - Le BIM pour le géomètre par Dominique Vialle du Cabinet Daniel Legrand (CDL) - Les ateliers Jean Nouvel, architecte, et le BIM - Le BIM dans la maîtrise d'œuvre : exemples chez Egis, dans les infrastructures et dans la rénovation immobilière - Le déploiement du BIM chez VINCI Construction France - Le BIM au plan international - Difficultés, responsabilités et risques du BIM.

► **Email : info@sidetp.org**

■ Géophotos

Recueil 2015 ESRI

Comme chaque année, la géographie rencontre la photographie. Ce livre nous emmène dans un voyage imaginaire grâce à 46 illustrations insolites, énigmatiques. Cet ouvrage a été conçu par le département communication d'ESRI France.

► **Version électronique :**
[esrifrance.fr / géophotos](http://esrifrance.fr/geophotos).

REPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 146

COVADIS	4 ^e de couv	REIS STOLZEL	10
LEICA	2 ^e de couv	Spectra	2

La gestion foncière dans le Projet d'aménagement hydro-agricole du Bahr Linia (PAHA-BL) au Tchad (partie 1 : le contexte)

■ Claire GALPIN

Le Tchad est l'un des pays les plus pauvres au monde, classé 184^e sur 187 en 2014 selon l'indice de développement humain (IDH) du Programme des Nations Unies pour le Développement. Plus de 64 % de la population vit en-dessous du seuil d'extrême pauvreté avec moins de 1 dollar US par jour et par personne.

Le Bahr Linia est un bras secondaire du Chari dont le lit mineur et les bras morts sont localisés au plus proche de N'Djamena. Ce bras du Chari prend naissance à environ 40 km au sud de N'Djamena pour rejoindre le lac Tchad. L'alimentation du Bahr Linia par le Chari a permis pendant longtemps de maintenir des activités diversifiées et la région du Bahr Linia est une zone de production où cohabitent agriculteurs et éleveurs, sédentaires ou transhumants. Grâce à des densités démographiques relativement faibles, la déforestation a été limitée et des zones de boisement préservées malgré l'intensification des activités obtenue par l'utilisation de l'eau.

La période de forte sécheresse enregistrée dès les années 60 – 70 s'accompagne de profonds changements physiques naturels et comportementaux anthropiques à l'origine d'une importante réduction du potentiel agricole et piscicole mais aussi environnemental : les apports du Bahr Linia ont sévèrement diminué, et sont même presque nuls au niveau de Linia. La déforestation a qui a conduit à dénuder les terrains, à accroître l'érosion pluviale et éolienne a ainsi favorisé le comblement du lit du Bahr par glissement de ses berges. La baisse du niveau des crues du Chari et le comblement du lit du Bahr Linia par la sédimentation ont réduit puis stoppé l'écoulement des eaux depuis le Chari. Le Bahr Linia n'entre en fonctionnement hydraulique que certaines années exceptionnelles. Cette évolution a forte-



Réunion de concertation les notables sur les chaises... les femmes derrière sur le tapis.

ment pénalisé les activités agricoles irriguées des populations riveraines qui se sont très fortement réduites. Or, ces zones, situées à proximité de la capitale N'Djamena, pourraient devenir un bassin d'approvisionnement alimentaire de la ville, dont la population connaît par ailleurs une croissance rapide, de l'ordre de 5 % par an.

Dans ce contexte, avec l'appui de l'Agence française de développement (AFD), l'État tchadien s'est engagé à réaliser les investissements qui permettraient, au travers d'aménagements hydrauliques, de redonner son hydraulicité au Bahr Linia et de permettre le développement, à proximité de N'Djamena, d'une zone de production agricole irriguée, de pisciculture et d'accueil de troupeaux d'éleveurs nomades. Une remise en eau s'étendant de la prise dans le Chari sur une soixantaine de kilomètres, permettrait d'irriguer 2 000 à 2 500 ha de terrains agricoles avec 1000 ha de cultures en contre-saison froide et de diversifier les productions. Le secteur pourrait devenir la deuxième source d'approvisionnement en produits maraîchers et fruitiers de la capitale après le lac Tchad.

Compte tenu des tensions sur la terre et sur la ressource en eau que peut engendrer l'augmentation de la disponibilité des ressources et du potentiel de production des parcelles agricoles, le projet PAHA-BL prévoit également la mise en place d'un processus de concertation devant aboutir à une stratégie de gestion du foncier dans la zone et de gestion de la ressource en eau dans le

périmètre du projet. En effet plusieurs types de pressions foncières risquent de se renforcer une fois les aménagements du Bahr Linia réalisés. Il s'agit des conflits entre les éleveurs transhumants et les agriculteurs sédentaires (éleveurs ou non) entre lesquels la tension risque d'être accrue par la présence, tard dans la saison, de cultures irriguées appétentes pour les animaux, et par une pression pastorale de plus en plus forte. Par ailleurs la venue de nouveaux arrivants urbains en demande d'une résidence ou de grandes superficies agricoles pour investir est déjà effective du fait de la proximité de la capitale. Cette pression risque de s'accroître et de déstabiliser l'organisation et la vie de la population actuelle de producteurs du canton de Linia, au profit exclusif des nouveaux arrivants. L'évolution du contexte liée à l'influence urbaine et à l'accroissement de la tension sur les ressources en terre nécessite une inscription juridiquement reconnue du statut foncier.

C'est pourquoi le projet travaille depuis plusieurs mois à réaliser des enquêtes socio foncières, la cartographie parcellaire et les concertations participatives et inclusives pour déterminer le dispositif et la méthodologie à adopter pour la mise en place d'un comité de gestion foncière (CGF) pilote et d'une association des usagers du réseau hydro-agricole (AURHA).

Les résultats de l'étude diagnostic vont permettre de comprendre la problématique foncière, sociologique, humaine et institutionnelle de la zone et de préciser les enjeux de la région de Linia. Elle permettra également d'identifier les interlocuteurs légitimes pour traiter des questions foncières et de partage de la ressource en eau, vis-à-vis de l'administration comme de la population. Enfin elle permettra de construire le CGF et l'AURHA du point de vue de l'ancrage institutionnel, réglementaire, organisationnel et mettre en place leurs constitutions et prérogatives. ●



Bulletin d'adhésion ou d'abonnement 2016

à retourner à l'AFT par courrier ou courriel sauf inscription par Internet

Les adhésions et abonnements 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 française de topographie.

☐ technicien ou enseignant, si règlement sur compte personnel,
ou étudiant, ou chômeur, ou retraité **50 €**

☐ cadre ou personne morale, et pour tout règlement émanant d'une administration
ou d'une entreprise **80 €**

(Ces tarifs comprennent l'abonnement à la revue XYZ au tarif préférentiel de 42 €)



☐ Je souhaite m'abonner à la revue XYZ **83 €**

☐ Je vous adresse :

☐ soit un bon de commande afin de recevoir une facture au préalable

☐ soit le règlement de : _____ € (pour l'étranger ajouter 3 euros de frais de port)

☐ par chèque à l'ordre de l'AFT.

Pour les chèques payables sur une banque à l'étranger, ajouter 10 € pour les frais bancaires.

☐ par mandat administratif au compte postal de l'AFT n°16 300 03Y Paris

☐ par virement IBAN FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048 – BIC : PSSTFRPPPAR.

☐ par carte bancaire, via notre site internet www.aftopo.org
(seulement depuis un pays à monnaie transférable).

☐ Je désire recevoir un reçu après règlement

M/Mme Nom : _____ Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____

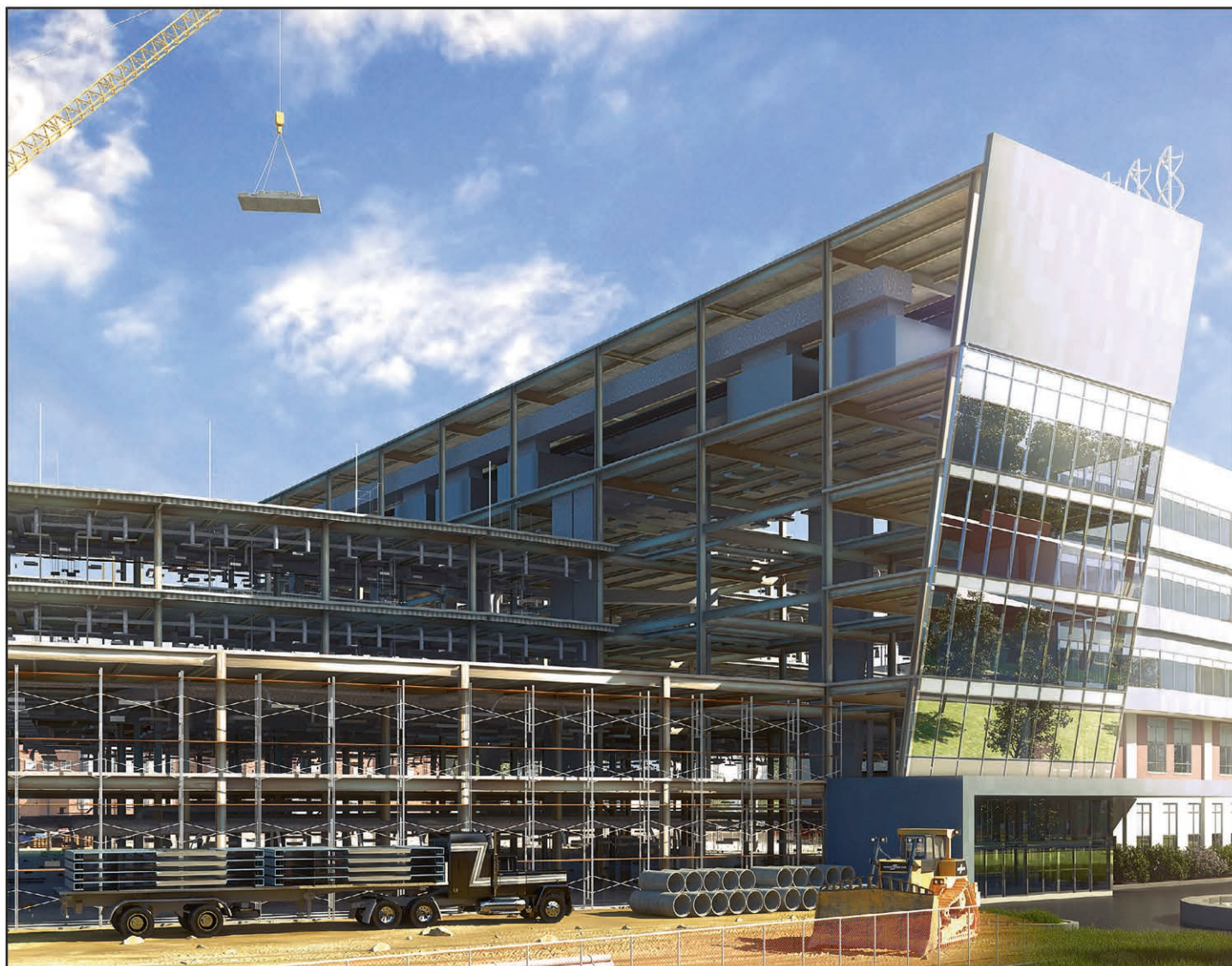
Tél. : _____ Portable : _____

Courriel : _____

Date / / Signature

**Bulletin à retourner accompagné d'un moyen de paiement (chèque ou mandat)
à l'Association française de topographie**

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



COVADIS
TOPOGRAPHIE ET INFRASTRUCTURE

Avec COVADIS Version 15,
évoluez vers le BIM.

 **GEOMEDIA SAS**
ÉDITEUR DE LOGICIELS D'INFRASTRUCTURE

Immeuble "La Vigie" - 20, quai Malbert - CS 42 905 29 229 BREST Cedex 2 - France
Tél. 02 98 46 38 39 - Fax 02 98 46 46 64
E-mail : christian.legac@geo-media.com - Site Web : www.geo-media.com

© 1993-2015 GEOMEDIA S.A.S. : COVADIS est une marque déposée de GEOMEDIA S.A.S.
Tous les autres noms de produits cités sont des marques déposées de leurs propriétaires respectifs.

19 418 licences installées,
1 322 cabinets équipés !

 **AUTODESK**
Gold Partner

Architecture, Engineering & Construction