



HAL
open science

Positionnement et mesure de déformation par techniques géodésiques

Stéphane Durand

► **To cite this version:**

Stéphane Durand. Positionnement et mesure de déformation par techniques géodésiques. Planète et Univers [physics]. Le Mans Université, 2019. tel-04009147

HAL Id: tel-04009147

<https://cnam.hal.science/tel-04009147>

Submitted on 2 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DOSSIER D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

déposé auprès de

LE MANS UNIVERSITÉ

Positionnement et mesure de déformation par techniques géodésiques

Stéphane Durand

Jury :

M. Pierre Briole	RAPPORTEUR
M. Frédéric Masson	RAPPORTEUR
M. Régis Mourgues	EXAMINATEUR
Mme. Valérie Renaudin	RAPPORTRICE
Mme. Andréa Walpersdorf	EXAMINATRICE

Soutenue le 8 mars 2019

Table des matières

Contexte	3
I Synthèse des activités	6
Curriculum Vitae	7
Activités de recherche	9
Publications scientifiques	25
Activités d'enseignement	34
II Synthèse des activités de recherche	37
Introduction	38
Améliorer la précision du positionnement GNSS temps réel	40
Améliorer la précision du positionnement différentiel précis temps réel (RTK)	42
Evaluer les performances des méthodes NRTK	51
Evaluer et améliorer la précision de la technique PPP	52
Développer un nouveau service de positionnement PPP	53
Améliorer la précision de la mesure de déformation par combinaison de techniques	59
Identifier les niveaux de combinaison possibles entre les techniques	60
Améliorer la précision du positionnement par combinaison GNSS / topométrie	63
Améliorer la précision du positionnement par combinaison GNSS / PSInSAR	65
Maîtriser la pondération relative entre les techniques	68
Développer et maîtriser les outils de combinaison de techniques	71

Appliquer la mesure précision dans différents domaines	82
Etude de la surcharge océanique en Bretagne-Cotentin	82
Etude de la dynamique des segments de rift actifs en Islande	85
Alignement et positionnement dans le cadre du projet ToMuVol	85
Tomographie 3D par GNSS pour l'étude de la dynamique de la troposphère	88
Développement de méthodes d'alignement pour le CERN	91
Utilisation de fils tendus dans les réseaux tachéométriques	92
Mesures de vibrations acoustiques par vision 3D	93
Couplage géodésie/hydrologie pour l'étude de sites hydrogéologiques	96
Prise en compte de la réfraction latérale asymétrique dans les réseaux d'auscultation . . .	99
Conclusion	102

Contexte

A l'issue de mon doctorat, en 2003, j'ai été recruté au sein du Cnam en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) et affecté à l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT). Etant donné le contexte de l'ESGT à cette période, tant en recherche qu'en enseignement, ce poste était à la fois un beau challenge et un risque important pour mon avenir de jeune docteur. A cette époque, il n'existait pas de laboratoire de recherche à proprement parler au sein de l'ESGT, mais simplement une petite équipe menant des recherches en géodésie, constituée d'un ATER (Laurent Morel), d'un ingénieur d'études (José Cali) et de deux personnels en détachement de l'IGN, Henri et Françoise Duquenne. L'ESGT manquait cruellement d'enseignants-chercheurs permanents, pour essentiellement deux raisons : (1) le nombre de postes permanents attribués à l'école par sa tutelle, le Conservatoire national des arts et métiers (Cnam), était insuffisant après le déménagement de l'école au Mans en 1997 ; (2) les quelques postes créés par le Cnam avaient été rapidement désertés par leurs titulaires, qui avaient préféré retourner mener leurs recherches dans leurs laboratoires d'origine à l'IGN. Cette pénurie d'enseignants permanents se traduisait par une charge d'enseignement très importante pour les personnels restants, au détriment de l'activité de recherche.

Au cours de l'année 2003, plusieurs changements ont eu lieu au sein de l'équipe permanente de l'ESGT. Laurent Morel et Joëlle Nicolas-Duroy ont été recrutés comme Maîtres de conférences sur deux postes vacants. Le départ de Henri et Françoise Duquenne, arrivés en fin de période de détachement, a permis mon recrutement en tant qu'ATER. Si bien que fin 2003, l'ESGT s'est retrouvée avec une équipe de recherche renouvelée, mais à effectif constant.

Avec l'aide de la Commission des Titres d'Ingénieur (CTI), et à force de persévérance, les directeurs successifs de l'ESGT ont réussi dans les années suivantes à obtenir du Cnam plusieurs postes permanents. J'ai ainsi été recruté en 2005 comme Maître de conférences, en même temps que 3 autres collègues, portant fin 2005 l'effectif de l'équipe à 7 enseignants-chercheurs. Avec l'arrivée en 2007 de Laurent Polidori comme Professeur Titulaire de la Chaire de géomatique du Cnam, nous avons obtenu notre reconnaissance en tant que Jeune Equipe de recherche (JE2508 - Laboratoire Géodésie et Géomatique - L2G) et nous sommes rattachés à l'école doctorale pluridisciplinaire *Arts et Métiers* (ED415) du Cnam. La Jeune Equipe est devenue Equipe d'Accueil (EA4630) en 2011 et a étendu ses thèmes de recherche à l'ensemble des activités de l'ESGT, pour devenir le Laboratoire Géomatique et Foncier (GεF), regroupant aujourd'hui une vingtaine d'enseignants-chercheurs. Avec la disparition de l'ED415 en 2011, notre laboratoire s'est rattaché à deux écoles doctorales, l'ED546 Abbé Grégoire du Cnam pour la partie SHS¹ et l'ED498 SPIGA² puis l'ED602 SPI³ pour la partie géomatique.

1. Sciences Humaines et Sociales

2. Sciences Pour l'Ingénieur, Geosciences et Architecture

3. Sciences Pour l'Ingénieur

Dès l'origine, ce poste m'a attiré car il me permettait de participer activement, dans un petit groupe, à la création et au développement d'une équipe de recherche, avec pour centre d'intérêt la géodésie, et comme atout d'être intégré dans une école d'ingénieurs. Il me donnait également l'opportunité de m'essayer à l'enseignement, que je n'avais pas eu l'occasion de pratiquer jusqu'alors. Et avec le manque cruel d'enseignants permanents à l'ESGT à cette époque, ce poste d'ATER me permettait non seulement d'intervenir pour des Travaux Pratiques et des Travaux Dirigés, mais également de prendre en charge la responsabilité de certains enseignements (cours magistraux, responsabilité d'équipements spécialisés, gestion d'intervenants extérieurs). J'étais parfaitement conscient, en acceptant ce poste, de la charge de travail qui m'attendait en enseignement, et des risques liés à ma présence dans une petite équipe de recherche non reconnue et devant se faire une place dans le paysage scientifique français et international.

Dès la fin 2003, dans cette petite équipe de recherche renouvelée, une volonté commune de développer des projets de recherche communs, de se développer et d'être reconnue au niveau national s'est rapidement exprimée. Afin de concrétiser cette volonté, nous nous sommes appuyés sur les travaux menés jusqu'alors en géodésie au sein de l'équipe, en particulier l'étude préliminaire du phénomène de surcharge océanique en Bretagne-Cotentin en 1998-1999, réalisée par différents instituts dont l'ESGT. Nous nous sommes fortement impliqués en tant qu'équipe dans la poursuite de cette première étude, à travers la campagne multi-techniques menée par le GDR-G2⁴, impliquant des chercheurs de différents instituts nationaux (CNES, IPGP, IGN, OCA, UNSI, EOST, ...). Cette première expérience a permis à notre équipe de se structurer, mais également de devenir un acteur reconnu de la communauté géodésie/géophysique. Dans cette campagne multi-techniques (GNSS, gravimétrie, SLR⁵, inclinométrie), notre équipe a largement contribué au volet GNSS, tant au niveau de la planification et de la réalisation des observations, que de la production de résultats scientifiques. En tant qu'ATER, cette campagne a constitué l'essentiel de mes travaux de recherches durant presque un an et demi : organisation d'une partie de la campagne GNSS (septembre/octobre 2004), participation aux observations terrain (mars-octobre), mise en place de la méthodologie de traitement GNSS permettant de concilier précision du référencement et précision dans l'observation du phénomène de surcharge océanique, étude de l'impact du logiciel et de la stratégie de traitement sur les résultats, par inter-comparaison entre plusieurs logiciels (GAMIT, Bernese, GINS, Gipsy-Oasis II).

A mon arrivée à l'ESGT en tant qu'ATER, la préoccupation première de l'équipe nouvellement en place était de pouvoir assurer rapidement les enseignements jusque là réalisés par Henri et Françoise Duquenne, dont les services étaient largement excédentaires. Du fait de ma formation en mathématiques appliquées, j'ai pris la responsabilité de l'enseignement de Topométrie de Précision, pour les 4ème et 5ème années du cycle d'ingénieur. Cet enseignement fait appel aux mathématiques appliquées (algèbre, statistiques), à la géodésie, mais également à la topographie, l'auscultation et la mesure de précision, ces derniers domaines m'étant jusqu'alors peu familiers. J'ai rapidement souhaité exploiter ces nouvelles connaissances dans mon activité de recherche. D'une part en participant à des projets où la mesure topographique/géodésique permet d'observer des déplacements de faibles amplitudes, et en collaborant avec d'autres chercheurs sur cette thématique. D'autre part en développant au sein du laboratoire une activité de recherche sur la combinaison de techniques géodésiques (topométrie, GNSS, DInSAR) pour améliorer la précision de la mesure de déformation. En 2007, j'ai ainsi mis en place la thèse de Benoit Legru, et obtenu un financement de l'ED Arts et Métiers du Cnam. Aujourd'hui, cette thématique de combinaison de techniques géodésiques est

4. Groupement de Recherche en Géodésie et Géophysique

5. Mesures Laser sur Satellite

l'un des axes fédérateurs de notre laboratoire, intégré dans l'un de ses projets structurants, intitulé **Optimisation des méthodes et le développement d'approches innovantes pour la mesure de déformation**. Elle regroupe plusieurs membres du laboratoire issus de différents domaines (géodésie, InSAR, télédétection, photogrammétrie, topographie) autour de recherches méthodologiques d'amélioration de précision de la mesure de déformation, par combinaison de techniques ou optimisation du traitement.

Mes recherches se développent ainsi depuis plus de 10 ans autour de la thématique du positionnement et de la mesure de déformation, avec comme objectifs la qualification de la précision obtenue, l'étude de l'impact de la méthodologie de traitement des données employée et l'amélioration de la précision, par combinaison de techniques géodésiques, optimisation du traitement d'une technique particulière ou développement de nouvelles méthodes de traitement.

Mes activités et expériences passées, tant en recherche qu'en encadrement, me poussent aujourd'hui à constituer un dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches. Il s'agit bien sûr d'une démarche personnelle, guidée par l'envie de faire un point sur mes presque 20 années d'activité de recherche, mais aussi celle de pouvoir encadrer légitimement de nouvelles thèses. Il s'agit également à mon sens d'une démarche plus collective liée à ma volonté de développer au sein du Cnam et de l'ESGT, un laboratoire de recherche reconnu en géomatique, et à mon implication en son sein depuis ses débuts. Notre laboratoire compte aujourd'hui près de 20 enseignants-chercheurs, dont seulement 5 disposent d'une HDR (PU ou MCF), la faute à une pyramide des âges défavorable. Faisant partie des plus anciennement recrutés au sein de l'équipe, il me semble important aujourd'hui de participer, par le biais de ce dossier, à son évolution.

J'ai souhaité déposer mon dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches au sein de l'école Doctorale SPI, qui est depuis plusieurs années l'école de rattachement de nos activités en géodésie et géomatique. Le document suivant s'attache à décrire mes activités d'enseignant-chercheur et se divise en 2 parties. La première, sous forme d'un CV étendu, retrace mon parcours, mes activités et mes responsabilités en recherche et en enseignement. La seconde est une synthèse de mes travaux de recherche et traite de l'amélioration de la précision du positionnement par méthodes géodésiques.

Première partie

Curriculum Vitae

**Synthèse des activités de recherche,
d'administration et d'enseignement**

Stéphane Durand

Docteur en Géodésie

Section CNU n°60

Né le 4 juin 1976 à Limoges (87)

Marié, deux enfants

Conservatoire national des arts et métiers

Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes

Laboratoire Géomatique et Foncier (GεF)

1 boulevard Pythagore - 72000 le Mans

Tél : 02-43-43-31-58

Courriel : stephane.durand@lecnam.net

Formation initiale

- 1998 **Maitrise** en mathématiques appliquées
Faculté des Sciences de l'Université de Limoges
- 1999 **D.E.A.** en Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie
Observatoire de Paris
- 1999-2002 **Doctorat** en Dynamique des Systèmes Gravitationnels
(école doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile de France)
soutenu le 13 janvier 2003
réalisé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes
encadré par Pascal Willis (IGN) et François Peyret (LCPC)

Déroulement de carrière

- 09/2003 → 02/2005 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche
Cnam/Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes
- depuis 02/2005 **Maître de conférences Cnam** au sein de l'ESGT

Responsabilités scientifiques et administratives

- Responsable de l'enseignement de Topométrie de Précision (cycle ingénieur ESGT) depuis 2003
- Responsable de l'équipement de Topométrie de précision/méetrologie de l'ESGT depuis 2003
- Coordinateur de la 5ème année du cursus ingénieur ESGT depuis 2016
- Coordinateur des projets de 5ème année du cursus ingénieur ESGT en 2005, puis de 2012 à 2016
- Secrétaire de la section géodésie du Comité National Français de Géodésie et Géophysique (CNFGG) de 2007 à 2011
- Participation à l'organisation locale de colloques nationaux (G2 en 2005, CNFGG en 2010)
- Membre du comité de lecture de la revue française XYZ éditée par l'Association Française de Topographie (AFT)
- Membre élu au conseil de l'AFT depuis juin 2016
- Membre élu au conseil de département ICENER⁶ (Cnam) de 2010 à 2016 puis au conseil de l'EPN02⁷ (ESGT) depuis 2017

6. Ingénierie de la construction et énergétique

7. Equipe pédagogique nationale

Production scientifique

- 9 articles à comité de lecture dans des revues internationales (ACL)
- 7 articles à comité de lecture dans des revues nationales (ACLN)
- 10 communications avec actes dans des congrès internationaux (ACTI)
- 1 dépôt de logiciel auprès de l'Agence de Protection des Programmes
- 1 communications avec actes dans des congrès nationaux (ACTN)
- 1 participation à un ouvrage scientifique (OS)
- 19 communications orales et 22 posters dans des congrès (COM et AFF)

Encadrements scientifiques

- 3 co-encadrements de doctorats
- 1 co-direction de doctorat en cours
- 1 participation à une thèse de doctorat
- 1 participation à un encadrement post-doctoral
- 21 encadrements de stages au niveau Master 2
- 10 encadrements de stages au niveau Master 1
- 54 accompagnements de travaux de fin d'études Master 2 / ingénieurs

Activités de recherche et de valorisation de la recherche

- Développement d'outils et de méthodes pour l'amélioration de la précision et de la fiabilité des réseaux d'auscultation réalisés par méthodes géodésiques (tachéométrie, GNSS, InSAR, ...)
- Combinaison bas niveau de techniques géodésiques pour améliorer la précision de détermination de déplacements dans un contexte de mesure de déformations et d'auscultation (GNSS/topométrie et GNSS/PSInSAR).
- Application des méthodes de positionnement et de mesure de déformation fine à différents domaines, dans le cadre de projets ou de partenariats : géophysique, hydrologie, acoustique, alignement d'accélérateurs de particules, volcanologie.
- Développement et diffusion du logiciel CoMeT (Compensation de Mesures Topographiques)
- Comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques et étude de l'influence de la paramétrisation des logiciels sur les résultats.
- Amélioration et qualification de la précision du positionnement GNSS pour les applications temps réel. Comparaison de solutions existantes, développement de nouvelles méthodes, proposition de nouvelles approches théoriques (graphes algébriques)

Activités de recherche

Résumé des activités d'encadrement de recherche

- 2 co-encadrements de doctorats soutenus (2011 et 2017)
- 1 co-encadrement de thèse avec soutenance le 11 janvier 2019
- 1 co-direction de thèse CIFRE en cours (depuis avril 2018)
- 1 départ de thèse CIFRE (Cementys / GεF) prévu pour 2019
- 1 participation à une thèse de doctorat
- 1 participation à un encadrement post-doctoral
- 21 encadrements ou co-encadrements de stages de fin d'études Master 2 depuis 2004
- 10 encadrements de stages de Master 1 depuis 2004
- 54 accompagnements de stages de fin d'études Master 2 depuis 2004

Activités de recherche actuelles et à venir

Mon activité de recherche est depuis plusieurs années centrée sur la mesure de déformation, en utilisant les techniques issues de la géomatique que sont par exemple la tachéométrie, le nivellement, le GNSS, l'InSAR ou la photogrammétrie. Il s'agit d'une part d'une recherche méthodologique, visant à améliorer la précision et la fiabilité de la mesure de déformation, par optimisation du traitement d'une technique, par la combinaison de techniques ou par le développement de nouvelles méthodes de traitement. Il s'agit d'autre part d'une recherche appliquée, où je cherche à adapter et à optimiser l'utilisation des techniques géodésiques pour des cas particuliers : mesures plein champs d'objets par vision 3D, étude de déformation d'ouvrages d'art, surveillance de sites naturels.

Mon activité de recherche est parfaitement intégrée dans les thématiques principales de recherche du laboratoire GεF. L'activité de recherche que j'ai initié dès 2007 sur la combinaison de techniques géodésiques (topométrie, GNSS, InSar) est rapidement devenue un axe fédérateur de l'équipe L2G. Aujourd'hui, l'un des projets structurant porté par notre laboratoire concerne l' **Optimisation des méthodes et le développement d'approches innovantes pour la mesure de déformation**. Ce projet structurant permet de regrouper plusieurs enseignants-chercheurs du laboratoire issus de différents domaines (géodésie, InSar, télédétection, photogrammétrie, topographie), autour de la thématique du développement de méthodes pour la mesure de déformation, et pour la recherche

méthodologique sur leur optimisation en terme de précision obtenue et de finesse des déformations observées.

Mes travaux de recherche en cours s'articulent autour de trois idées principales, qui interagissent fortement les unes avec les autres.

Combinaison de techniques géodésiques

La problématique de la surveillance d'ouvrages ou de sites naturels n'est pas nouvelle, et est depuis longtemps liée à celle de la minimisation des risques encourus par les personnes et les infrastructures. Aujourd'hui, le besoin clairement exprimé par les décideurs ou les exploitants de systèmes de surveillance concerne la précision de la mesure de déformation, sa fiabilité, mais également le délai d'alerte en cas de déformation trop importante. Pour réaliser la surveillance d'ouvrages ou de sites naturels, différentes techniques issues de la géomatique au sens large peuvent être mises en oeuvre : tachéométrie, nivellement, lasergrammétrie, GNSS, InSAR, photogrammétrie,... L'amélioration de la précision et de la fiabilité de la mesure de déformation passe évidemment par la maîtrise, l'adaptation fine au contexte de l'objet à surveiller et l'optimisation du traitement de chaque technique mise en oeuvre. Elle passe également par l'utilisation conjointe sur le même objet de plusieurs techniques, permettant l'inter-comparaison des résultats ou la combinaison des techniques.

L'intérêt majeur de la combinaison de techniques dans le cadre de la mesure de déformation est de permettre de tirer partie des avantages de chaque technique tout en limitant au maximum l'impact de leurs inconvénients. Parmi les différents niveaux de combinaison possibles entre techniques, je m'intéresse en particulier à la combinaison directe des observations entre 3 techniques particulières : tachéométrie, GNSS et PSInSAR. L'idée principale est d'utiliser des méthodes d'inversion en GNSS, topométrie et InSAR faisant appel à la méthode des moindres carrés, et de combiner les techniques par cumul des équations normales.

Cette philosophie a été mise en application dans le cas des méthodes GNSS et PSInSAR (InSAR différentiel utilisant des réflecteurs stables), dans le cadre du TFE de Jordan Burdack en 2013. En partant de l'algorithme STUN⁸, qui utilise la méthode des moindres carrés pour réaliser un traitement PSInSAR, nous avons proposé un algorithme réalisant une estimation en bloc des paramètres (erreur de MNT, déplacement vertical), à partir des mesures brutes interférométriques et GNSS. Même si le modèle fonctionnel était simplifié (phases différentielles InSAR déroulées et ambiguïtés GNSS connues), les résultats obtenus ont montré l'intérêt potentiel de cette approche (cf. [Simonetto et al. 2014]). Ce travail se poursuit aujourd'hui avec la thèse d'Abdeljalil Nahli débutée en avril 2018, dans le cadre d'une convention CIFRE avec l'entreprise Cementys. Le contexte est aujourd'hui la mesure fine des tassements 3D subis par les ouvrages d'art, bâtiments et infrastructures. Deux applications particulières sont visées : la surveillance en continue des mouvements en surface lors des phases de travaux sur les extensions des lignes 14 et 15 du Grand Paris Express et la surveillance du pont Wadi Leban en Arabie Saoudite. L'objectif est bien sûr de poursuivre le développement de notre algorithme de traitement combiné des mesures PSInSAR (bande X) et GNSS sur la base de la méthode des moindres carrés, en exploitant cette fois un modèle fonctionnel complet et en utilisant non plus des mesures brutes GNSS mais des vecteurs GNSS 3D. Il s'agit également d'étudier l'impact sur la précision des déformations observées de la géométrie du réseau, afin de proposer une méthodologie d'optimisation de cette géométrie : localisation des réflecteurs InSAR et des antennes GNSS, influence du nombre de points communs GNSS/PSInSAR, influence de la qualité de détermination des

8. Spatio-Temporal Unwrapping Network

excentrements entre les réflecteurs Insar et les antennes GNSS.

Le principe d'une combinaison de techniques par cumul d'équations normales a également été mise en application dans le cas des méthodes GNSS et topographiques. La thèse de Benoit Legru (2007-2011) et le TFE d'Angélique Azzini (cf. [Azzini and Durand 2010]) ont montré l'intérêt d'une exploitation combinée de ces techniques pour améliorer la précision de détermination des coordonnées d'un point. Avec le logiciel CoMeT, en continuelle évolution depuis 2007, je dispose aujourd'hui des outils essentiels pour poursuivre mes recherches sur cette combinaison GNSS/topométrie. Je m'intéresse en particulier à l'optimisation de la géométrie du réseau pour améliorer la précision et la fiabilité des déformations observées, mais également à l'étude de l'apport de l'intégration de différentes techniques topographiques en plus du GNSS : tachéométrie, nivellement, fils tendus, ...

Amélioration de la précision et de la fiabilité dans un réseau topographique

Pour réaliser la surveillance d'un site naturel ou artificiel, il est courant aujourd'hui de mettre en oeuvre des systèmes d'auscultation automatisés s'appuyant sur des stations totales robotisées réalisant des mesures en continu, ainsi que d'autres instruments (GNSS, niveau, inclinomètre, caméras, ...). Ce type de système permet de mesurer des déformations de quelques millimètres, typiquement 3 à 10 mm en 3D, sur des intervalles de temps de quelques dizaines de minutes à quelques heures. La finesse des déplacements observables est bien entendue liée à la géométrie du réseau de points mis en oeuvre et à la qualité des mesures réalisées, mais également aux conditions environnementales sur et autour de l'objet ausculté.

Mes recherches dans ce domaine sont donc orientées dans deux directions complémentaires : (a) la meilleure prise en compte des conditions environnementales dans le traitement des mesures, spécialement les gradients de températures horizontaux (asymétrie latérale de réfraction) et (b) le développement de nouvelles méthodologies de traitement pour améliorer la géométrie des réseaux topographiques.

Concernant le premier point, depuis plusieurs années, avec Laurent Longuevergne, de l'équipe EAU - Géosciences Rennes, nous nous intéressons à la problématique d'amélioration de la précision de mesure de déformation par correction des effets atmosphériques sur les mesures tachéométriques, avec des applications au suivi de déformation en surface de réservoirs hydrogéologiques. Les expériences menées en atmosphère contrôlée et en milieu naturel dans le cadre du PFE de Julien Assemat en 2015 et du TFE de Kévin Gobron en 2017 nous ont permis de confirmer que les gradients locaux de température le long de la ligne de visée constituaient la perturbation ayant le plus d'incidence sur la précision de la mesure de déformation, typiquement de 3 à 5 mm. Plusieurs pistes sont actuellement envisagées pour réduire l'influence de ces gradients : modélisation par méthodes type Fast-Marching, estimation lors de l'ajustement des données, élimination par méthodologie de mesure adaptée. Les réseaux de surveillance en tunnel ou sur des chantiers linéaires étant également impactés fortement par cette problématique de gradients horizontaux, nous avons constitué en 2018 un projet de thèse Cifre avec l'entreprise Cementys. Nous n'avons cependant pas retenu de candidat en 2018 et cherchons actuellement de nouveaux candidats pour déposer la proposition de thèse CIFRE auprès de l'ANRT courant 2019.

Concernant le second point, je travaille depuis 2015 avec des collègues du CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) et de la HEIG-VD (Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud) sur l'utilisation de fils tendus pour améliorer les qualités géométriques d'un réseau topo-

graphique longitudinal en tunnel. En pratique, lorsque l'on construit un réseau d'auscultation dans un tunnel, la précision et la fiabilité des coordonnées 3D des points du réseau se dégradent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des extrémités du réseau, surtout suivant la composante transversale. Ceci est dû à la forme très allongée du réseau et à la présence de points connus en coordonnées souvent uniquement aux extrémités du réseau. Un fil tendu sur plusieurs dizaines à centaines de mètres, ne subissant aucune sollicitation extérieure, matérialise un plan vertical et peut servir de référence d'orientation (avec une forme de chaînette suivant la verticale). Depuis plus de 50 ans, les géomètres qui travaillent sur l'alignement des accélérateurs de particules exploitent les fils tendus pour aligner avec des précisions sub-millimétriques les différents éléments des accélérateurs. Au CERN par exemple, pour l'alignement des composants du LHC - Large Hadron Collider, des fils conducteurs très fins (0.1 mm de diamètre) sont utilisés. Des capteurs capacitifs de positionnement à fils (WPS - Wire positioning system) permettent de mesurer précisément la position du fil, et des systèmes de centrage à bille spécifiques sont utilisés pour relier la référence d'orientation réalisée par le fil avec les points du réseau topographique. L'idée que nous développons depuis quelques temps est d'exploiter des fils plus classiques type cordelette en polyéthylène (2-3 mm de diamètre), ainsi que des mesures directes sur les fils, pour profiter de la référence d'orientation créée par le fil et améliorer la géométrie du réseau. Plusieurs méthodes d'ajustement, basées sur les moindres carrés et le logiciel CoMeT, ont été testées avec succès : utilisation de contraintes sur les coordonnées des points sur le fil ou expression des coordonnées en fonction des paramètres du fil (cf. [Duquenne et al. 2016], [Durand et al. 2018], [Durand et al. 2018c]). Les recherches s'orientent aujourd'hui sur l'amélioration de la précision du pointé sur le fil et sur les problématiques de liaison entre deux fils successifs.

Application de la mesure de déformation à différents domaines

Mes domaines de recherche concernent depuis de nombreuses années l'optimisation de l'utilisation et la combinaison de techniques géodésiques pour améliorer la précision de positionnement ou de mesure de déplacement. Ces recherches méthodologiques trouvent naturellement des applications dans différents domaines, en particulier en géophysique et en géotechnique, où la déformation mesurée est l'une des données permettant une meilleure compréhension du phénomène étudié.

Ma position d'enseignant-chercheur en topométrie de précision et GNSS au sein d'une école d'ingénieurs géomètres topographes, dont la spécialité est justement la mesure de coordonnées de points, me permet naturellement de m'intégrer dans différents projets de recherche où ces compétences sont nécessaires, et d'apporter un regard méthodologique sur l'optimisation des techniques de mesures ou le développement de nouvelles techniques. Cela me permet également d'être confronté aux problématiques pratiques et actuelles des professionnels, lors du suivi des travaux de fin d'études des étudiants. Avec parfois à la clef de nouveaux domaines d'application de mes travaux, ou la possibilité pour moi d'exploiter pour mes travaux de nouvelles méthodes et techniques.

La thèse de Thomas Durand-Texte, sur la mesure de vibrations acoustiques par vision 3D, est une parfaite illustration des bénéfices réciproques pouvant être tirés de collaborations avec d'autres domaines de recherche. Ce projet a pour origine ma rencontre avec Charles Pezerat, professeur au LAUM⁹ qui recherchait une méthode de mesure plein champs et non destructive de champs vibratoires, avec pour applications potentielles le monde industriel et automobile. Les techniques de photogrammétrie et de vision 3D par ordinateur, qui font partie des compétences du G_εF, m'ont

9. Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

semblé pouvoir s'appliquer à ce type de problématique. Une première étude de faisabilité a été réalisée par E. Simonetto et C. Pezerat en 2010 (cf. [Simonetto et al. 2010]), montrant la faisabilité d'une mesure de déplacement sub-millimétrique sur une plaque par simulations. Dans le cadre d'un partenariat entre le LAUM, le CCTM et le GεF, plusieurs travaux en 2012 et 2013, que j'ai co-encadré, et particulièrement le TFE de M. Biggio en 2013, ont permis d'aboutir à un prototype de montage pseudo-stéréoscopique exploitant une seule caméra et un jeu de 4 miroirs, permettant la reconstruction 3D des déformations de la plaque. Dès le début de ce projet, mes connaissances et mon expérience sur l'instrumentation topographique de précision, nécessaires pour le positionnement et le contrôle d'orientation des différents éléments du montage pseudo-stéréoscopique, et ma capacité à trouver des solutions techniques aux problèmes posés (utilisation d'une seule caméra rapide pour éliminer les problèmes de synchronisation) ont été pleinement exploités. Les résultats de ces travaux nous ont conduit à proposer avec succès en 2015 le projet Photomevib pour Photogrammétrie ultra-rapide pour la vibroacoustique, lors de l'appel à propositions le Mans Acoustique (AAP LMAc) 2015 "pari scientifique" financé par la Région des Pays de Loire, dans lequel s'inscrit la thèse de Thomas, démarrée en octobre 2015.

Cette thèse, dont la soutenance aura lieu le 11 janvier 2019, se situe à l'interface entre différentes disciplines : vibro-acoustique, vision 3D, photogrammétrie, métrologie. Ses objectifs étaient d'étudier l'intérêt et les limites d'utilisation des méthodes de vision 3D, couplées à une caméra ultra rapide, pour la mesure 3D de champs vibratoires, plein champs et sans contact, pour des applications en vibro-acoustique, et de proposer une chaîne d'acquisition adaptée. Nous avons poursuivi nos travaux sur les montages pseudo-stéréoscopiques avec miroirs pour aboutir à la conception de trois méthodes de mesure de vibration plein champs (4 miroirs, 2 miroirs, sans miroir) et d'une technique de traitement d'image adaptée à la mesure de vibration (méthode IRI¹⁰). Ces méthodes ont été testées et validées sur différents objets : plaque 30x30cm en aluminium, haut-parleur, portière de voiture, tambourin.

Aujourd'hui, l'une des idées du GεF, que je développe avec Elisabeth Simonetto spécialiste vision/photogrammétrie au laboratoire et Manuel Melon du LAUM, est d'exploiter les développements réalisés au cours de cette thèse en les appliquant au domaine de la mesure de déformation d'ouvrages, et à la détermination de fréquences propres de vibration de structures élancées, telles que des ponts ou des passerelles. Une première expérimentation est en cours courant janvier 2019 sur une passerelle piétonne au Mans, dans le cadre de projets d'étudiant ESGT, en parallèle de mesures GNSS haute fréquence et tachéométriques, dans le cadre de projets d'étudiants ESGT.

Encadrement doctoral et post-doctoral

Pour chaque encadrement sont présentés le sujet, le financement, ma participation à l'encadrement et les publications afférentes.

Thèse de Benoit Legru (2007-2011)

Sujet : Mesure de déformation par combinaison de techniques géodésiques : auscultation par GPS et topométrie.

10. Méthode Itérative de Rectification d'Images

Thèse de doctorat en géophysique, discipline géodésie. Ecole doctorale Arts et Métiers. Thèse soutenue le 23 mai 2011 à l'ESGT.

Financement : Allocation de l'école doctorale Arts et Métiers du Cnam
Directeur de thèse : Laurent Polidori
Co-encadrant : Stéphane Durand (70%)
Publications : Legru et al. 2009, Durand et al. 2007, Durand et al. 2007b, Durand et al. 2007c

Thèse de Paulo Sergio de Oliveira (2014- 2017)

Sujet : Définition et mise en oeuvre d'un nouveau service de positionnement précis par GNSS.

Thèse de doctorat en géophysique, discipline géodésie. Ecole doctorale SPIGA. Thèse soutenue le 5 septembre 2017 à l'Université du Maine.

Thèse en co-tutelle avec l'Université de l'état de Sao Paulo (UNESP)

Financement : dispositif CIFRE Brésil et Société Géodata Diffusion (Groupe Hexagon)
Directeur de thèse : Laurent Morel
Co-encadrement : Stéphane Durand (25%)
François Fund (société Geodata-diffusion)
João Francisco Galera Mônico (UNESP, Brésil)
Frédéric Durand
Publications : de Oliveira et al. 2017, Morel et al. 2015, de Oliveira et al. 2016, Morel et al. 2015b, de Oliveira et al. 2015a, de Oliveira et al. 2015b, de Oliveira et al. 2014

Thèse de Thomas Durand-Texte (2015- 2018)

Sujet : Mesure de déformations vibratoires par vision 3D

Thèse de doctorat en acoustique. Ecole doctorale SPIGA. Thèse soutenue le 11 janvier 2019 à le Mans Université

Thèse en partenariat entre le G ϵ F, le LAUM et le CTTM (Centre de Transfert de Technologies du Maine)

Financement : bourse Région Pays de Loire (projet Le Mans Acoustique)
Directeur de thèse : Manuel Melon (LAUM)
Co-encadrement : Elisabeth Simonetto (G ϵ F)
Stéphane Durand (20%)
Marie Hélène Moulet (CTTM)
Pascal Picart (LAUM)
Publications : Durand-Texte et al. 2019, Durand-Texte et al. 2018a, Durand-Texte et al. 2018b, Durand-texte et al., 2017, Durand-Texte et al. 2016

Thèse de Abdeljalil Nahli (2018-)

Sujet : Exploitation combinée des techniques GNSS et PSinSAR pour la surveillance d'ouvrages d'art

Thèse de doctorat en géomatique. Ecole doctorale SPI. Thèse débutée en avril 2018

Thèse CIFRE entre l'entreprise Cementys et le GεF

Financement : contrat CIFRE entre ANRT et société Cementys
Directeur de thèse : Laurent Morel (GεF)
Co-direction : Stéphane Durand (40%)
Co-encadrement : Elisabeth Simonetto (GεF)
Maxime Tatin (Cementys)
Vincent Lamour (Cementys)
Publications : Nahli et al, 2019 (soumis)

Post-doctorat Mathilde Vergnolle (04/2005-02/2006)

Sujet : Etude des effets 3D de la surcharge océanique sur les côtes bretonnes et du Cotentin : apport de données de GPS semi-permanents.

Post-doctorat en géophysique/géodésie

Financement : Région Pays de Loire
encadrant principal : Joëlle Nicolas
Co-encadrement : Stéphane Durand (15%)
Laurent Morel
Publications : Vergnolle et al. 2008 ; Melachroinos et al. 2007 ; Nicolas et al. 2009 ; Nicolas et al. 2009 ; Morel et al. 2008 ; Vergnolle et al. 2007. Vergnolle et al. 2006 ; Vergnolle et al. 2005

Thèse de doctorat de François Fund (2007-2009)

Sujet : Observations GPS et retards troposphériques : modélisations et application aux effets de surcharge océanique dans l'Ouest de la France.

Thèse de Doctorat en géophysique, discipline géodésie. Ecole Doctorale SPIGA. Soutenue le 18 décembre 2009.

Financement : Région Pays de Loire et Ordre des Géomètres Experts
Encadrants principaux : Antoine Moquet (LPGN) et Laurent Morel (L2G)
Publications : Fund et al. 2010, Fund et al. 2011

Participation au suivi et à l'orientation de la thèse au cours de trois années au sein de l'équipe L2G du laboratoire.

Encadrement scientifique niveau Master 2

Ces travaux correspondent soit à des travaux de fin d'études d'ingénieurs, soit à des travaux d'étudiants en Master 2 recherche. Leurs sujets sont parfois directement liés à des activités de recherche, mais peuvent également se situer à l'interface entre le monde professionnel et la recherche. D'une durée comprise entre 3 et 6 mois, ces travaux donnent toujours lieu à un rapport écrit et une soutenance orale, et parfois à une publication dans une revue professionnelle ou scientifique.

Le plus souvent financés sur des crédits recherche, ces travaux nécessitent un encadrement proche de celui d'une thèse, mais sur une durée plus courte, ce qui implique un suivi plus rapproché.

Pour chacun, je précise le sujet, ma part d'encadrement, les collaborations externes ainsi que le financement. Je précise également d'éventuelles publications afférentes.

- Zian Favaro, Etude de l'influence des gradients de température sur un réseau d'auscultation, Travail de Fin d'Etudes ESGT. Encadrement (50%). Collaboration Cemetyx et Géosciences Rennes. Financement Cemetyx/GεF sur contrat. 2019
- Bergès Damien. Analyse spatio-temporelle de la vapeur d'eau dans la troposphère par GNSS par tomographie.. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (20%). Financement GεF/ Renag. 2019.
- Gobron Kevin, Mise en place d'un système de mesure de déformation sur le site hydrogéologique de Guidel, Travail de Fin d'Etudes ENSG/ESGT. Encadrement (50%). Collaboration Géosciences Rennes. Financement GεF. 2017
- Bienvenu Pierre, Mise en place et qualification d'une chaîne de mesure GNSS pour l'étude du comportement dynamique des structures élancées, Travail de Fin d'Etudes ESGT. Encadrement (50%). Collaboration Cemetyx. Financement Cemetyx. 2017
- Longechamp Raphaël. Optimisation, validation du logiciel TSAAR et densification du réseau pour l'étude de la troposphère par tomographie. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (25%). Financement GεF. 2017.
- Alliez-Dron Sébastien, Etude expérimentale de l'apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques, Travail de Fin d'Etudes ESGT. Encadrement (100%). Financement GεF. 2016
- Bucher, Mailys. Combinaison des mesures GNSS et topométriques dans un réseau d'auscultation. Travail de Fin d'Etudes ESGT. Encadrement (100%). Financement GεF. 2015
- Assemat Julien. Projet de fin d'études INSA Strasbourg. Co-encadrement (50%). Collaboration Géosciences Rennes. Financement Equipex Critex, Geosciences Rennes. 2015.
- Le Coz, Olivier. Tomographie de la troposphère au Mans. Mise en oeuvre et premières analyses. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (25%). Financement GεF. 2015.
- Burdack, Jordan. Combinaison des techniques PSInSAR et GNSS par cumul des équations normales. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (50%). Financement GεF. 2013. Publication : Simonetto et al. 2014
- Biggio, Matthieu. Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur. Travail de Fin d'Etudes ESGT. Co-encadrement (50%). Collaboration LAUM. Financement LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine). 2013

- Trives, Julie. Comparaison de l'instrumentation par capteurs à corde vibrante avec des solutions topographiques pour le suivi des déplacements et des déformations d'un bassin sensible d'un Arsenal militaire (confidentiel). Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (50%). Collaboration Cementys. Financement Cementys. 2013
- Messenge Jean-Charles. Le pointé automatique sur cible depuis les caméras des stations totales. Travail de fin d'études ESGT. Collaboration et financement Cabinet Lallouet-Debrock. Co-encadrement (70%). 2012
- Azzini, Angélique. Apport de la combinaison de mesures GNSS et topométriques dans un réseau d'auscultation. Travail de fin d'études ESGT. Encadrement (100%). Financement ESGT. 2010. Publication : Azzini et al. 2010
- Guérin, Clément. Comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques. Financement ESGT. Encadrement (100%), 2010. Publication : Durand et al. 2012
- Doré, Jean-François. Mise en place d'un réseau d'auscultation sur l'observatoire hydrologique du site de Ploemeur. Collaboration Géosciences Rennes. Co-encadrement (50%). Financement ESGT 2009
- Kokoch, Omar. Elaboration d'une grille de conversion altimétrique pour Le Mans Métropole. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (50%). Financement ESGT. 2007.
- Ouaknine, Jean-Christophe. Développement d'un logiciel de traitement de données GNSS en réseau. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (50%). Financement ESGT. 2007.
- Legru, Benoit, Test des capacités PPP du logiciel Bernese 5.0, Master 2 recherche de l'Observatoire de Paris. Encadrement (100%). Financement ESGT. 2007
- Kamali, Omid, Développement d'un logiciel de traitement de données GPS dans le cadre des réseaux GNSS temps réel, Master 2 Sciences de l'information géographique, Université Marne la Vallée. Co-encadrement (50%). Financement ESGT. 2006
- Chalaye, L. Utilisation du GPRS pour le RTK. Travail de fin d'études ESGT. Co-encadrement (50%). Financement ESGT. 2004. Publication : Chalaye, L. Utilisation du GPRS pour le RTK. Revue XYZ de l'AFT, n°102. 2004.

Participation à un jury de thèse de doctorat

Thomas Touzé

Sujet : Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC : des réseaux de géodésie au pré-alignement actif

Thèse de doctorat en sciences, Université Paris-Est, 2011

Directeur de thèse : Michel Kasser. Examineur : Stéphane Durand

Relecture d'articles scientifiques

- Relecture régulière d'articles pour la revue française XYZ éditée par l'Association Française de Topographie (AFT)
- 1 relecture d'article pour la revue « Compte rendu de l'Académie des Sciences » en 2007
- 1 relecture d'article pour la revue Journal of Geodesy en 2009

Encadrement scientifique de Master 1

Ces travaux correspondent soit à des stages obligatoires dans le cadre de la formation d'ingénieur ESGT, soit à des activités complémentaires de recherche menées par des étudiants ingénieurs.

Encadrement de stages obligatoires niveau Master 1

Pour chaque encadrement, je précise la thématique générale du travail, la durée du stage et le cas échéant, les publications associées.

- 2009 : Guérin C. (4 semaines), Combinaison d'une station totale et d'un niveau numérique pour l'auscultation
- 2009 : Thomas E. (4 semaines), caractérisation des erreurs de pointé automatique d'une station totale
- 2006 : Emard B., Duchatel B. (8 semaines), Seconde campagne de mesure de la déformation en surface liée à l'activité volcanique (Islande)

Publication : [Cravoisier et al. 2006]

- 2005 : Pitiot S., Dejhonge P. (8 semaines), Premières mesures de la déformation en surface liée à l'activité volcanique (Islande)

Publication : [Durand et al. 2005]

Encadrement d'ARB

Depuis l'année scolaire 2014-2015, l'ESGT propose aux étudiants en seconde année du cycle ingénieur (Master 1) de participer aux travaux de recherche du laboratoire sous le statut d'assistant de recherche bénévole. Il s'agit pour l'étudiant de réaliser de manière encadrée une étude en lien avec les activités du laboratoire, d'une durée de 100 heures environ, réparties sur l'année. Le travail est conclu par le rendu d'un rapport et une courte soutenance orale. Ce type d'encadrement, bien que dilué dans l'année, possède de nombreux avantages pour l'enseignant-chercheur car il permet :

- de sensibiliser les étudiants à l'activité de recherche du laboratoire,

- de diffuser des connaissances scientifiques autrement que par des cours classiques
- d'ébaucher certains sujets de recherche nécessitant du personnel et du temps.

Depuis la création de ce statut d'ARB, j'ai encadré les étudiants et sujets suivants :

- 2016-2017 : Baumer T., Rénovation du réseau GNSS sur la ville du Mans pour l'étude de la troposphère par tomographie 3D
- 2016-2017 : Roussel-Galle S., Rénovation du réseau GNSS sur la ville du Mans pour l'étude de la troposphère par tomographie 3D
- 2014-2015 : Girardot B., Comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques
- 2014-2015, Guyet G. : Etude de l'erreur de pointé automatique d'une station totale

Accompagnement de Master 2 (« enseignant référent »)

La formation d'ingénieur ESGT se conclut par un stage de fin d'études de 20 semaines minimum réalisé en général au second semestre de la dernière année. Pour chaque stage, un enseignant référent est choisi au sein de l'école. Son rôle est d'assurer le suivi du stage et de faire la liaison, administrativement mais surtout scientifiquement entre l'entreprise d'accueil, l'étudiant et les exigences de contenu du diplôme d'ingénieur. Le suivi est réalisé par des contacts réguliers avec l'entreprise d'accueil et l'étudiant, mais également la validation au nom de l'école d'un pré-rapport de soutenance.

Le rôle d'enseignant référent permet de tisser des liens forts avec le monde professionnel et de partager son expertise. Au moment de la proposition d'un sujet, il peut aiguiller l'entreprise sur l'orientation à donner au stage. Lors de la réalisation du stage, il peut apporter son expertise et conseiller l'entreprise et l'étudiant sur les choix scientifiques et techniques à faire. Depuis 2004, j'ai encadré en moyenne 3 à 4 étudiants par an, et mon rôle d'enseignant référent a, dans certains cas, permis la poursuite de collaborations avec l'entreprise d'accueil :

- 2018 : Le Gal A., Gomez C., Kocher L., Marteau B., Oubah H., Sokeng L.
- 2017 : Peytier D.
- 2016 : Beuvain A., Santelli C.
- 2015 : Chabert A., Favre C., Perrier E.
- 2014 : Charrière A., De Graeve G., De Marion V.
- 2013 : Biggio M., El Hamri Y., Ndjamba Njita A.
- 2012 : Chanel C., Hervé F., Galpin M.
- 2011 : Lavaux A.-L., Lavier Q., Herbin T., Tréfond V.
- 2010 : Desoeuvre D., Munich F., Dour M., Nallet T., Ardier A.
- 2009 : Vial A., Bougeard F., Le Roux J., Malaquin N.
- 2008 : Adeline C., Rayer M., Vincenti M.

- 2007 : Barakat A., Duchatel B., Maurisset A., Pinel L., Saroufim B.
- 2006 : Fund F., Emain G., Hanna T.
- 2005 : Barada B., Franck J., Berthelomeau J., Boerez J., Dugast S.
- 2004 : Adriansen L., Chadeaux N., Chalaye L., Courbin J., Tirtaine T.

Encadrements de projets d'étudiants

Lors de la dernière année du cursus ingénieur ESGT, les étudiants réalisent un travail de recherche préparatoire à leur stage de fin d'études. Réalisé par équipes de trois ou quatre étudiants, ce travail permet souvent d'ébaucher de nouveaux sujets au sein du laboratoire, ou de compléter des travaux nécessitant des personnes qualifiées sur une courte durée. Le nombre de sujets proposés étant généralement plus important que nécessaire, ce sont des étudiants intéressés et motivés qui se portent candidats sur les différents sujets. Le travail demandé aux étudiants, en terme de contenu, se rapproche de celui demandé lors d'un stage de fin d'études, mais réalisé en groupe et sur une durée plus courte. En terme d'encadrement, il s'agit d'initier les étudiants à la recherche scientifique, en ayant à la fois un rôle de commanditaire, avec des exigences de résultats scientifiques et techniques et le rôle d'enseignant, pouvant conseiller sur la méthode de travail et les choix scientifiques et techniques à réaliser.

Depuis 2004, j'encadre en moyenne 1 à 2 projets d'étudiants de ce type, ayant un lien avec mes activités d'enseignement, de recherche ou les deux à la fois :

- 2018 : Mesure de vibration d'une passerelle par vidéogrammétrie
- 2018 : Développement d'un système d'auscultation GNSS bas coût
- 2017 : Développement d'une chaîne d'acquisition automatisée de mesures tachéométriques
- 2017 : Evaluation d'une solution dynamique GNSS bas coût pour la mesure statique et dynamique des déformations d'ouvrage d'art
- 2017 : Réhabilitation du matériel topographique de l'association Topo Sans Frontières
- 2017 : Outil web de gestion des demandes de travaux topographiques et fonciers pour le Mans Métropole
- 2016 : Développement et validation d'un niveau motorisé
- 2016 : Mise en production du logiciel CoMeT
- 2015 : Développement d'un système automatisé de mesure de la déviation de la verticale
- 2015 : Mesure précise du réseau de métrologie de l'ESGT
- 2014 : Redéfinition du réseau de points de Le Mans Métropole
- 2014 : Réseau dense GNSS au Mans pour le suivi météorologique temps réel

- 2014 : Utilisation des Bcam pour la mesure de déformation
- 2013 : Système automatisé d'évaluation des performances du réseau Teria
- 2013 : Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur
- 2013 : Guide pratique d'utilisation du PPP pour la topographie en France
- 2012 : Campagnes GNSS de mesures sismologiques dans le Grand Ouest
- 2012 : Visées indirectes de points avec une station totale
- 2011 : trajectographie par GPS PPP
- 2010 : Interface web pour le logiciel CoMeT
- 2009 : Comparaison entre RTK classique et RTK réseau
- 2008 : Comparaison de logiciels d'ajustement - Validation du logiciel CoMeT de l'ESGT
- 2006 : Développement d'un prototype de station combinée tachéomètre/GNSS : précision et méthodes d'utilisation
- 2006 : Validation et calibration des antennes compactes du parc GPS INSU (Crespon et al. 2006)
- 2005 : Etude de la déformation de l'antenne GPS permanente de l'ESGT
- 2005 : Préparation d'une campagne de mesures topométrique en Islande
- 2004 : Evolution du logiciel GG pour l'exploitation des observations aux tachéomètres numériques

Organisation de séminaires ou colloques de recherche

- Co-organisation du colloque G2 (Géodésie et Géophysique) à l'ESGT, 2004
- Organisation locale du colloque du CNFGG en novembre 2010

Financement de la recherche / Contrats de recherche

- Contrat de collaboration de recherche Cnam/Cern portant sur le développement et la validation de méthodes d'alignement dans le cadre du projet HI-LHC (150k€ 2015-2018)
- Contrat de collaboration de recherche Cnam/Cern portant sur le développement et la validation de méthodes d'alignement dans le cadre du projet CLIC (175k€ 2014-2018)
- Co-proposant, avec Eric Beucler (LGP Nantes) de l'Appel d'Offre Interne 2017 de l'OSUNA intitulé "Caractérisation d'un réservoir hydrologique par mesures géodésiques et sismologiques". Financement obtenu : 10 k€.
- Responsable administratif, technique et scientifique pour le marché DGA 2017-2021 portant sur la vérification de récepteurs GNSS obtenu par le consortium G_εF/ LNE (environ 26k€ sur

4 ans)

- Différents contrats de licence du logiciel CoMeT depuis 2017, sur une ou plusieurs années : AFPA Meaux, Cementys, Gexpertise, SNCF Réseau, EDF Réseau (environ 5k€ actuellement)
- Réalisation de vérifications du bon fonctionnement de récepteurs GNSS dans le cadre d'un marché de la DGA (Direction Générale de l'Armement) obtenu sur la période 2014-2016 par le LNE, et pour lequel l'ESGT est prestataire.
- Obtention d'un financement Bonus Qualité Recherche du CNAM en 2009 sur la thématique : « Développement d'un système d'auscultation par fusion de données géodésiques multi-techniques : Application au site de Ploemeur (ORE Hydro) » (9k€ en 2009)

Participation à des projets de recherche et collaborations

Projet Tosca GNSS-INSAR

Projet pour l'étude de la combinaison des techniques GNSS et INSAR.

Proposant : Laurent Polidori / Joëlle Nicolas-Duroy / Elisabeth Simonetto

Période : 2014 à 2018

Financement : CNES

Publications majeures : Polidori, 2013 ; Simonetto, 2014. Simonetto, 2015.

Projets ORE H+ / Equipex Critex / Caspar

Projet sur le couplage géodésie/hydrologie pour l'étude de sites hydrogéologiques.

En charge des aspects organisation, mesure et traitement géodésiques. Adaptation des techniques géodésiques aux différents sites rencontrés.

Période : de 2005 à nos jours

Financements : ORE H+, CRNS (Equipex Critex), CPER Caspar (2007-2013), OSUNA (2017)

Publications majeurs : Schuite et al., 2015, Roques et al, 2015, Roques et al, 2012

Projet Tomuvol

Développement d'un détecteur à muons pour la tomographie des volcans actifs. En charge des problématiques d'orientation et de positionnement du détecteur lors du développement des prototypes de détecteurs.

Proposant : Cristina Carloganu (Laboratoire de Physique Corpusculaire).

Financement : Région Auvergne et CNRS.

Publications majeures : Ambrosio et al, 2015

Evaluation des performances de la méthode NRTK

Campagne de mesures comparative des techniques RTK et NRTK (dans les réseaux Orpheon et TERRIA).

Réalisation des deux campagnes, exploitation des données et diffusion des résultats.

Périodes : été 2008 et été 2009.

Financement : société Géodata Diffusion et ESGT en 2008 ; OGE et ESGT en 2009.

Publications majeures : Morel et al. 2008. Durand et al. 2009.

Etude de la surcharge océanique dans l'Ouest de la France

Campagne de mesures multi-techniques (gravimétrie, SLR, inclinométrie, GNSS) réalisée dans le cadre du GDR-G2 en 2004.

Organisation et réalisation des observations GPS, optimisation du traitement des données, étude de l'impact du logiciel, diffusion des résultats

Période : mars 2004 - octobre 2004.

Financement : GDR-G2 (Géodésie-Géophysique), INSU/CNRS - CNES.

Publications majeures : Llubes et al. 2008 ; Melachroinos et al. 2007 ; Nicolas et al. 2007 ; Vergnolle et al. 2008.

Principales collaborations scientifiques développées

- Réseau National GNSS (RENAG) : membre de ce Service d'Observation au sein de RESIF.
- Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique (OSUNA).
- Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S - Supélec - André Lannes). Collaboration sur le développement de l'approche par les graphes algébriques du problème de positionnement GNSS

Publications majeures : Lannes et al. 2003, Lannes et al. 2010

- Laboratoire de Recherche en Géodésie de l'IGN (Marie-Noëlle Bouin). Collaboration sur l'étude de la surcharge océanique dans l'Ouest de la France. Observations en 2004 puis traitements et diffusion jusqu'en 2008.

Publications majeures : Vergnolle et al. 2008. Melachroinos et al. 2007.

- Centre National d'Etudes Spatiales - Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS) (Richard Biancale, Felix Perosanz). Collaboration pour l'étude de la surcharge océanique dans l'Ouest de la France (2004 - 2008). Membre du Laboratoire GRGS depuis 2005.

Publications majeures : Melachroinos et al. 2007.

- Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand (Joël Van Baelen). Partenariat au sein de RENAG sur la mise en place du projet de tomographie 3D de la troposphère et la mise en place d'un réseau expérimental sur la ville du Mans (depuis 2014).

- Société Geodata Diffusion. Etudes des performantes en mode NRTK du réseau Orphéon (2008). Partenaire CIFRE de la thèse de Paulo Sergio De Oliveira (depuis 2014).

Publications majeures : Morel et al. 2008, Oliveira et al. 2015.

- Laboratoire de Geodesia Espacial (LGE), UNESP, Brésil (João Francisco Galera Mônico). Partenaire de la thèse de Paulo Sergio de Oliveira en co-tutelle avec l'UNESP (depuis 2012)

Publications majeures : Oliveira et al. 2015.

- Géosciences Rennes, équipe Transferts d'eau et de matières dans les milieux hétérogènes complexes (Laurent Longuevergne, Nicolas Lavenant). Collaborations sur le couplage géodésie/hydrologie pour l'étude de sites hydrogéologiques. Etude sur les limites des méthodes topographiques pour la mesure de déformation sur sites hydrogéologiques.

Publications majeures : Moreau et al. 2006, Bour et al. 2007, Roques et al. 2012, Roques et al. 2015

- Laboratoire Magma et Volcans (Philippe Labazuy) et Laboratoire de Physique Corpusculaire (Cristina Carloganu). Collaborations dans le cadre du projet ToMuVol sur les problématiques de positionnement, alignement et mesure de déformation du détecteur.

Publications majeures : Ambrosio et al. 2015

- Institut G2C (Géomatique, Gestion de l'environnement, Construction et surveillance d'ouvrages) de la Heig-VD, Yverdon, Suisse (Paul Henri Cattin, Thomas Touzé). Collaborations en GNSS, comparaison de logiciels d'ajustement et ajustement de mesures depuis 2011 et utilisation de fils tendus depuis 2016.

Publications majeures : Durand et al. 2018a, Durand et al. 2018b, Durand et al. 2019

- Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich- ETHZ (Sébastien Guillaume). Collaboration depuis 2015 sur la comparaison de logiciels d'ajustement.

Publications majeures : Durand et al. 2018a

- Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (Charles Pézerat, Manuel Melon). Collaboration sur l'étude de champs vibratoires par vision 3D depuis 2009.

Publications majeures : Durand-Texte et al. 2019

- Centre de Transfert de Technologies du Maine (Marie-Hélène Moulet). Collaboration sur l'étude de champs vibratoires par vision 3D depuis 2011.

Publications majeures : Durand-Texte et al. 2019

- Groupe des géomètres du CERN (Dominique Missiean, Hélène Mainaud, Mark Jones, Jean-Christophe Gayde). Collaborations diverses depuis 2004 en géodésie, comparaison de logiciels d'ajustement, développement de méthodes d'alignement

Publications majeures : Durand et al. 2018, Jones et al. 2012, Duquenne et al. 2016

Publications scientifiques

Les publications sont classées en suivant la codification des publications préconisée par l'HCERES, de la plus récente à la plus ancienne.

Pour chaque publication, j'ai mis en gras mon nom et souligné le nom d'étudiants (thèse, master) sous mon encadrement lorsque nous avons publié ensemble durant ou après leurs travaux.

Produits et logiciels

[**Durand 2017**] **Durand Stéphane**, *CoMeT : Compensation de Mesures Topographiques*, Logiciel déposé auprès de l'Agence de Protection des Programmes en novembre 2017, IDDN.FR.001.490017.000.R.P.2017.000.31235.

ACL : Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

[**Durand-Texte et al., 201x**] Durand-Texte Thomas, Melon Manuel, Simonetto Elisabeth, **Durand Stéphane**, Moulet Marie-Hélène, *Single-camera single-axis vision method applied to measure vibrations*. Measurement (en préparation)

[**Durand-Texte et al., 2019**] Durand-Texte Thomas, Simonetto Elisabeth, **Durand Stéphane**, Melon Manuel, Moulet Marie-Hélène, *Vibration measurement using a pseudo-stereo system, target tracking and vision methods*, Mech. Syst. Sig. Process, 118C, 30-40 (2019)

[**Walpersdorf et al. 2018**] A. Walpersdorf, L. Pinget, Ph. Vernant, C. Sue, A. Deprez, S. Baize, P. Bascou, S. Baudin, O. Bock, P. Briole, J. Cali, J.P. Cardaliaguet, C. Champollion, O. Charade, J. Chéry, N. Cotte, O. Dauteuil, T. Duquesnoy, **S. Durand**, R. Fages, G. Ferhat, M. Flouzat, B. Garayt, M. Gay, M. Gravelle, M. Guichard, J. Hinderer, F. Jouanne, C. Lallemand, F. Masson, E.R. Mathis, S. Mazzotti, J.L. Menut, F. Moreau, L. Morel, J. Nicolas, J.M. Nocquet, L. Ott, F. Perosanz, T. Person, E. Poirier, A. Rigo, L. Rolland, A. Santamaria-Gomez, S. Saur, O. Scotti, A. Socquet, P. Ulrich, J. Van Baelen, M. Vergnolle, M. Viddal, C. Vigny, T. Villemin, G. Woppelmann, *Does Long-Term GPS in the Western Alps Finally Confirm Earthquake Mechanisms ?*, Tectonics, DOI :10.1029/2018TC005054, 2018

[**Oliveira et al, 2016b**] Oliveira, P.-S., Morel, L., Fund, F., Legros, R., Durand, F., **Durand, S.** *Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK.* GPS solution, 2016.

[**Schuite et al., 2015**] Jonathan Schuite, Laurent Longuevergne, Olivier Bour, Frédérick Boudin, **Stéphane Durand** and Nicolas Lavenant, *Inferring field-scale properties of a fractured aquifer from ground surface deformation during a well test*, Geophysical Research Letters, 2015

[**Ambrosio et al, 2015**] F. Ambrosino, A. Anastasio, A. Bross, S. B, P. Boivin, L. Bonechi, C. Cârloganu, R. Ciaran, L. Cimmino, Ch. Combaret, R. D'Alessandro, **S. Durand**, F. Fehr, V. Français, F. Garu, L. Gailler, Ph. Labazuy, I. Laktineh, J-F Lénat, V. Masone, D. Miallier, L. Mirabito, L. Morel, N. Mori, V. Niess, P. Noli, A. Pla-Dalmau, A. Portal, P. Rubinov, G. Saracino, E. Scarlini, P. Strolin, B. Vulpescu, *Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate Chambers detectors*, Journal of Geophysical Research, 2015

[**Lannes et al, 2010**] A. Lannes, S. Gratton, **S. Durand**, *Pseudo-clock biases for precise point positioning. The algebraic approach*, Journal of Global Positioning Systems, Vol 9, no 1, pp68-77, 2010

[**Vergnolle et al, 2008**] Vergnolle, M., Bouin, M.-N., Morel, L., Masson, F., **Durand, S.**, Nicolas, J., Melachroinos, S. *GPS estimates of ocean tide loading in NW-France : determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model.* Geophysical Journal International. DOI :10.1111/j.1365-246X.2008.03734.x, 2008.

[**Llubes et al, 2008**] Llubes, M., Florsch, N., Boy, J.P., Amalvict, M., Bonnefond, P., Bouin, M.N., **Durand, S.**, Esnault, M.F., Exertier, P., Hinderer, J., Lalancette, M.F., Masson, F., Morel, L., Nicolas, J., Vergnolle, M., Wöppelmann, G., *Multi-technique monitoring of ocean tide loading in northern France*, C.R. Geoscience, Volume 340, pp 379-389, 2008.

[**Melachroinos et al, 2007**] Melachroinos, S., Biancale, R., Llubes, M., Perosanz, F., Lyard, F., Vergnolle, M., Bouin, M.-N., Masson, F., Nicolas, J., Morel, L., **Durand, S.** *Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids : comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France.* Journal of Geodesy, DOI : 10.1007/s00190-007-0185-6, 2007.

[**Lannes and Durand, 2003**] Lannes A., **Durand S.**, *Dual algebraic formulation of differential GPS*, Journal of Geodesy, n°77 pp22-29, DOI 10.1007/s00190-002-0305-2, 2003

ACLN : Articles dans des revues nationales avec comité de lecture

[**Durand 2018**] **Durand Stéphane**, *Génération d'observations pour la validation ou la comparaison de logiciels d'ajustement de mesures par moindres carrés*, Revue XYZ de l'Association Française de Topographie, Revue XYZ de l'Association Française de Topographie, n°157, décembre 2018

[**Teyssendier et al., 2018**] Teyssendier de la Serve, Maylis, Wallerand Jean-Pierre, Guillory Joffray, Truong Daniel, Alexandre Christophe, Cali José, **Durand Stéphane**, *Arpent : un prototype de haute exactitude pour les mesures en grande distance*, Revue XYZ de l'Association Française de Topographie, n°154, 2018

[**Durand-Texte et al., 2017**] Durand-Texte T., Simonetto E., **Durand, S.**, Melon M., Moulet M-H. *Estimation des incertitudes d'une méthode de mesure de déformées vibratoires par vision 3D*, Revue Instrumentation, Mesure, Métrologie (I2M), 1-25, 2017

[**Morel et al, 2014**] Morel, L., Fund, F., Legros, R., **Durand, S.**, Flacelière, B. *PPP, la maturité ?*, Revue XYZ de l'Association Française de Topographie, n°138, 2014.

[**Durand et Guérin, 2012**] **Durand, S.**, Guérin, C., *Validation du logiciel CoMeT d'ajustement de mesures topographiques*, Revue XYZ de l'Association Française de Topographie, n°136, 2012

[**Azzini et Durand, 2010**] A. Azzinni et **S. Durand**, *Auscultation par combinaison de mesures GNSS et topométriques*, Revue Instrumentation Mesure et Métrologie, Vol 10, n°3-4, 2010

[**Durand et Morel, 2009**] **Durand, S.**, Morel, L., *Evaluation ponctuelle des performances du réseau TERIA*. Revue XYZ de l'AFT, n°118, 2009.

[**Morel et al, 2008**] Morel, L., **Durand, S.**, Legros, R., *Comparaison du positionnement temps réel classique RTK et du positionnement GPS temps réel réseau. Mise en oeuvre dans le réseau ORPHEON*, Revue XYZ de l'AFT, n°115, 2008.

ACTI : Communications avec actes dans un congrès international.

[**Nahli et al, 2019**] Nahli A., Simonetto E., Tatin M., **Durand S.**, Morel L. and Lamour V., *Monitoring ground deformation using Sentinel-1 PSInSAR and RTS measurements in the context of the Grand Paris Express project*, Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Ahten, May 2019 (accepté)

[**Durand et al, 2019**] **Durand S.**, Touzé T., Rude V. and Durand-Mainaud H., *Using direct measurements on a basic stretched wire to improve the geometry of a 3D longitudinal network*, Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Ahten, May 2019 (accepté)

[**Durand et al, 2018c**] **Durand S.**, Touzé T., Rude V. and Durand-Mainaud H., *Using a basic stretched builders line to improve the geometry of 3D longitudinal networks*, International Workshop on Accelerator Alignment, Chicago, 8-12 october, 2018

[**Durand et al, 2018b**] *Durand S.*, Touzé T., Jones M., Guillaume S., Cattin P-H, and Morel L., *Evaluation of the compatibility between network adjustment software : CoMeT, LGC and Trinet+*, Hotine Marussi, 2018 June 18-22, Roma, Italy.

[**Durand et al, 2018a**] Durand S., Touzé T., *Using a basic stretched builders line to improve the geometry of 3D longitudinal networks*, Hotine Marussi, 2018 June 18-22, Roma, Italy.

[**Durand-Texte et al, 2018b**] Durand-Texte T., Melon M., Simonetto E., **Durand S.**, and Moulet Marie-Hélène, *3D vision method applied to measure the vibrations of non-flat items with a two-mirror adapter*, 13th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Ancona, Italy, June 2018

[**Durand-Texte et al, 2018a**] Durand-Texte T., Melon M., Simonetto E., **Durand S.**, and Moulet Marie-Hélène, *Vision methods applied to measure the displacement of loudspeaker membranes*, 144th Audio Engineering Society Convention, 2018 May 23-26, Milan, Italy

[**Durand-Texte et al, 2016**] Durand-Texte T., Simonetto E., **Durand S.**, Picart P., Moulet, M.-H., Melon M. *Mesure de déformations vibratoires par vision 3D*, 3e Congrès Français d'Acoustique joint avec le colloque Vibrations, SHocks and NOise du 11 au 15 avril 2016, Le Mans, France

[**Duquenne et al, 2016**] Duquenne M., **Durand S.**, Rude V., Mainaud H., Touzé T. *Use of a stretched inert wire for the precise alignment of the HL-LHC*, Grenoble - ESRF, october, IWAA 2016

[**Simonetto et al, 2015**] Simonetto E., Durand F., Morel L., El Hamri Y., Froger J.L., Nicolas-Duroy J., **Durand S.**, Polidori L. (2015). *Influence of GNSS configuration and map interpolation method on INSAR atmospheric phase assessment*. Fringe, 2015.

[**Simonetto et al, 2014**] Simonetto, E., **Durand, S.**, Burdack, J., Polidori, L., Morel, L., Nicolas-Duroy, J. *Combination of INSAR and GNSS measurements for ground displacement monitoring*. Proc. SARWatch, Troia (Portugal), Procedia Technology, Special Issue, Elsevier, volume 16, 2014, pp. 192-198, 2014.

[**Polidori et al, 2013**] Polidori, L., Bacci, P.A., Simonetto, E., Morel, L., Durand, F., **Durand, S.**, Nicolas, J. *On the potential of GPS-SAR combination to improve the accuracy of ground deformation monitoring : simulation-based evaluation*. Proc. SBSR, Foz do Iguacu (Brésil), 2013.

[**Jones et al, 2012**] M. Jones, D. Missiaen, M. Crespi, G. Colosimo, A. Mazzoni, **S. Durand** *The distance from CERN to LNGS*, International Conference on Accelerator Alignment (IWAA), 10-14 september 2012 6 pages, 2012

[**Nicolas et al, 2009**] Nicolas-Duroy J., **Durand, S.**, Vergnolle, M., Morel, L., Melachroinos, S., Bouin, M.-N., Fund, F. *Ocean Loading in Brittany, Northwest France : Impact of the GPS analysis strategy*, Hotine-Marussi Symposium 2009 on Theoretical Geodesy, 6-10 July 2009, University "La Sapienza", Rome, Italy, 2009.

[**Nicolas et al, 2008**] Nicolas J., **S. Durand**, S. Cravoisier, L. Geoffroy, and C. Dorbath, *First results of the 2005 seismology - geodesy monitoring campaign for volcanic crustal deformation in the Reykjanes Peninsula, Iceland*, Proceedings of the VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical

and Computational Geodesy, Wuhan, China, 2006, IAG Symposia, vol. 132, pp. 73-78, 2008

ACTN : Communications avec actes dans un congrès national.

[**Durand-Texte et al, 2016**] Durand-Texte T., Simonetto E., **Durand S.**, Picart P., Moulet M-H, Melon M., *Mesure de déformations vibratoires par vision 3D*. 13ème Congrès Français d'Acoustique, 11-15 avril, Le Mans 2016.

OS : Ouvrages scientifiques.

[**Durand et Peyret, 2004**] **Durand S.** et Peyret F., *Localisation précise en temps réel par mesures de phases des signaux GNSS*, Collection Études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. Sciences pour le génie civil, 320 p, ISSN 1167-4865, 2004.

COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national.

[**Simonetto et al, 2015b**] E. Simonetto, **S. Durand**, J. Burdack, L. Morel, L. Polidori, J. Nicolas-Duroy, *Least Quares Combination of Insar and GNSS measurements for ground displacement monitoring*, Multitemp 2015, 22-24 July 2015, Annecy, France

[**Morel et al, 2015a**] Morel, L., Pottiaux, E., Durand, F., Fund, F., Boniface, K., Van Baelen, J., Follin J.-M., **Durand, S.**, Oliveira, P.-S., *Global validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS*. Workshop COST Action. Thessalonique, 2015.

[**Roques et al, 2015**] C. Roques, O. Bour, L. Aquilina , B. Dewandel, JM. Schroette, H. Pauwels, JC. Marechal, L. Longuevergne, T. Le Borgne, T. Labasque, V. Vergnaud-Ayraud, S. Leray, R. Hochreutener, N. Lavenant, B. Mougin, C. Camerlynck and **S. Durand**, *The role of fault-zones on groundwater flow in crystalline basement*, 20th Technical Days of the International Association of Hydrogeologists, French Chapter, La Roche sur Yon, 11-13 june 2015

[**Roques et al, 2012**] Roques C., Aquilina L, Bour O, Longuevergne L, Dewandel B., Schroetter JM., Le Borgne T., Labasque T., Lavenant N., Hochreutener R., **Durand S.**, Ferre G. ,Dauteuil O., Vergnaud V., Mougin B., Palvadeau E., Lucassou F., *Hydrodynamic and geochemical characterization of deep hard rock aquifer (Saint-Brice en Coglès, French Brittany)*, International Conference on Groundwater in fractured rocks, prague, 21-24 may 2012.

[**Durand and Morel, 2008**] **Durand, S.**, Morel, L., *RTK versus Network RTK positioning in France : results from TERIA and Orpheon's real time networks*, VII International Engineering Geomatic Applications Workshop, November 25-28, Madrid, 2008.

[**Bour et al. 2007**] Bour Olivier, T. Jacob, Frédéric Boudin, Frédérique Moreau, R. Bayer, M. Maia, Jean-Pierre Caudal, Philippe Davy, **S. Durand**, Olivier Dauteuil, Pierre Gavrilenko, *A field experiment to monitor the gravimetric and geodetic changes during large-scale pumping test in a crystalline aquifer*, European Geosciences Union, Vienna, April, 2007

[**Durand et al, 2007**] **Durand, S.**, Legru, B., Morel, L., *PPP with Bernese 5.0 software : cases studies on short and long session duration*, VI International Engineering Geomatic Applications Workshop, November 27-30, Madrid, 2007

[**Morel and Durand, 2007**] Morel, L., **Durand, S.**, *Comparison between RTK and Network RTK solutions in the French Orpheon's real time network*, VI International Engineering Geomatic Applications Workshop, November 27-30, Madrid, 2007.

[**Crespon et al, 2006**] Crespon F., Garcia R., **Durand S.**, *Aliasing and high frequency noise in GPS data : a warning for current GPS applications and specifications of future GNSS systems*, European Geosciences Union, Vienna, Austria, 02-07 April, EGU06-A-07817 ; G5-1TU3O-004, 2006

[**Durand and Morel, 2006**] **Durand Stéphane**, Morel Laurent, *Estudio del fenomeno de sobrecarga oceanica en Bretana por GPS*, V Jornadas GPS - International GNSS applications workshop, Pamplona, Spain, 3-6 october, 2006

[**Morel and Durand, 2006**] Morel Laurent, **Durand Stéphane**, *Impacto de los programas de tratamiento GPS sobre los resultados geodinamicos : aplicacion al estudio de la carga oceanica en Bretana*, V Jornadas GPS - International GNSS applications workshop, Pamplona, Spain., 3-6 october, 2006

[**Moreau et al. 2006**] F Moreau, O Bour, F Boudin, **S Durand**, R Bayer, JP Caudal, O Dauteuil, P Davy, MF Esnault, A Ferrand, M Gaboriau, P Gavrilenko, T Jacob, L Morel, Mairie de Ploemeur, *Résultats préliminaires de l'expérience hydrogéologie-géodésie à Ploemeur : Déformation du sol*, Colloque du GDR-G2, La Rochelle, 22-24 novembre 2006

[**Vergnolle et al, 2006**] Vergnolle, M., Bouin, M.-N., Melachroinos, S., Morel, L., **Durand, S.**, Nicolas, J., Masson, F., *GPS multisoftware analysis applied to 3D ocean loading effects in NW France*, Journées Luxembourgeoises de la Géodynamique, JLG93, 2006.

[**Durand et al, 2005**] **Durand S.**, Nicolas J., Cravoisier S., *Crustal deformation monitoring of active volcanic rift segments in the Reykjanes Peninsula, Iceland*, AGU Fall Meeting, San Francisco, 5-9 december, Oral - Session G52A-01, 2005

[**Vergnolle et al, 2005**] Vergnolle, M., Morel, L., **Durand, S.**, Nicolas, J., Bouin, M.-N., Masson, F., *Comparaison des stratégies de traitement GPS pour la campagne de surcharge 2004*, Colloque GDR Géodésie Géophysique, Montpellier, 16-18 novembre, 2005.

[**Bouin et al. 2005**] Bouin M.-N., Llubes M., Florsch N., Amalvict M., Boy J.-P., **Durand S.**, Esnault M.-F., Masson F., Morel L., and Nicolas J., *First results of a multitechnique campaign for stu-*

dying ocean loading effects in Brittany, France, IAG/IAPSO/IABO Joint Assembly, Dynamic Planet, Cairns Australia, Aug. 22-26 2005

[**Durand et al. 2004a**] **Durand S.**, Nicolas J., *Influence des options de calcul dans le traitement GPS de la campagne surcharge océanique 2004*, Colloque GDR Géodésie Géophysique, Le Mans, 17-19 novembre 2004.

[**Durand et al. 2004b**] **Durand S.**, Nicolas J., Morel L., Llubes M., Masson F., *Résultats GPS de la campagne d'étude de la charge océanique en Bretagne-Cotentin sur la période de mars à juin 2004*, GDR Géodésie Géophysique, Le Mans, 17-19 novembre 2004

[**Durand et al. 2004c**] **Durand S.**, Nicolas J., Morel L., *Analysis of the GPS time series from the 2004 Ocean Loading Campaign in Brittany*, 92th Journées Luxembourgeoises de Géodynamique (JLG), November 8-10, luxembourg, 2004

AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national.

[**Oliveira et al, 2017b**] de Oliveira P., Monico J., Morel L., Fund F., **Durand S.**, and Durand F., *Generation of Unbiased Ionospheric Corrections in Brazilian Region for GNSS positioning based on SSR concept*, AGU fall meeting, New Orleans 11-15 dec 2017

[**Oliveira et al, 2016b**] de Oliveira P., Fund F., Morel L., Monico J., **Durand S.**, and Durand F., *Assessment of ionospheric and tropospheric corrections for PPP-RTK*, EGU General Assembly, Vienna 17-22 april 2016

[**Morel et al, 2015b**] Morel, L., Pottiaux, E., Durand, F., Fund, F., Boniface, K., Van Baelen, J., Follin J.-M., **Durand, S.**, Oliveira, P.-S., *Global validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS*. IUGG 2015. Prague, 2015.

[**Oliveira et al, 2015a**] Oliveira P.S., Fund, F., Morel, L., Legros, R., Monico, J.-F.-G., **Durand, S.**, Durand, F., *Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP*. Workshop COST Action. Thessalonique, 2015.

[**Oliveira et al, 2015b**] Oliveira P.S., Fund, F., Morel, L., Legros, R., Monico, J.-F.-G., **Durand, S.**, Durand, F., *Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP*. IUGG 2015. Prague, 2015

[**Morel et al, 2015**] Morel, L., Le Coz O., Durand, F., **Durand, S.**, Van Baelen, J., *Tomography network for experimental study*. Workshop COST Action, Thessalonique, 2015

[**Oliveira et al, 2014**] Oliveira P.S., Fund, F., Morel, L., Legros, R., Monico, J.-F.-G., **Durand, S.**, Durand, F., *Modeling tropospheric ZWD for real-time PPP*. COST Action Summer School, 2014

[**Legru et al., 2009**] Legru B, **Durand S**, Polidori L, Simonetto E, Morel L, Nicolas-Duroy J, *GPS and Topometry measurement fusion for small amplitude deformation study*, VII Hotine-Marussi Symposium, July 6-10, Rome, 2009.

[**Chenel et al, 2009**] Chenel, F., Le Bliguet, G., Soubret, T., Rigo, A., Vernant, P., Perosanz, F., **Durand, S.**, Fund, F., Morel, L., and Nicolas, J., *Quantifying the present-day deformation of the Pyrenees with GPS measurements : combination of multi strategies and processing softwares*, IAG 2009 Scientific Assembly "Geodesy for Planet Earth", poster PS3-We28(137), Buenos Aires, Argentina, August 31 - September 4, 2009

[**Chenel et al, 2009**] Chenel, F., Le Bliguet, G., Soubret, T., Rigo, A., Vernant, P., Perosanz, F., **Durand, S.**, Morel, L., Nicolas, J., *First results of the 2008 RESPYR GPS campaign in the Pyrenees*, poster EGU2009-4535, Session G4, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19? 24 April, 2009

[**Nicolas et al, 2009**] Nicolas-Duroy J., **Durand, S.**, Vergnolle, M., Morel, L., Melachroinos, S., Bouin, M.-N., Fund, F., *Ocean Loading in Brittany, Northwest France : Impact of the GPS analysis strategy*, Hotine-Marussi Symposium 2009 on Theoretical Geodesy, 6?10 July 2009, University "La Sapienza", Rome, Italy, poster, 2009

[**Morel et al, 2008**] Morel L., **Durand S.**, Nicolas J., Fund F., and Vergnolle M., *Effect of different processing strategies with GPS PPP kinematic solutions on Ocean Loading studies*, poster P478, 37th COSPAR Scientific Assembly, 13-20 July 2008, Montreal. Canada, 2008

[**Vergnolle et al, 2007**] Vergnolle, M., Bouin, M.-N. Nicolas, J., Morel, L., Masson, F., **Durand, S.**, Melachroinos, S., *GPS estimates of ocean tide loading in NW-France and comparison with a recent ocean tide model*, GS003, abstract 3810, IUGG XXIV, Perugia, Italy, July 2-13, 2007

[**Durand et al, 2007a**] **Durand S.**, Morel, L., Legru, B., Nicolas, J., *Comparison between Bernese 5.0 and Gipsy/Oasis II PPP solutions : Case study on ocean loading in Brittany, Northwest France*, GS003, abstract 3792, IUGG XXIV, Perugia, Italy, July 2-13, 2007

[**Durand et al, 2007b**] **Durand, S.**, Morel, L., Legru, B., Nicolas, J., *Evaluation of the Bernese 5.0 PPP Solutions : Cases Studies on Short and Long $\overline{\text{Session Duration}}$* , International Union of Geodesy and Geophysics, Perugia, Italy, 2-13 July, 2007

[**Fund et al, 2007a**] Fund F., Morel L., Mocquet A., Nicolas J., and **Durand S.**, *Impact of a GPS network location on tropospheric and positioning estimates*, Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Cité de l'Espace, Toulouse, 2007

[**Fund et al, 2007b**] Fund F., Morel L., Mocquet A., Nicolas J., and **Durand S.**, *Impact of a GPS network location on tropospheric and positioning estimates*, GS004, Abstract 3880, IUGG XXIV, Perugia, Italy, July 2-13, 2007

[**Cravoisier et al, 2006**] Cravoisier S., Dorbath C., Geoffroy L., **Durand S.**, and Nicolas J., *Crustal*

deformation monitoring of active volcanic rift segments in the Reykjanes Peninsula, Iceland, EGU, Vienna, April 2006

[**Vergnolle et al. 2005b**] Vergnolle M., **S. Durand**, L. Morel, J. Nicolas, M-N Bouin, F. Masson, *Study of Ocean Loading Effects in Brittany, France, From a Multi-Software Analysis of 6-Months GPS Data*, AGU Fall Meeting, San Francisco, 5-9 Dec. 2005

[**Bouin et al. 2005b**] Bouin M.- N., **S. Durand**, M. Llubes, F. Masson, L. Morel, and J. Nicolas, *Reference frame realization and ocean loading effects : a GPS experiment*, EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24 – 29 April 2005

[**Durand et al. 2004d**] **Durand S.**, Nicolas J., Morel L., and Duquenne F., *Ocean Loading Study in Brittany. Analysis of 1999 and 2004 GPS campaigns*, European Geosciences Union, Nice, 25-30 avril 2004

[**Durand et al. 2004e**] **Durand S.**, Nicolas J., Morel L., *Ocean Loading Study in Brittany. First Results of the 2004 GPS Campaign*, Committee on Space Research (COSPAR), Paris, 18-25 July, 2004, COSPAR04-A-02718 ; PSD1/B2.1-0008-04

Activités d'enseignement

Service d'enseignement

Je réalise la totalité de mon activité d'enseignement au sein de l'ESGT. L'essentiel de mon service est réalisé en formation initiale, pour les diplômes d'ingénieur et de master délivrés par l'ESGT :

- Enseignement en Topométrie de Précision en 4ème et 5ème années du cycle ingénieur (Master 1 et 2)
- Enseignement en Géodésie/GNSS en 1ère année du cycle Master (Master 1)

Dès mon arrivée à l'ESGT, j'ai soutenu la création d'une activité de formation continue à destination des professionnels (géomètres, topographes, BTP, collectivités, ...). Cette activité est à mon sens une excellente manière de diffuser des connaissances et de lier des contacts avec le monde professionnel, contacts qui peuvent parfois s'avérer fructueux aussi en recherche. Au sein de l'école, j'ai ainsi mis en place, organisé et réalisé plusieurs offres de formations de courte durée. Je suis également intervenu pour des formations spécifiques organisées en dehors de l'ESGT.

- Formation de l'ESGT au DPLG en géodésie et GNSS (1 session/an depuis 2012, Cours : 15 HED, TD : 20 HED)
- Formation continue de l'ESGT en géodésie et GNSS. Une session/an entre 2005 et 2012 à l'ESGT mais également hors du Mans (Nancy, Lyon, Dijon, Limoges). Cours : 15 HED, TD : 20 HED
- Formations ESGT pour l'OGE¹¹ : 1 journée à destination des géomètres experts en région ou sur Paris, sur le thème des GNSS en 2009
- Formations spécifiques UNGE¹² : 7h/an entre 2013 et 2016, sur l'ajustement de mesures topographiques
- Conférences/formations lors des Universités d'été des Géomètres Experts en GNSS (2009), Mesure de précision et auscultation (2013 et 2015)

J'interviens également pour des enseignements ou des formations continues à l'international, du fait des partenariats en place à l'ESGT :

- Formation en Géodésie/GNSS auprès de l'Institut des Techniciens Spécialisés en Génie Rural et Topographie de Meknès (2004)

11. Ordre des Géomètres Experts

12. Union Nationale des Géomètres Experts

- Formation des personnels du cadastre tunisien au logiciel scientifique Bernese de traitement de données GNSS (2005)
- Cours de Calcul d'erreur et ajustement à l'Université de Thiès, Sénégal (2017 et 2018)

Afin d'illustrer le contenu de ma charge d'enseignement, je présente ci-dessous le détail de mon bilan pour l'année 2017-2018, ainsi qu'un bilan moyen depuis 2004.

- Cycle d'ingénieur ESGT, niveau Licence 3 : Introduction aux moindres carrés (Cours : 4 HED)
- Cycle d'ingénieur ESGT niveau Master 1 : Topométrie de précision (Cours : 22.5 HED , TD : 30 HED, TP : 130 HED)

Publications pédagogiques : polycopié de cours ¹³, site web de diffusion d'informations et d'échanges avec les étudiants pour les TD/TP ¹⁴

- Cycle d'ingénieur ESGT niveau Master 2 : Topométrie de précision (Cours : 20.5 HED , TD : 27.5 HED)

Publications pédagogiques : polycopié de cours ¹⁵, site web de diffusion d'informations et d'échanges avec les étudiants pour les TD ¹⁶

- Master Aménagement / Gestion Foncier, niveau Master 2 : Géodésie/GNSS (Cours : 11 HED , TD : 22.5 HED)
- Responsable de la 5ème année du cycle ingénieur : 10 HED
- Activités d'encadrement d'étudiants : 56 HED
- Formation continue D.P.L.G. : Géodésie/GNSS (Cours : 9 HED, TD : 6 HED)

Bilan de la charge d'enseignement 2017-2018 : 349 HED

Bilan moyen de la charge d'enseignement depuis 2003 : entre 300 et 360 HED

Diffusion et vulgarisation scientifiques

- Co-rédaction de la rubrique Info Topo de la revue XYZ de l'Association Française de Topographie de 2005 à 2011
- Diffusion de connaissances auprès des professionnels dans le cadre de la formation continue
- Développement d'un logiciel d'ajustement de mesures topographiques à des fins de recherche, d'enseignement et de diffusion auprès des professionnels : CoMeT (Compensation de Mesures Topographiques)

13. Durand S., *Topométrie de précision IG4*, ESGT, cycle ingénieur, dernière version année 2016, 165 pages

14. <http://geomatique.esgt.cnam.fr/ig4/td> et <http://geomatique.esgt.cnam.fr/ig4/tp>

15. Durand S., *Topométrie de précision IG5*, ESGT, cycle ingénieur, dernière version année 2016, 73 pages

16. <http://geomatique.esgt.cnam.fr/ig5/td>

Activités administratives et responsabilités collectives

Au niveau national :

- Secrétaire de la section géodésie du CNFGG de 2007 à 2011
- Membre du comité de lecture de la revue française XYZ éditée par l'AFT depuis 2006
- Membre élu au conseil de l'AFT depuis juin 2016
- Membre élu au conseil de département ICENER¹⁷ (Cnam) de 2010 à 2016 puis au conseil de l'EPN02¹⁸ (ESGT) depuis 2017

Au sein de l'ESGT :

- Responsable de l'enseignement de Topométrie de Précision à l'ESGT depuis 2003
- Responsable du laboratoire de Topométrie de précision / métrologie de l'ESGT depuis 2003
- Coordinateur de la 5ème année du cursus ingénieur ESGT depuis 2016
- Coordinateur des projets pré-professionnels IG5 en 2005 puis de 2012 à 2016

Mon implication dans la vie et le développement de l'ESGT s'est également concrétisée par le développement de différents outils de communication et de gestion d'activités pédagogiques :

- Refonte du site internet de l'ESGT en 2006 (exploité jusqu'en 2010)
- Création et gestion du site internet du laboratoire L2G de 2006 à 2010
- Mise en place et administration du serveur *Geomatique* au sein de l'ESGT depuis 2010, permettant la création de sites web dédiés à l'enseignement
- Création en 2010 et gestion depuis des sites internet dédiés à l'enseignement de Topométrie de Précision (Master 1 et 2)
- Création en 2012 et gestion jusqu'en 2015 du site internet de gestion et diffusion des Projets Pluri-disciplinaires IG5
- Création en 2014 et gestion depuis du site internet dédié à la gestion des absences des étudiants pour le cycle ingénieur ESGT
- Création en 2016 et gestion depuis du site internet dédié à la gestion et la diffusion des Travaux de Fin d'Etudes (TFE) des étudiants en dernière année du cycle ingénieur ESGT

17. Ingénierie de la Construction et Energétique

18. Equipe Pédagogique Nationale

Deuxième partie

Synthèse des activités de recherche

Introduction

Cette seconde partie rassemble les travaux de recherche que j'ai développé et encadré au sein du laboratoire Géomatique et Foncier (GεF) du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Ces recherches, au départ liées à mes travaux de doctorat, se sont développées à mon arrivée à l'ESGT alors que nous commençons à structurer notre petite équipe de 4 enseignants chercheurs et se poursuivent aujourd'hui au sein du laboratoire GεF, qui compte une vingtaine d'enseignants-chercheurs, un technicien, un ingénieur d'études et 3 doctorants. Mon activité de recherche est depuis ses origines concentrée autour d'une même thématique : l'amélioration de la précision du positionnement et de la mesure de déformation en utilisant des techniques géodésiques.

Le statut d'enseignant-chercheur qui est le mien depuis 2003, implique évidemment une activité de recherche, mais également une activité d'enseignement, dans laquelle, au delà de la réalisation des heures de cours, la diffusion des connaissances passe par l'encadrement d'étudiants lors de projets ou de stages, mais également par un rôle de conseil/expertise auprès des étudiants pour la recherche de stage, la réalisation de projets associatifs, etc.

Recruté au sein d'une école d'ingénieurs en sciences appliquées, j'ai souhaité lier une partie de mon activité de recherche avec mon activité d'enseignement. Cette interaction permet d'exploiter certaines retombées de mes recherches dans mes enseignements et de sensibiliser les étudiants aux travaux du laboratoire mais également aux implications de la recherche dans le monde professionnel et leurs activités futures. Elle permet d'intéresser plus facilement des étudiants à mes activités de recherche et de les faire contribuer, dans le cadre de stages ou de projets, à leur avancement. Mon étiquette d'enseignant en topométrie de précision à l'ESGT me permet également de nouer plus facilement des contacts avec le monde professionnel, pour faire émerger de nouvelles collaborations, de nouvelles problématiques de recherche ou de nouvelles applications de recherches au sein du laboratoire.

J'ai choisi de structurer cette présentation de mes travaux de recherche en trois parties. Dans la première, je présente en particulier les travaux réalisés sur l'amélioration et la qualification de la précision du positionnement GNSS pour les applications temps réel. Initiés lors de mon doctorat, ces travaux se veulent à la fois appliqués, pour permettre de comprendre et qualifier les performances des différentes techniques de positionnement temps réel (RTK, NRTK, PPP, RT-PPP, ...), mais également théoriques, avec le développement de nouvelles approches du positionnement RTK ou PPP (approche duale du positionnement GNSS), et le développement de nouveaux services de positionnement RT-PPP (thèse de Paulo Sergio de Oliveira).

La seconde partie de cette présentation se focalise sur mes travaux sur la combinaison de techniques géodésiques afin d'améliorer la précision de détermination de déplacements dans un contexte de mesure de déformations et d'auscultation. Parmi les différents niveaux de combinaison possibles entre

deux techniques géodésiques, je m'intéresse en particulier au principe d'une combinaison directe des observations et présente les résultats obtenus sur la combinaison des techniques topométriques et GNSS d'une part et GNSS et PS-InSAR d'autre part en utilisant la méthode classique de cumul des équations normales à convergence et d'intégration d'un vecteur 3D GNSS à des mesures topométriques ou PS-InSAR. Dans cette thématique, j'ai également été conduit à développer mes propres outils de traitement de mesures topométriques (logiciel CoMeT), et à m'intéresser à la comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topométriques, afin de mieux appréhender les conséquences du choix du logiciel et de son paramétrage sur les résultats obtenus. Ces travaux étant toujours en cours, je présente les derniers résultats obtenus sur la comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques, réalisés en collaboration avec différents organismes (Heig-VD, CERN, ETHZ). La problématique de combinaison de techniques géodésiques me conduit également depuis quelques années à m'intéresser en particulier au problème de la pondération relative des observations issues de différentes techniques et aux méthodes d'estimation des composantes de la variance. Je termine ainsi cette seconde partie par un état de l'art des méthodes VCE et une présentation de mes travaux actuels dans ce domaine.

Mes travaux passés et actuels dans le domaine du positionnement et de la mesure de déplacement par techniques géodésiques, ainsi que ma position particulière d'enseignant-chercheur au sein d'une école d'ingénieurs spécialisée dans ces domaines m'ont permis de développer différentes collaborations avec des scientifiques d'autres domaines, pour lesquels la mesure de position ou de déplacement est une donnée essentielle mais non une finalité. Dans la troisième partie de cette présentation de mes travaux, je décris les différentes recherches que j'ai pu mener et que je mène toujours dans ce contexte. Je présente ainsi les travaux méthodologiques que j'ai réalisés entre 2003 et 2007, dans le cadre de la campagne d'étude de la surcharge océanique en Bretagne, sur l'impact des modèles, de la stratégie de traitement et de référencement sur l'estimation du phénomène de surcharge par GNSS. Je présente ensuite les travaux réalisés dans le domaine du couplage géodésie/hydrologie pour l'étude de sites hydro-géologiques, dont le principal intérêt est de permettre, lors de la modélisation du système hydro-géologique, de mieux contraindre l'inertie du système, par des mesures de déformation du sol en surface non destructives. Je présente également mes travaux sur la mise en oeuvre et le développement de méthodes de positionnement et d'alignement dans le cadre de différents projets en cours : la tomographie par muons atmosphériques pour l'étude des volcans (ToMuVol), l'alignement de composants dans des accélérateurs de particules (CLIC et HL-LHC du CERN), la mesure de vibrations acoustiques par vision 3D.

La partie bibliographique liste l'ensemble des publications citées au cours de cette synthèse de mes travaux de recherche, à l'exception de celles où j'apparais comme auteur, déjà présentes dans mon Curriculum Vitae.

Améliorer la précision du positionnement GNSS temps réel

Les systèmes de localisation par satellites, regroupés sous le terme générique GNSS¹⁹, permettent à tout utilisateur de déterminer sa position et sa vitesse de manière instantanée, dans un système de référence global, quelles que soient les conditions météorologiques. Depuis la mise en service des premiers satellites GPS²⁰ américains dans les années 70, les GNSS ont bouleversé notre manière de vivre. Ils sont aujourd'hui partout : dans nos smartphones, nos voitures, et même dans les colliers de nos animaux préférés. Bien sur, les systèmes GNSS permettent la localisation et l'aide à la navigation. Il s'agit là de leur raison d'être première. Mais ils sont aujourd'hui utilisés pour bien d'autres activités, du transfert de données, à la publicité ciblée par géolocalisation, en passant par la synchronisation temps/fréquence et le positionnement de précision, ce dernier domaine nous intéressant ici plus particulièrement.

Les GNSS sont une technologie dont la complexité réelle se cache derrière l'apparente simplicité des récepteurs grand public, aujourd'hui largement répandus, miniaturisés et peu coûteux. Lorsque l'on cherche à tirer le meilleur de cette technologie en terme de précision de positionnement, il est nécessaire de se rappeler que les données de base traitées par un récepteur GNSS sont des distances à des satellites qui défilent à quelques 20 000 km d'altitude. Et que ces distances sont extraites en utilisant des techniques très pointues de corrélation à partir des signaux radio-électriques émis par ces satellites traversant les différentes couches de l'atmosphère pour arriver à l'antenne du récepteur.

Pour la plupart des applications grand public, le positionnement est basé sur l'utilisation des codes pseudo-aléatoires émis par les satellites GNSS. On parle alors de mesure de pseudo-distance, dont le traitement, basé sur le principe de multilatération spatiale, est facilement compréhensible et largement accessible. Les applications topographiques et scientifiques nécessitent quand à elles l'usage de la mesure de phase (plus exactement de déphasage sur la porteuse du signal) pour atteindre des précisions meilleures que quelques centimètres.

Cette manière d'utiliser les systèmes GNSS, non prévue au moment de leur conception, est apparue dans les années 80 à l'initiative de la communauté scientifique (cf. [Wubbena 1985]). Le niveau de bruit de la mesure de phase, de 1 à 2 mm exprimé en terme de longueur, est plus de 10 fois meilleur que celui sur la mesure sur les codes pseudo-aléatoires, permettant en théorie d'atteindre une précision de positionnement millimétrique. La communauté scientifique a développé au cours du temps deux méthodes d'utilisation de la mesure de phase à des fins de localisation : le Positionnement dit

19. Global Navigation Satellite System

20. Global Positioning System

Point Précis ou PPP²¹, apparu à la fin des années 90 (cf. [Zumberge et al. 1997]) et le positionnement différentiel, aussi appelé positionnement relatif, utilisé dès les années 80 (cf. [Wubben 1985]).

La difficulté majeure de l'exploitation de la mesure de phase pour réaliser un positionnement précis est que le bilan d'erreur de cette mesure fait apparaître de nombreux termes, pour certains difficiles à modéliser ou à déterminer avec précision, tels que les termes d'horloge du récepteur et des satellites, le délai troposphérique, le délai ionosphérique ou l'erreur de position du satellite. La seconde difficulté dans l'exploitation de la mesure de phase est son caractère ambigu, provenant d'une incapacité du récepteur à déterminer le nombre de cycles de déphasage initial existant entre le signal reçu du satellite et celui généré en interne par le récepteur, au moment de la première mesure sur un satellite. On parle d'inconnue d'ambiguïté.

Dans le cas d'un positionnement différentiel, le principe consiste à réaliser la différence mathématique entre les mesures observées au même instant par deux récepteurs proches pour réduire l'influence des erreurs spatialement corrélées (orbites, atmosphère). La méthode classiquement employée est celle de la double différence de mesures, qui fait intervenir les mesures simultanées réalisées entre deux récepteurs proches et deux satellites, et qui permet également de réduire l'influence des erreurs liées aux horloges des satellites et récepteurs. L'utilisation de doubles différences en positionnement différentiel permet d'assurer que l'ambiguïté est un nombre entier, la partie décimale s'éliminant par la différenciation des mesures. On est alors amené à déterminer les valeurs entières des ambiguïtés sur les doubles différences de mesures plutôt que les ambiguïtés sur les mesures.

Dans le cas d'un positionnement en PPP, on utilise directement la mesure de phase entre récepteur et satellite. On parle alors de mesure non différenciée, ou de zéro-différence. Dans ce cas, chaque terme intervenant dans le bilan d'erreur de la mesure de phase doit être soit estimé lors du traitement, soit éliminé par modélisation, en faisant appel à des données externes comme par exemple les produits d'orbites et d'horloges précises ou les modèles atmosphériques fournis par l'IGS²². Les inconnues d'ambiguïtés restent alors des nombres réels, du fait de la présence de biais récepteurs et satellites non entiers.

Dès lors que l'on utilise la mesure de phase, avec la technique PPP ou en mode différentiel, il est bien entendu possible d'ignorer dans le traitement le caractère entier de l'ambiguïté, au prix d'une dégradation d'un facteur 10 de la précision. On parle alors de solution flottante, ou de solution à ambiguïtés flottantes. La solution fixée, aussi appelée solution à ambiguïtés fixées, au contraire, correspond à une solution où les valeurs entières des ambiguïtés ont été déterminées (ou résolues). Afin d'illustrer l'importance de la résolution des ambiguïtés sur la précision de position en mode différentiel, considérons l'exemple suivant, tiré de [Durand et Peyret, 2004]. Soient deux récepteurs GPS, distants en moyenne de 60 m, l'un fixe et l'autre situé sur le charriot de l'anneau SESSYL²³ se déplaçant à une vitesse constante de 0.36 km/h sur une trajectoire elliptique. En utilisant le principe des doubles différences, nous pouvons calculer la position du récepteur mobile par rapport à la position connue du récepteur fixe et comparer la position ainsi estimée avec les coordonnées vraies fournies par la référence SESSYL. Pour ce traitement, seules des mesures de phase GPS sur la première fréquence sont utilisées, et la position du récepteur à chaque instant est calculée en augmentant progressivement le nombre d'époques de données. Lorsque les ambiguïtés entières sont considérées comme

21. Precise Point Positioning

22. International GNSS Service

23. Station d'Etudes des Systèmes de Localisation, grand équipement du LCPC Nantes exploité de 1995 à 2005

inconnues et sont estimées en même temps que les coordonnées du récepteur (cf. figure 1 à gauche), la solution flottante se stabilise au bout d'une vingtaine de minutes à environ 5-6 centimètres de la position exacte. Lorsque les ambiguïtés entières sont connues et retirées des observations (cf. figure 1 à droite), la solution fixée est dès la première époque à mieux que 5 cm des coordonnées exactes, et s'y maintient au cours du temps.

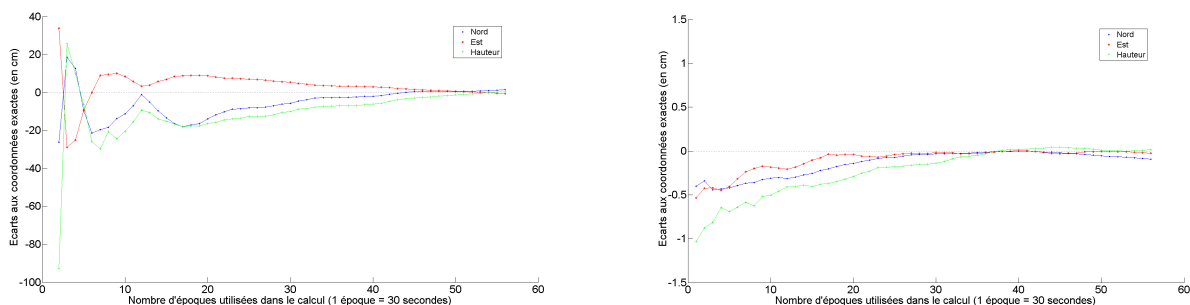


FIGURE 1 – Exemple de convergence de la position estimée vers la position exacte dans le cas cinématique avec ambiguïtés entières inconnues (à gauche) et ambiguïtés entières connues (à droite).

D'un point de vue mathématique, déterminer la valeur entière des ambiguïtés sur les mesures de phase en zéros ou doubles différences correspond à un problème d'optimisation difficile, sans solution analytique simple. La question de la résolution des ambiguïtés a longtemps été fondamentale, tant pour l'amélioration de la précision du positionnement que pour l'amélioration du temps de convergence.

Améliorer la précision du positionnement différentiel précis temps réel (RTK)

Dès le début des années 80 et le développement du positionnement différentiel par GNSS, les scientifiques se sont intéressés à la problématique de résolution des ambiguïtés entières. Le problème n'est en fait pas si compliqué que cela, pour peu que la méthodologie de mesure employée s'y prête. Si on cherche par exemple à déterminer les ambiguïtés entières en doubles différences dans le cas de deux récepteurs statiques ayant observé durant plusieurs heures simultanément les satellites GNSS, il est possible d'arrondir simplement les valeurs des ambiguïtés flottantes à l'entier le plus proche. L'efficacité de cette méthode est liée à la durée d'observation, typiquement 1 à 2 heures pour une ligne de base inférieure à 15 km, permettant, par une variation importante de la géométrie de la constellation GPS et des conditions atmosphériques, une bonne décorrélation des ambiguïtés avec les autres paramètres inconnus. Le logiciel scientifique Bernese 5.2 propose par exemple cette méthode (cf. méthode ROUND - [Dach et al. 2015]).

Cette méthode n'est cependant pas satisfaisante car elle nécessite : que les récepteurs soient statiques, que la ligne de base ne soit pas trop grande, et surtout, que la durée d'observation en continu soit importante. De nombreuses techniques de résolution des ambiguïtés entières dans le cas du positionnement différentiel ont été développées entre les années 80 et 90, comme la méthode AFM²⁴

24. Ambiguity Function method

développée au MIT²⁵ (cf. [Counselman and Gourevitch 1981]) au début des années 80, les méthodes basées sur l'utilisation des fréquences narrow-lane et wide-lane (cf. [Melbourne 1985]), ou la méthode FARA²⁶ (cf. [Frei and Beutler 1990]).

Au début des années 90, le challenge dans la communauté GNSS, à la fois chez les chercheurs et les constructeurs de récepteurs, est de permettre une résolution des ambiguïtés en vol, c'est à dire en temps réel, pour permettre un positionnement différentiel cinématique temps réel avec une précision centimétrique (RTK²⁷). D'un point de vue du traitement des données, le challenge est important car implique d'être capable d'obtenir avec certitude le bon jeu entier d'ambiguïtés, en considérant le récepteur mobile, sur une période d'observation très courte, donc avec peu de variation de la géométrie de la constellation permettant auparavant de décorréler les ambiguïtés des autres paramètres à estimer.

Les premiers récepteurs RTK apparaissent au milieu des années 90, avec le développement de méthodes OTF²⁸ parmi lesquelles KART/LRK²⁹ développée vers 1995 par le constructeur DSNP³⁰ (cf. [Gounon and Barboux 1997]), LSAST³¹ développée en 1989 par R. Hatch (cf. [Hatch 1989]) et modifiée par G. Lachapelle et al. en 1992 (cf. [Lachapelle et al. 1992]) ou LAMBDA³² développée au Delft depuis 1993 (cf. [Teunissen 1995]).

Comme indiqué par exemple dans [Han and Rizos 1997], les méthodes de résolution d'ambiguïtés entières utilisables en différentiel peuvent se classer en 4 catégories :

- les méthodes nécessitant un mode opératoire particulier, comme l'inversion d'antenne, la réoccupation d'un point particulier, la réalisation d'une phase statique avant un levé cinématique (méthode Stop and Go)
- les méthodes utilisant des combinaisons particulières de mesures bi-fréquences, comme typiquement la technique narrow-lane / wide-lane ou la technique Quasi Ionosphere-free (QIF) proposée par le logiciel Bernese
- les méthodes utilisant un espace de recherche sur les coordonnées du point. Dans ce type de méthodes, on associe à un ensemble de valeurs possibles pour les ambiguïtés, un ensemble de positions potentielles pour le récepteur mobile. On cherche alors la position "optimale", associée au vrai jeu d'ambiguïtés entières. Les méthodes AFM, LSAST ou MAPAS fonctionnent suivant ce principe
- les méthodes utilisant un espace de recherche lié aux ambiguïtés, dont la plus connue est la méthode LAMBDA. Dans ces méthodes, à partir des valeurs flottantes des ambiguïtés, déterminées par exemple par moindres carrés, on parcourt l'ensemble des jeux d'ambiguïtés entières possibles à l'intérieur d'un volume de recherche, pour trouver le jeu d'ambiguïtés entières permettant de minimiser la distance, au sens de la norme induite par la covariance sur les ambiguïtés, à la solution flottante.

25. Massachusetts Institute of Technology

26. Fast Ambiguity Resolution Approach

27. Real Time Kinematic

28. On The Fly - en vol

29. Kinematic Application real Time / Long Range Kinematic

30. Dassault Sercel Navigation Positioning

31. Least Squares Ambiguity Search Technique

32. Least squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment

C'est dans ce contexte que j'ai débuté mon activité de chercheur en 1999, dans le cadre d'une thèse de doctorat réalisée au sein de la section Robotique et Localisation (RL) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes, alors dirigée par François Peyret. Cette thèse de doctorat, co-financée par le LCPC et l'IGN dans le cadre d'un contrat de recherche, était encadrée par Pascal Willis (LAREG/IGN) et François Peyret (LCPC Nantes/section RL).

A cette époque, la section Robotique et Localisation menait des recherches sur l'utilisation des techniques de localisation à des fins de modernisation des chantiers routiers. Dans le domaine de l'automatisation des engins de chantier, une forte demande existait alors de la part des entreprises sur la problématique du guidage en nivellement des machines de profilage des chaussées, telles que le finisseur. Ces machines se déplacent à des vitesses faibles, typiquement 0.36 km/h, et nécessitent des précisions de positionnement de quelques centimètres en horizontal et de moins d'un centimètre en vertical, juste à la limite des meilleures performances des systèmes GNSS temps réel ultra précis, dans le cas de lignes de base courtes (< 1km). Il est donc naturel que la section RL se soit intéressée, peu de temps après le démarrage de son activité, aux technologies de localisation par satellites, et au positionnement RTK en particulier.

L'un des objectifs de mon travail de thèse était de renforcer de manière significative l'expertise et les connaissances de la section RL dans le domaine du positionnement RTK, en étudiant de près les phénomènes physiques en jeu limitant la précision du positionnement (bilan d'erreurs, influence des erreurs spatialement corrélées) ainsi que les techniques de traitement des mesures et de résolution des ambiguïtés entières en vol, qui sont une des clefs essentielles de la précision de ce type de positionnement.

Apport expérimental au positionnement différentiel RTK

Au début des années 2000, plusieurs logiciels scientifiques permettaient déjà le traitement de données GNSS, parmi lesquels Gipsy-Oasis II, développé par le JPL³³ (cf. [Webb and Zumberge 1995]), Gamit développé au MIT (cf. [Kind and Bock 2015]) ou Bernese développé à l'AIUB³⁴. Mais ces outils, conçus pour le post-traitement de données statiques ou cinématiques, ne disposaient pas de fonctionnalités de traitement spécifiques au positionnement RTK. Les compétences dans ce domaine se trouvaient essentiellement chez les constructeurs de matériels GNSS, pour lesquels le marché du positionnement RTK, en plein essor, était très concurrentiel.

Mes efforts ont donc porté sur la réalisation d'un état de l'art sur le sujet du positionnement RTK, avec une attention particulière portée aux techniques de résolution des ambiguïtés entières. Ce travail ne pouvant rester que théorique, j'ai également développé une boîte à outils modulaire sous environnement Matlab, permettant la simulation et le traitement de la mesure de pseudo-distance et de phase GNSS, dans le cas d'un positionnement différentiel. Cette boîte à outil permettait également en post-traitement de simuler le mode de positionnement RTK. Par rapport aux logiciels scientifiques de traitement de données GNSS de l'époque, un certain nombre de simplifications, liées au contexte du positionnement RTK, ont été assumées, comme par exemple l'utilisation d'orbites radiodiffusées et non précises, la simplification de la prise en compte des paramètres de la rotation de la Terre, etc.

33. Jet Propulsion Laboratory

34. Astronomical Institute of the University of Bern

Un effort particulier a par contre été porté sur l'utilisation de méthodes de résolution d'ambiguïtés entières adaptées au positionnement RTK. Ainsi, les méthodes LAMBDA, LSAST et MAPAS³⁵ ont été implémentées dans cette boîte à outils.

Ces développements ont permis d'illustrer l'état de l'art réalisé sur des données réelles et simulées, ainsi que de réaliser des tests sur l'influence de différents paramètres sur la qualité du positionnement RTK : effet de l'augmentation de la distance entre récepteur fixe et mobile sur la capacité du mode différentiel à réduire l'influence des délais atmosphériques suivant différentes modélisations, impact sur la correction de la variation de position du centre de phase de l'antenne, etc. Différentes campagnes de mesures terrain ont été réalisées pour étudier l'impact de la longueur de la ligne de base sur la qualité du positionnement. Ces campagnes ont fait intervenir non seulement des récepteurs GNSS, mais également l'équipement SESSYL du LCPC Nantes. Ce dernier, exploité entre 1995 et 2005 par la section, consistait en un chariot se déplaçant sur un rail de 180m de longueur, dont la position est connue à chaque instant avec une précision inférieure à quelques millimètres. Cette trajectoire de référence est réalisée par la présence du rail de guidage et l'addition de capteurs inertiels placés sur le chariot.

Bien entendu, le contexte scientifique et technique a fortement évolué depuis ce travail de thèse, avec l'apparition depuis quelques années de logiciels libres, performants, permettant le traitement temps réel des données GNSS, à la fois pour le positionnement RTK, mais également pour le positionnement PPP. Parmi ces outils, les plus connus sont RTKLib (cf. [Takasu 2010]) et l'utilitaire BNC³⁶ développé par le BKG³⁷.

Apport théorique au positionnement différentiel GNSS

Le second apport de mon travail de doctorat est lié à ma collaboration avec André Lannes, alors directeur de recherche au sein du CERFACS³⁸. A cette époque, il menait des recherches sur la problématique de calibration de phase en interférométrie (cf. [Lannes 2001]), correspondant à la détermination d'inconnues entières dans un ensemble de mesures. L'approche développée dans ce contexte, basée sur la notion mathématique de graphe algébrique, semblait avoir le potentiel pour s'appliquer également au concept de positionnement différentiel GNSS, et à la problématique de résolution d'ambiguïtés entières sur des doubles différences de mesures.

Nous avons ainsi travaillé au cours de ma thèse sur l'adaptation de ce concept, appelé approche duale, et sur l'éclairage nouveau qu'il pouvait apporter à la problématique de positionnement différentiel GNSS. Les résultats ont été publiés dans [Lannes et Durand, 2003].

L'objet de l'approche duale est de faire le lien entre la formulation classique en doubles différences du problème de positionnement différentiel GNSS, et une formulation mathématique liée à l'algèbre des graphes. L'intérêt étant de pouvoir exploiter des résultats connus en théorie des graphes pour

35. Maximum A Posteriori Ambiguity Search [Macabiau 1996]

36. BKG Ntrip Client

37. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

38. Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

mieux comprendre et améliorer la formulation classique. Notre approche n’était pas à l’époque la seule tentative de lier GNSS et graphes algébriques. Dans [Even-Tzur 2001], l’auteur a ainsi exploité la notion de boucle dans un graphe GNSS pour la détection d’erreurs grossières dans un réseau GNSS.

Le point de départ de l’approche duale est de formuler le problème de positionnement différentiel GNSS et de résolution des ambiguïtés entières en doubles différences d’abord à partir des mesures non différenciées. Dans ce contexte, les doubles différences se trouvent naturellement reliées à la notion de clôture au sens de Kirchoff par application de résultats d’algèbre sur les graphes orientés (cf. [Roman 1975]).

Commençons par exposer rapidement quelques concepts liés à l’utilisation de la théorie des graphes en GNSS. Comme illustré par la figure 2, on peut associer à un ensemble de n_r récepteurs et n_s satellites, un graphe orienté appelé graphe GNSS. Le problème de localisation et de résolution des ambiguïtés est alors exposé dans un espace de fonctions prenant leurs valeurs sur le graphe GNSS plutôt que dans l’espace classique des mesures.

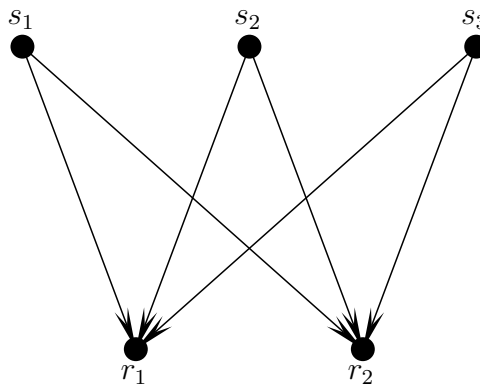


FIGURE 2 – Exemple de graphe GNSS orienté avec 2 récepteurs (r_1 et r_2) et 3 satellites (s_1 , s_2 et s_3). L’orientation des arêtes du graphes permet de représenter la transmission du signal du satellite vers le récepteur.

A l’intérieur d’un graphe GNSS, possédant n_v sommets et n_e arêtes, on est alors amené à considérer les fonctions prenant leurs valeurs uniquement sur les sommets du graphe et celles prenant leurs valeurs sur les arêtes du graphe. Pour faire le lien avec le positionnement GNSS, les fonctions prenant leurs valeurs uniquement sur les sommets du graphe GNSS seront celles ne dépendant que du récepteur ou du satellite, comme par exemple les biais d’horloges. Les fonctions prenant leurs valeurs uniquement sur les arêtes du graphe GNSS seront celles dépendant à la fois du satellite et du récepteur, comme par exemple les termes de propagation dans l’atmosphère ou d’ambiguïtés.

Considérons maintenant \mathbb{E} l’ensemble des arêtes orientées d’un graphe GNSS donné, et \mathbb{G} l’ensemble des fonctions antisymétriques à valeurs réelles définies sur les arêtes orientées du graphe GNSS (i.e. sur \mathbb{E}). Muni des lois de composition classiques sur les fonctions, l’ensemble \mathbb{G} est un espace vectoriel réel (cf. [Biggs 1996]). Notons \mathbb{S} l’ensemble des fonctions prenant leurs valeurs sur les sommets du graphe GNSS et définissons l’opérateur de biais β qui à chaque fonction de \mathbb{S} associe une fonction de \mathbb{G} :

$$\begin{aligned}
\beta : \mathbb{S} &\rightarrow \mathbb{G} \\
g &\mapsto \beta.g : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{R} \\
(i, j) &\mapsto (\beta g)(i, j) = g(i) - g(j)
\end{aligned} \tag{1}$$

Cet opérateur de biais permet donc de fabriquer une fonction antisymétrique à valeurs sur les arêtes du graphe à partir d'une fonction prenant uniquement ses valeurs sur les sommets du graphe. On peut alors former l'espace des biais comme l'image par l'opérateur de biais β de l'espace \mathbb{S} des fonctions prenant leurs valeurs sur les sommets du graphe :

$$\mathbb{L} = \text{Im}(\beta) = \{\beta g / g \in \mathbb{S}\} \tag{2}$$

On montre alors que la dimension de \mathbb{L} est $(n_v - 1)$, avec n_v le nombre de sommets du graphe, et que toute fonction de \mathbb{G} peut se décomposer comme la somme directe d'une fonction de l'espace des biais \mathbb{L} et d'une fonction appartenant au supplémentaire de \mathbb{L} dans \mathbb{G} , noté \mathbb{L}^\perp :

$$\mathbb{G} = \mathbb{L} + \mathbb{L}^\perp, \mathbb{L} \cap \mathbb{L}^\perp = \{0\} \tag{3}$$

Autrement dit, la valeur de l'observation de phase entre un récepteur r et un satellite s peut être vue comme une fonction de \mathbb{G} et se décompose comme la somme directe d'une fonction de l'espace des biais \mathbb{L} (différence entre termes liés uniquement au satellite et termes liés uniquement au récepteur) et d'une fonction liée à son supplémentaire \mathbb{L}^\perp (termes d'ambiguïté, d'erreurs atmosphériques, de distance géométrique, etc).

Définissons alors la notion d'arbre maximal sur un graphe GNSS de la manière qui suit :

Définition. *Soit un graphe GNSS possédant n_v sommets et n_e arêtes, non orientées. Un arbre maximal de ce graphe GNSS est par définition un sous graphe possédant n_v sommets et $n_v - 1$ arêtes et ne comportant pas de boucles.*

Le terme de "boucle" est employé à la place de la notion de cycle en théorie algébrique des graphes (cf. [Biggs 1996]), pour éviter la confusion avec la notion de cycle de déphasage employée en GNSS. Pour illustrer la notion d'arbre maximal, reprenons l'exemple du graphe GNSS de la figure 2 avec 3 satellites et 2 récepteurs. La figure 3 montre deux exemples d'arbres maximaux construits à partir de ce graphe.

En choisissant maintenant un arbre maximal particulier \mathcal{T} sur le graphe GNSS, on note \mathcal{F} l'ensemble des arêtes non orientées du graphe n'appartenant pas au graphe maximal \mathcal{T} . Ces arêtes sont appelées *arêtes d'entrée de boucle* et correspondent aux arêtes permettant dans le graphe de refermer les boucles. Par construction, le nombre d'arêtes d'entrée de boucle est toujours $n_c = (n_r - 1)(n_s - 1)$.

En considérant l'ensemble des arêtes orientées construites à partir de l'ensemble \mathcal{F} des arêtes non orientées d'entrée de boucle, on peut construire l'espace vectoriel \mathbb{K} des fonctions antisymétriques à valeurs réelles définies sur les arêtes orientées d'entrée de boucle. On montre que la dimension

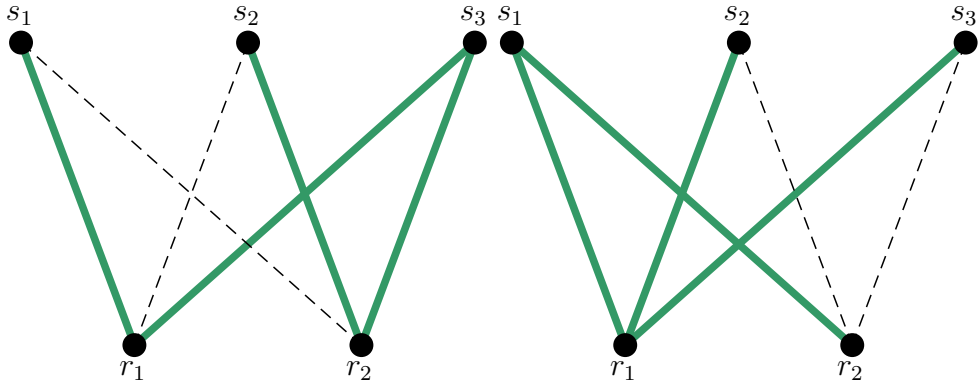


FIGURE 3 – Exemples d’arbres maximaux construits à partir du graphe GNSS de la figure 2 comportant 2 récepteurs et 3 satellites. En pointillés, les arêtes n’appartenant pas au graphe maximal.

de l’espace vectoriel \mathbb{K} est n_c , le nombre d’arêtes d’entrée de boucle, et que l’espace vectoriel \mathbb{G} des fonctions antisymétriques à valeurs sur les arêtes orientées du graphe GNSS peut se décomposer comme la somme directe de l’espace des fonctions antisymétriques sur les arêtes orientées d’entrée de boucle \mathbb{K} et de son orthogonal \mathbb{K}^\perp , i.e. :

$$\mathbb{G} = \mathbb{K} + \mathbb{K}^\perp, \mathbb{K} \cap \mathbb{K}^\perp = \{0\} \quad (4)$$

Intéressons nous maintenant à la notion de clôture, au sens de Kirchhoff, qui généralise la notion de double différence employée en positionnement différentiel.

Définition. Soit \mathcal{T} un arbre maximal d’un graphe GNSS. Notons \mathcal{F} l’ensemble des arêtes non orientées du graphe n’appartenant pas à l’arbre maximal \mathcal{T} (i.e. les arêtes d’entrée de boucle). Les termes de clôture au sens de Kirchhoff d’une fonction f de l’espace vectoriel associé aux arêtes orientées du graphe GNSS sont les compilations des valeurs de f le long des boucles orientées du graphe définies à partir de l’arbre maximal \mathcal{T} considéré.

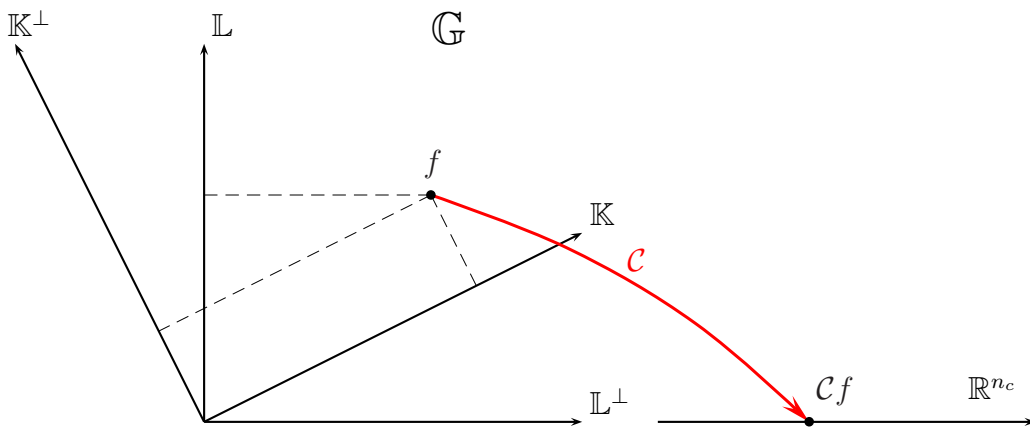


FIGURE 4 – L’opérateur de clôture \mathcal{C} permet d’associer à toute fonction f de \mathbb{G} le vecteur de \mathbb{R}^{n_c} de ses termes de clôture.

On définit alors l'opérateur de clôture \mathcal{C} comme l'application linéaire de \mathbb{G} dans \mathbb{R}^{n_c} qui associe à toute fonction de \mathbb{G} le vecteur de ses termes de clôture. L'opérateur de clôture permet de faire le lien entre l'espace des fonctions antisymétriques sur les arêtes du graphe, noté \mathbb{G} et l'espace \mathbb{R}^{n_c} des valeurs des clôtures, autrement dit des doubles différences de mesures, comme illustré par la figure 4.

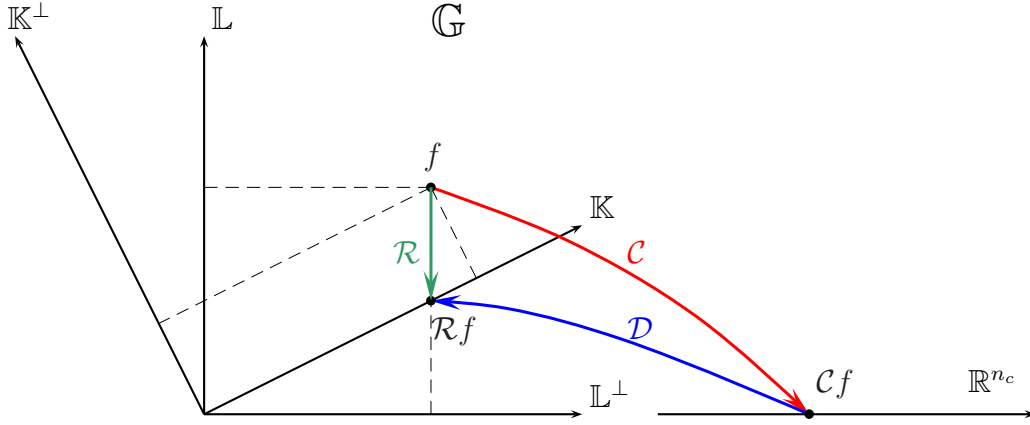


FIGURE 5 – L'opérateur \mathcal{R} est la projection oblique sur \mathbb{K} parallèlement à l'espace des biais \mathbb{L} .

On définit également \mathcal{D} l'opérateur qui permet d'associer à tout vecteur de \mathbb{R}^{n_c} une fonction de \mathbb{K} , l'espace des fonctions antisymétriques réelles à valeurs sur les arêtes d'entrée de boucle. On est alors amené à considérer l'opérateur \mathcal{R} comme l'opérateur de projection oblique de \mathbb{G} dans \mathbb{K} , parallèlement à \mathbb{L} . L'opérateur \mathcal{R} permet donc de projeter toute fonction f appartenant à \mathbb{G} , l'ensemble des fonctions antisymétriques à valeurs sur les arêtes orientées du graphe, sur l'espace \mathbb{K} des fonctions antisymétriques à valeurs réelles définies sur les arêtes orientées d'entrée de boucle, parallèlement à l'espace des biais \mathbb{L} . La figure 5 illustre les différentes compositions. On peut alors montrer que l'ensemble des fonctions antisymétriques sur les arêtes orientées du graphe GNSS \mathbb{G} peut se décomposer comme la somme directe d'un élément de l'espace des biais \mathbb{L} et d'un élément de l'espace des fonctions sur les arêtes d'entrée de boucle \mathbb{K} :

$$\mathbb{G} = \mathbb{K} + \mathbb{L}, \mathbb{K} \cap \mathbb{L} = \{0\} \quad (5)$$

On peut montrer que le réseau $\mathbb{G}(\mathbb{Z})$ se décompose également en somme directement sous la forme

$$\mathbb{G}(\mathbb{Z}) = \mathbb{K}(\mathbb{Z}) + \mathbb{L}(\mathbb{Z}), \mathbb{K}(\mathbb{Z}) \cap \mathbb{L}(\mathbb{Z}) = \{0\} \quad (6)$$

Le problème de localisation différentielle GNSS et de résolution des ambiguïtés entières peut donc être exprimé dans l'espace des clôtures, autrement dit, dans l'espace des valeurs de doubles différences de mesures, ou de manière équivalente dans l'espace des fonctions antisymétriques à valeurs réelles prenant leurs valeurs sur les entrées de boucles (i.e. l'espace \mathbb{K}). Le travail réalisé dans le cadre de mon doctorat a permis de définir clairement les expressions des opérateurs \mathcal{C} , \mathcal{D} et \mathcal{R} .

Si on travaille classiquement dans l'espace des clôtures, donc dans l'espace des doubles différences

de mesures, la question de la méthode de construction des doubles différences se pose. Il existe en effet différentes philosophies de formation des doubles différences de mesures en positionnement GNSS : choix de récepteur et satellite pivot fixes, utilisation de pivots tournants, etc. D'un point de vue graphe algébrique, choisir une méthode particulière pour former les doubles différences de mesures influe sur l'expression de l'opérateur de clôture \mathcal{C} et le choix de l'arbre maximal dans le graphe GNSS. Nous avons montré grâce à la relation de dualité entre l'espace des clôtures et l'espace \mathbb{G} des fonctions antisymétriques prenant leurs valeurs sur les arêtes du graphe GNSS que le choix de la méthode de construction des doubles différences n'avait pas d'influence sur la solution ajustée obtenue.

Après mon recrutement en tant qu'ATER au sein de l'ESGT, dans notre petite et jeune équipe de recherche, la volonté commune de développer une activité de recherche en géodésie, en s'appuyant sur l'étude de la surcharge océanique en Bretagne Cotentin, ne m'a pas permis durant quelques temps de participer à la poursuite du développement de cette approche. J'ai néanmoins suivi, autant que possible, les développements poursuivis par André Lannes, en essayant au mieux d'apporter ma contribution au projet.

Une des évolutions majeures concerne l'extension de la notion de clôture à la notion de différence réduite [Lannes 2007]. Dans l'approche classique de localisation différentielle par GNSS, les termes liés uniquement aux récepteurs et aux satellites, tels que les termes d'horloges, sont éliminés mathématiquement du modèle fonctionnel par utilisation de simples puis doubles différences. La simple différence par satellite par exemple, consiste à soustraire à la mesure réalisée par un récepteur sur un satellite la mesure réalisée au même instant par un autre récepteur sur le même satellite. La double différence, sur le même principe, consistera à faire la différence entre deux simples différences sur deux satellites différents. Comme indiqué dans [Durand et Peyret 2004], il est également possible de former les doubles différences de mesures en faisant appel au procédé d'orthogonalisation de Gram-Schmidt. On peut également, comme proposé par [Shi and Han 1992], former les différences en soustrayant à une mesure entre un satellite et un récepteur la moyenne des mesures entre ce satellite et l'ensemble des récepteurs, puis procéder de même sur l'ensemble des satellites. La difficulté dans cette approche est que les ambiguïtés de doubles différences associées ne sont plus entières, mais rationnelles. Il est montré dans [Lannes and Gratton 2009] qu'en utilisant la dualité entre l'espace des doubles différences (rationnelles mais non entières) et l'espace des fonctions associées au graphe GNSS, les difficultés liées au caractère rationnel et non entier des ambiguïtés peuvent être surpassées. Le problème de résolution des ambiguïtés entières correspond alors à la recherche du jeu d'ambiguïtés entières le plus proche, suivant une norme particulière liée à la covariance entre les mesures. Ce problème est alors résolu, comme mentionné dans [Agrell et al. 2002] en deux étapes : la recherche d'une base réduite de \mathbb{Z}^{nc} , liée à la norme, puis une recherche discrète. L'algorithme LLL, introduit dans [Lenstra et al. 1982] est celui classiquement utilisé pour la recherche de bases réduites. Dans [Lannes 2013], le lien existant entre l'algorithme LLL et la phase de décorrélation des ambiguïtés présente dans la méthode LAMBDA (cf. [Teunissen 1995]) de fixation des ambiguïtés GNSS est étudiée en détail et des améliorations, liées aux développements récents sur l'algorithme LLL (cf. [Luo and Qiao 2011]), sont proposées.

En 2010, afin de tester les concepts proposés dans [Lannes and Gratton 2009], j'ai participé à un travail d'étudiants de l'ENSEEIH³⁹ (H. Berouil, H. Khatib, J. el Aimani, H. Ashoui, M. Biari), encadré

39. Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications

par Serge Gratton, portant sur l'*Optimisation en nombre mixte et application au GPS*, en apportant mon expertise en GNSS et en fournissant entre autres des données simulées issues des outils développés au cours de ma thèse.

Evaluer les performances des méthodes NRTK

Le positionnement différentiel précis en temps réel (RTK) permet, après résolution des ambiguïtés entières sur les doubles différences de mesures de phase, d'obtenir un positionnement centimétrique utilisable pour toute application de levé ou d'implantation temps réel. La précision du positionnement RTK et sa capacité à fixer effectivement les ambiguïtés sont fortement liés à la capacité du mode différentiel à éliminer ou du moins fortement réduire l'influence des erreurs spatialement corrélées. De ce fait, l'une des contraintes à son utilisation est la distance entre le récepteur mobile et le récepteur fixe, qui doit être inférieure 15-20 km, sous peine de dégradation forte de la précision.

Le positionnement RTK réseau, aussi appelé NRTK pour Network RTK, est une évolution du positionnement RTK, permettant de palier en partie ces limitations. Ces principaux avantages sont :

- d'augmenter la distance entre le récepteur mobile et les stations de référence sans perte de précision de positionnement
- de disposer d'observations redondantes du fait de la présence de plusieurs récepteurs fixes permanents
- de simplifier la mise en oeuvre, l'utilisateur n'ayant à s'équiper que d'un seul récepteur

Dès mon arrivée fin 2003 à l'ESGT, je me suis intéressé à ces évolutions, en co-encadrant différents travaux d'étudiants. En 2004, le TFE de Luc Chalaye a permis de mettre en place, sur la station permanente de l'ESGT, une fonctionnalité de diffusion de corrections temps réel par lien GPRS⁴⁰. Nous avons alors pu tester les limites du positionnement RTK en réalisant des tests de positionnement à différentes distances de la station permanente, et en utilisant différents liens temps réel : GPRS et GSM. Ces travaux ont d'ailleurs donné lieu à une publication dans la revue XYZ (cf. [Chalaye 2004]). En 2007, dans le TFE de Jean-Christophe Ouaknine, nous nous sommes intéressés aux différentes techniques permettant un positionnement NRTK : les méthodes VRS⁴¹ et FKP⁴² ainsi que le concept MAC⁴³. Après avoir explicité les techniques VRS et FKP, l'étudiant a mis en oeuvre le concept maître auxiliaire (MAC) en programmant cette méthode sous environnement Matlab et en réalisant des comparaisons avec le mode RTK. Cette étude nous a permis de mieux appréhender ce domaine au sein de l'équipe et d'en diffuser les caractéristiques essentielles aux étudiants de l'ESGT.

Si la France n'a pas été pionnière en termes de réseaux permanents temps réel, elle bénéficie depuis le milieu des années 2000 de trois réseaux privés opérationnels sur son territoire : le réseau Orphéon (Geodata Diffusion), le réseau TERIA de l'Ordre des Geomètres Experts (société Exagone) et le réseau S@t-Info. Dès 2008, nous avons engagé des campagnes de mesure pour évaluer les performances de ces réseaux par rapport à la méthode RTK (Morel et al., 2008 ; Durand et al., 2009).

40. General Packet Radio Service

41. Virtual Reference Station

42. Flächen-Korrektur-Parameter

43. Master Auxiliary Concept

Bien que ponctuelles dans le temps et dans l'espace, ces deux campagnes réalisées en toute indépendance permirent de montrer que cette méthodologie en réseau était au moins aussi efficace que la méthode classique. Actuellement ces trois réseaux fonctionnent toujours et se tournent de plus en plus vers le mode PPP alors que les techniques précédemment citées étaient toutes basées sur le mode différentiel.

Evaluer et améliorer la précision de la technique PPP

La technique de Positionnement Point Précis (PPP) développée au JPL dans les années 90 (cf. [Zumberge et al. 1997]) a montré qu'elle pouvait être quasiment aussi précise que les méthodes différentielles dans le cas de réseaux étendus et lorsque la durée d'observation dépassait plusieurs heures (cf. [Kouba and Héroux 2001]). Son avantage indéniable est de permettre un traitement site par site, beaucoup plus simple et rapide qu'un traitement en bloc d'un ensemble de vecteurs dans le cas d'un positionnement différentiel. Elle permet également de simplifier grandement les problèmes de mise en référence, celle-ci étant réalisée directement dans le système de référence lié aux orbites des satellites.

La mise à disposition de produits toujours plus précis pour les orbites et horloges des satellites par l'IGS⁴⁴ a soutenu le PPP jusqu'à rendre cette technique applicable en mode cinématique et quasi temps réel. A partir des années 2000, des services commerciaux qui proposaient déjà des systèmes d'augmentation GPS ont complété leurs offres avec des solutions PPP temps réel, principalement dans l'agriculture pour guider et autoguidé les machines agricoles (services Omnistar et Starfire par exemple) mais aussi dans l'exploration et la production d'hydrocarbures (services Starfix de Fugro et C-Nav de C&C Technology). Enfin, l'IGS a poursuivi son effort vers le PPP en mettant en place le service RTS en avril 2013 (Real Time – IGS; [Caissy and Agrotis 2011]) qui délivre en temps réel des produits formatés précis d'orbites et d'horloges (<http://www.rtigs.net>) et favorise le développement d'applications PPP en temps réel.

La différence fondamentale entre positionnement différentiel et positionnement PPP est la complexité du modèle fonctionnel utilisé. En effet, en positionnement différentiel, le modèle fonctionnel associé à la différence de mesures de phase entre deux récepteurs permet une simplification du problème. Les ambiguïtés sur la différence de mesures de phase peuvent en particulier être considérées comme des entiers, l'impact des erreurs d'orbite et d'horloge des satellites peut être négligé et les erreurs atmosphériques peuvent, suivant la distance entre les récepteurs, être négligés ou modélisés en fonction de la distance entre les récepteurs.

Avec la technique PPP, tout phénomène physique contribuant au modèle fonctionnel associé à la mesure de phase entre un récepteur et un satellite doit être soit estimé, soit modélisé par ailleurs avec précision. En particulier, du fait des biais récepteurs et satellites, le terme d'ambiguïté ne peut plus être considéré comme entier. De même, il est indispensable de disposer de produits d'orbite et d'horloge satellite précis et de correctement prendre en compte les erreurs atmosphériques (ionosphère et troposphère), soit par une modélisation adéquate, soit par une estimation des paramètres.

L'approche du problème de positionnement GNSS, décrite au paragraphe II, par le biais de graphes algébriques permet de décomposer le modèle fonctionnel lié à la mesure de pseudo-distance ou de

44. International GNSS Service

phase GNSS comme la somme de trois fonctions, à valeurs réelles ou entières :

- deux fonctions prenant leurs valeurs sur les sommets du graphe GNSS, appartenant à l'espace des biais \mathbb{L} . L'une prend ses valeurs sur les sommets qui correspondent aux satellites, l'autre sur les sommets associés aux récepteurs.
- une fonction prenant ses valeurs sur les arêtes d'entrée de boucle, appelée fonction de clôture.

Dans ce cadre, certains biais liés aux satellites peuvent être estimés et transmis aux utilisateurs, leur permettant de réaliser un positionnement PPP. Par exemple, dans le cas d'un réseau permanent de stations GNSS, il est possible d'estimer tout ou partie des biais satellite suivants à l'intérieur du réseau : un terme d'horloge, un biais ionosphérique inter-fréquences, un biais temporel de groupe, une ambiguïté liée au satellite. La diffusion des ces paramètres aux utilisateurs leur permet de réaliser plus simplement un positionnement en mode PPP. Dans [Lannes et al. 2010], nous montrons ainsi qu'une fois les ambiguïtés sur les termes de clôtures résolues à l'intérieur d'un réseau de stations GNSS, il est effectivement possible d'estimer ce type de biais liés au satellite. Nous montrons également qu'alors, il n'est plus nécessaire de fixer d'autres inconnues d'ambiguïtés dans le traitement PPP. La conséquence directe est de décharger le récepteur réalisant le positionnement PPP d'une phase de résolution d'ambiguïté, particulièrement gourmande en temps de traitement.

De récentes évolutions ([Ge et al. 2008] ; [Bertiger et al. 2010] ; [Laurichesse and Langley 2015]) ont permis de surmonter des problèmes théoriques (fixation des ambiguïtés) et ainsi d'atteindre une précision centimétrique au bout de quelques minutes à quelques dizaines de minutes de convergence suivant le mode de positionnement RT-PPP (Real Time - Precise Point Positioning). Une présentation complète du PPP a fait l'objet d'un article dans la revue XYZ (cf [Morel et al. 2014]).

Développer un nouveau service de positionnement PPP temps réel

Les gestionnaires de réseaux permanents, et la société Geodata Diffusion en particulier, avec laquelle nous avons déjà collaboré dans le cadre de l'étude des performances des méthodes NRTK, s'est intéressée à l'utilisation de la technique PPP temps réel et à sa déclinaison à ambiguïtés fixées dès 2013. En effet, si d'un point de vue de l'utilisateur final, la technique PPP peut paraître très séduisante, car permettant un positionnement temps réel avec un seul récepteur et en absolu, l'infrastructure nécessaire reste constituée d'un réseau de stations permanentes, fournissant des produits précis d'orbites, d'horloges, de modèles d'atmosphère et autres. Des solutions commerciales, comme la solution Trimble CenterPoint RTX (cf. [Chen et al. 2011], [Leandro et al. 2011]) permettent depuis quelques années un positionnement centimétrique temps réel PPP avec des temps de convergence de quelques minutes et à ambiguïtés fixées.

En positionnement différentiel temps réel (RTK ou NRTK), les erreurs spatialement corrélées affectant les mesures de phase GNSS sont modélisées en employant un réseau de stations permanentes, puis transmises sous forme de corrections au mobile. Cette approche OSR (Observation-Space-Representation) n'est pas adaptée à la technique PPP où il est fondamental de pouvoir disposer de valeurs absolues d'erreurs au niveau du mobile.

Dans l'approche SSM (Space-State-Modeling), à chaque phénomène physique affectant la mesure GNSS est associé un modèle fonctionnel, tenant compte de son comportement spatial et/ou temporel, ainsi qu'un modèle stochastique (cf. [Wubben et al. 2005]). A partir d'un réseau de stations permanentes, il est possible d'estimer les paramètres associés à la modélisation de chaque phénomène physique et ainsi de diffuser ces paramètres aux utilisateurs sous forme de vecteur d'état (SSR Space-State-Representation). Cette approche est bien adaptée à la technique PPP et permet également d'adapter la cadence des messages envoyés à l'utilisateur en fonction du type d'erreur. Par exemple, pour garantir une précision centimétrique sur la position obtenue, les erreurs sur les horloges des satellites devront être disponibles avec une cadence de quelques secondes, tandis que les erreurs atmosphériques, dont la variation temporelle est plus lente, pourront être disponibles à des cadences moins élevées. Depuis 2007, le comité RTCM SC104, au niveau du groupe de travail SSR, développe le standard RTCM-SSR pour la diffusion des vecteurs d'états des erreurs GNSS à destination des techniques RT-PPP mais également RTK (cf. [Wubben et al. 2014]).

La société Geodata Diffusion opère depuis 2005 le réseau ORPHEON, composé de 160 stations GNSS permanentes sur la France métropolitaine et propose différents services de positionnement temps réel et temps différé. Avec l'évolution rapide des techniques de positionnement PPP temps réel (RT-PPP⁴⁵), le contexte du positionnement temps réel précis évolue rapidement et a poussé la société Geodata Diffusion à s'intéresser de près à cette technologie. Son objectif était d'étudier de quelle manière faire évoluer son réseau de stations permanentes pour proposer à terme un service de positionnement RT-PPP permettant un positionnement PPP à ambiguïtés fixées d'une précision centimétrique, avec des temps d'initialisation proches de la méthode NRTK actuelle.

Sous la direction de Laurent Morel (GεF) et en collaboration avec Romain Legros (Geodata Diffusion), nous avons ainsi démarré en 2014 la thèse de Paulo Sergio de Oliveira sur ce sujet. Cette thèse a été réalisée dans le cadre du dispositif CIFRE Brésil, lancé conjointement en 2013 par l'ANRT⁴⁶ en France et le CNPq⁴⁷ au Brésil qui permet l'accueil dans une entreprise française, en collaboration avec un laboratoire français, d'un doctorant brésilien, avec reconnaissance du diplôme de doctorat français au Brésil. Cette thèse, débutée en 2014, est d'ailleurs la première à avoir pu bénéficier du dispositif CIFRE Brésil. Elle a été réalisée en co-tutelle avec le laboratoire LGE⁴⁸ de l'antenne de l'UNESP (Université de Sao Paulo) à Presidente Prudence, sous la co-direction de Joao Francisco Galera Monico et mon co-encadrement.

Lors de la première année de thèse, les solutions existantes pour le positionnement PPP temps réel ont été étudiées, aussi bien au niveau des logiciels (RTKLib, BNC, PPPWizard) que des modèles et produits diffusés, nécessaires pour ce type de réalisation. L'erreur sur la modélisation du délai troposphérique est connue pour être un facteur limitant le temps de convergence de la solution PPP. Dans [Hadas et al. 2013] par exemple, l'impact de l'utilisation de deux modèles troposphériques a priori sur la solution flottante RT-PPP est étudiée. Dans [Li et al. 2014], les délais troposphériques zénithaux totaux (ZTD) et humides (ZWD) sont estimés en temps réel par PPP à partir d'un réseau de stations permanentes. Les résultats de comparaisons à des mesures de radio-sondages montrent que cette technique permet l'estimation des ZTD et ZWD avec une précision de l'ordre de 1 à 2 mm. Parmi les travaux actuels dans le domaine, nous nous sommes particulièrement intéressés à

45. Real Time PPP

46. Association nationale recherche technologie

47. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

48. Laboratorio de Geodesia Espacial

l'étude menée par Shi et consorts (cf. [Shi et al. 2014]), qui propose une modélisation de l'ensemble des ZWD obtenus pour chaque station d'un réseau par un jeu de coefficients représentant l'état de la troposphère au dessus du réseau. Ce jeu de coefficients peut ensuite être facilement diffusé aux utilisateurs et leur permettre, en apportant une modélisation plus fine de la troposphère, d'améliorer le temps de convergence en PPP temps réel.

En utilisant les stations permanentes du réseau ORPHEON, le doctorant a mis en oeuvre et testé cette méthode, en faisant varier la densité du réseau utilisé pour la modélisation des ZWD et la période de l'année. Nous avons ainsi étudié l'impact de la densité du réseau sur la qualité du positionnement final PPP de l'utilisateur, en sélectionnant un réseau dense composé des 160 stations du réseau ORPHEON et un réseau épars, comprenant seulement 37 stations. Nous avons également étudié l'impact des saisons, en sélectionnant 4 périodes de traitement en 2014 : printemps (1-6 mai), été (24-29 juillet), automne (16-21 octobre) et hiver (23-28 décembre). La méthodologie employée consiste à estimer dans un premier temps sur les stations du réseau les valeurs de ZWD, en utilisant le logiciel RTKLib en mode PPP statique (solution flottante) et les produits d'orbites et d'horloges temps réel du CNES. Ces ZWD estimés sur chaque station du réseau sont alors utilisés pour définir chaque heure des jeux de coefficients en utilisant la méthode proposée par [Shi et al. 2014], au second ordre. Enfin, ces jeux de coefficients sont utilisés dans le logiciel RTKLib au niveau de l'utilisateur (mobile) pour réaliser un positionnement PPP cinématique temps réel, avec ambiguïtés flottantes. Afin d'étudier les qualités de cette procédure sur la qualité du positionnement PPP-RTK, nous avons utilisé comme récepteur mobile des stations permanentes du RGP⁴⁹. Ces stations disposent en effet pour nos périodes de mesures, de valeurs estimées de ZWD calculées par l'IGN par méthode différentielle à l'aide du logiciel Bernese 5.2. Cela nous a donc permis non seulement de comparer nos valeurs interpolées de ZWD par la méthode de Shi avec une référence externe, mais également de comparer la qualité du positionnement PPP-RTK sur ces points.

L'ensemble des traitements n'est bien sûr pas réalisé en temps réel, mais nous simulons, grâce à quelques modifications apportées au logiciel RTKLib, l'intégration de la modélisation de la troposphère grâce au jeu de coefficients calculé par la méthode de Shi, dans le traitement de positionnement cinématique en temps différé.

Les résultats de ces travaux, publiés dans [de Oliveira et al. 2016a] montrent que l'utilisation de cette méthode permet de modéliser le ZWD au niveau du mobile avec une précision en moyenne de 1.3 cm comparée aux valeurs obtenues par l'IGN. La figure 6 présente, à titre d'illustration, dans le cas d'un réseau épars et pour les 4 périodes traitées en 2014, les valeurs moyennes (à gauche) et les écarts types (à droite) sur les différences entre ZWD estimé et ZWD issu de l'IGN sur l'ensemble des stations RGP.

En termes de temps de convergence, l'utilisation des jeux de coefficients ainsi modélisés permet une amélioration surtout sur la composante Nord, pouvant atteindre 20%. La figure 7 représente, au cours du temps, les valeurs moyennes (à gauche) et les quartiles à 68% (à droite) sur les écarts entre coordonnées estimées par PPP-RTK et les coordonnées connues pour un ensemble de 22 stations appartenant au RGP et pour différents traitements : PPP-RTK classique (bleu), PPP-RTK avec utilisation du modèle troposphérique de l'IGN (à 15 min) en vert, PPP-RTK avec des jeux de coefficients calculés à partir du réseau complet ORPHEON (rouge) ou épars (gris).

Ce travail montre également que l'utilisation d'un réseau épars ne dégrade que peu ces résultats, ce qui pourrait permettre de simplifier la mise en place et la gestion de futurs réseaux permanents GNSS destinés au positionnement PPP temps réel.

49. Réseau GNSS Permanent

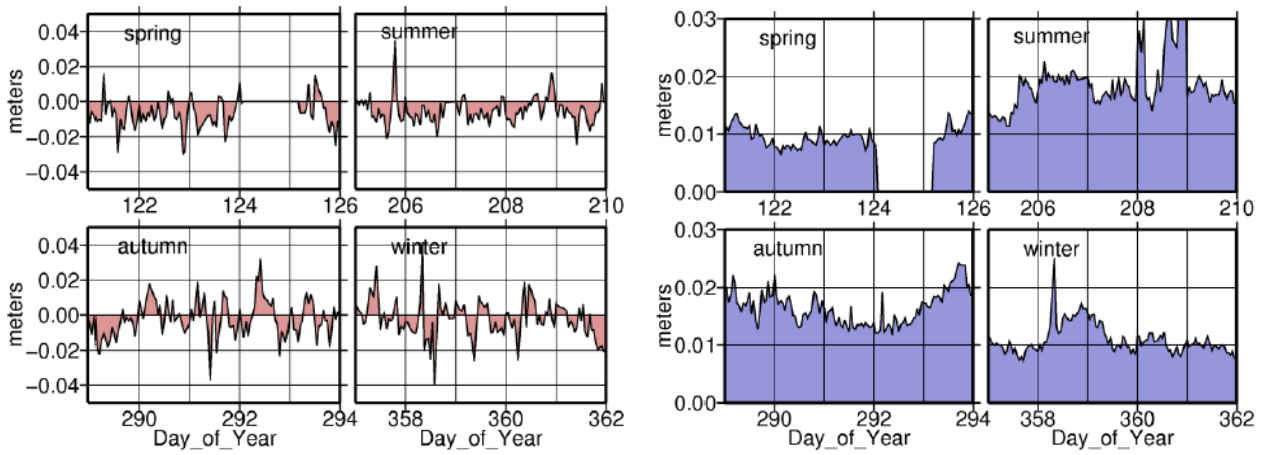


FIGURE 6 – Moyennes (à gauche) et écarts types (à droite) des différences entre ZWD estimée et ZWD calculée par l’IGN pour l’ensemble des stations du RGP, pour les différentes périodes de calcul en 2014. Jeux de coefficients calculés en utilisant un réseau épars constitué de 37 stations ORPHEON.

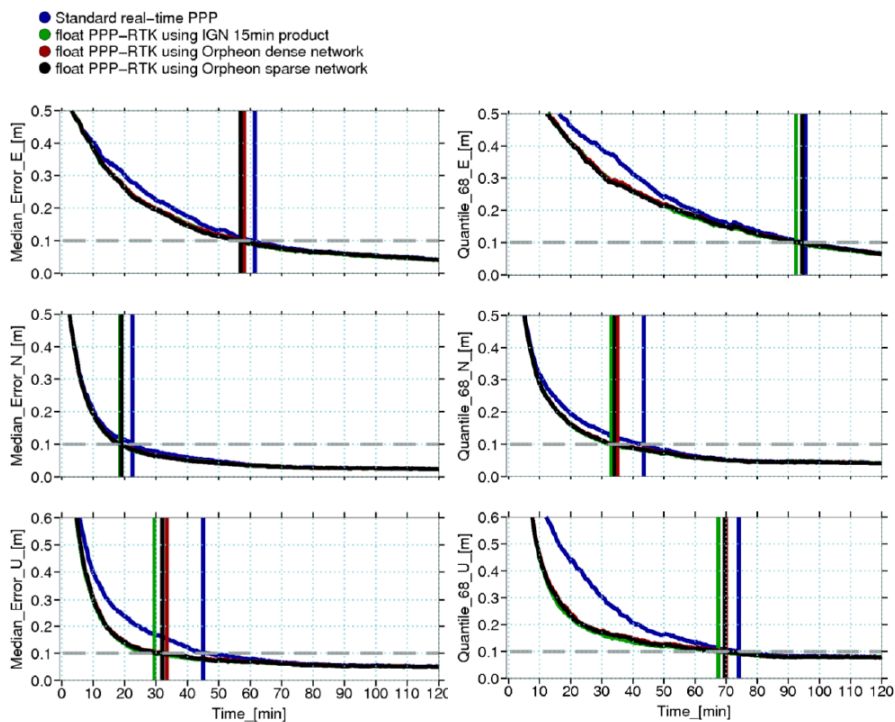


FIGURE 7 – Moyennes (à gauche) et écarts types (à droite) des différences entre ZWD estimée et ZWD calculée par l’IGN pour l’ensemble des stations du RGP, pour les différentes périodes de calcul en 2014. Jeux de coefficients calculés en utilisant un réseau épars constitué de 37 stations ORPHEON.

La seconde partie de la thèse a été consacrée à la mise en place d'une modélisation de la troposphère et surtout de la ionosphère à partir des stations régionales du réseau Orphéon, en s'appuyant sur le logiciel PPP-Wizard du Cnes. En effet, le Cnes⁵⁰ est l'un des centres IGS fournisseur de données d'orbites et d'horloges GPS et GLONASS dans le cadre de son service temps réel (RTS). L'utilisation des produits CNES d'horloges CLK9x permet la résolution des ambiguïtés en positionnement PPP temps réel, avec à la clef une précision de positionnement d'environ 1cm en horizontal. Le logiciel open sources PPP-Wizard, développé par le Cnes (cf. [Laurichesse and Langley 2015]), inclut la prise en compte des produits CLK9x, ainsi que la résolution des ambiguïtés sur la phase en zéro différences. Il permet également l'intégration de données atmosphériques a priori, ce qui est particulièrement intéressant dans le cadre de notre étude car nous permet d'injecter des valeurs a priori calculées à partir de tout ou partie du réseau Orphéon.

Dans [de Oliveira et al. 2016b], nous avons réalisé une première mise en oeuvre de corrections SSR ionosphériques et troposphériques en utilisant le réseau dense de stations permanentes Orphéon, et en utilisant le logiciel PPP-Wizard. Pour cette étude, les corrections atmosphériques SSR étaient calculées en utilisant une interpolation barycentrique des délais ionosphériques inclinés (par satellite) et des délais zénithaux humides à partir des 3 stations Orphéon les plus proches du mobile (cf. [Zhang et al. 2013]). La station VFCH (Villefrance sur Cher) du RGP a été utilisée comme récepteur mobile, et nous avons pu comparer les positions obtenues en positionnement RT-PPP (avec fixation des ambiguïtés) avec et sans prise en compte des corrections SSR. Nous avons pu montrer que l'utilisation des corrections SSR pour la ionosphère et la troposphère permettait une réduction significative des biais par rapport à une solution RT-PPP standard, d'un facteur 3 en moyenne après 3 minutes de convergence.

Par la suite, nous avons adopté et implémenté un algorithme permettant de modéliser les erreurs ionosphériques suivant les conventions RTCM pour la transmission de paramètres ionosphériques SSR (stage 3), basé sur une interpolation en fonction inverse de la distance (IDW - Inverse Distance Weighting). Les données de base de cet algorithme sont les valeurs de délais ionosphériques inclinés estimées au niveau des stations de référence. L'interpolation est réalisée à partir des délais estimés sur les 4 stations permanentes les plus proches et pour lesquelles les précisions obtenues sur ces délais est inférieure à 10 cm. Le même type d'algorithme a été utilisé pour modéliser l'erreur troposphérique. Les données de base sont alors les valeurs estimées de ZWD au niveau de chaque station permanente ainsi que la distance 3D entre les stations permanentes et le mobile, puisque les erreurs troposphériques sont fonction de l'altitude.

Afin de tester notre méthodologie, nous avons utilisé 10 sessions de 24h de données entre janvier 2014 et avril 2016 pour refléter au mieux les différents niveaux d'activité ionosphériques sur cette période (faible, moyenne, élevé). Sur chaque session, nous avons utilisé 63 stations permanentes du RGP comme récepteur mobile, réparties de manière à couvrir pratiquement tout le périmètre de couverture du réseau Orphéon.

Nous avons alors comparé les résultats obtenus en termes de temps de convergence et de précision du positionnement PPP au niveau du mobile en utilisant :

- (1) un traitement PPP à ambiguïtés fixées standard, sans faire usage de corrections atmosphériques apportées par notre modélisation SSR

50. Centre National d'Etudes Spatiales

- (2) un traitement PPP à ambiguïtés fixées, en utilisant des valeurs interpolées avec nos algorithmes IDW des erreurs troposphériques et ionosphériques à partir des valeurs de délais inclinés ionosphériques et de ZWD troposphériques estimées au niveau des stations permanentes du réseau complet de 160 stations Orphéon
- (3) le même traitement que le (2), mais en utilisant le réseau épars de 37 stations permanentes Orphéon, afin d'étudier l'impact de la densité de stations sur les résultats

Afin d'étudier la convergence de la solution de positionnement, des réinitialisations du traitement sont réalisées toutes les 2 heures sur les 10 jours sélectionnés. Statistiquement, les résultats obtenus avec le traitement PPP standard montrent qu'une précision de 10 cm en horizontal peut être obtenue en environ 25 minutes. En utilisant le réseau Orphéon complet pour générer les corrections au niveau du mobile, le temps de convergence moyen pour atteindre 10 cm de précision en horizontal est 14 minutes, soit un gain en temps de convergence de l'ordre de 46% par rapport au traitement standard. Avec le réseau épars de 37 stations, le temps de convergence moyen est de 19 minutes, soit un gain de 24%. Nous n'avons pas constaté d'amélioration du temps de convergence sur la composante verticale, voir même observé une dégradation en utilisant le réseau épars. Ce phénomène doit être étudié plus précisément, une piste sérieuse pouvant être la correction des biais matériel du récepteur présents dans les corrections ionosphériques.

Améliorer la précision de la mesure de déformation par combinaison de techniques

La campagne multi-techniques d'étude de la surcharge océanique en Bretagne Cotentin, réalisée en 2004, a été un élément structurant pour notre équipe de recherche. Elle a non seulement permis aux membres de l'équipe de se regrouper autour d'une thématique commune, mais nous a également fait connaître au niveau national, par intégration naturelle dans la communauté géodésie/géophysique. Dans cette campagne multi-techniques, faisant intervenir GNSS, gravimétrie, SLR, inclinométrie, mais également des aspects de modélisation, nous sommes essentiellement intervenus les premières années (2004-2005) sur le volet GNSS, à la fois sur l'organisation, la réalisation des mesures, le traitement des données GNSS pour obtenir des séries temporelles de positions. Nous nous sommes ensuite intéressés (2006-2008) à la comparaison des résultats GNSS avec les modèles de surcharge océaniques existants, mais également avec les résultats issus des autres techniques.

Suite à plusieurs recrutements de maîtres de conférences pour les besoins d'enseignement à l'ESGT entre 2004 et 2006 en photogrammétrie, SIG, topométrie, l'équipe de recherche a pu afficher et développer de nouvelles compétences, en particulier en InSAR. Alors que les méthodes GNSS permettent d'obtenir des mesures 3D précises ($< \text{cm}$) mais ponctuelles, la technique InSAR, et ses déclinaisons DInSAR (InSAR différentiel), permet d'estimer des déformations avec une précision moindre (idéalement sub-centimétrique), mais avec une densité spatiale continue.

Fort de notre expérience en inter-comparaison lors la campagne d'étude de la surcharge océanique et disposant de compétences nouvelles en InSAR, nous avons naturellement fait de la mise en oeuvre en parallèle des techniques GNSS et InSAR pour des applications géophysiques l'un des projets de l'équipe lors de sa reconnaissance en tant que Jeune Equipe (JE2508) en 2007. Cette mise en oeuvre combinée des deux techniques sur un site d'étude particulier permet bien évidemment des études d'inter-comparaison et d'inter-validation des résultats. Elle permet également d'envisager différentes possibilités de combinaison/fusion des techniques GNSS et InSAR, afin de profiter au mieux des avantages de chacune pour l'observation de phénomènes géophysiques comme : (1) l'utilisation de la technique GNSS pour estimer puis corriger la phase atmosphérique en InSAR ; ou (2) l'intégration dans un traitement combiné des mesures brutes GNSS et InSAR.

Dans le développement de mes activités de recherche, suite à mon recrutement comme maître de conférence en 2005, j'ai souhaité lier de manière plus étroite ma charge d'enseignement en topométrie de précision avec mes activités de recherche. Vues mes antériorités de recherche dans le domaine du positionnement précis par GNSS et mon expérience sur la campagne d'étude de la surcharge océa-

nique, j'ai naturellement orienté mon activité de recherche sur le développement méthodologique et pratique de l'utilisation combinée de techniques géodésiques, en particulier le GNSS et la topométrie, pour l'étude de déformations de faibles amplitudes (< 100 mm), avec des applications en géophysique et géotechnique.

La thématique de combinaison de techniques géodésiques pour l'étude de déformations est aujourd'hui encore l'un des axes majeurs de recherche du laboratoire, encouragé dans cette voie par l'AERES puis l'HCERES lors des différentes évaluations passées.

Identifier les niveaux de combinaison possibles entre les techniques

C'est dans ce contexte que j'ai proposé et obtenu le financement par l'école doctorale Arts et Métiers du Cnam en 2007 de la thèse de Benoit Legru, avec pour objectif d'étudier et d'exploiter la complémentarité des techniques GNSS, InSAR et topométriques pour l'étude de déformations de faibles amplitudes.

Le premier travail mené par le doctorant a été d'approfondir les connaissances du laboratoire sur les différentes méthodes de combinaison de techniques pouvant être mises en oeuvre dans le cadre de la mesure de déplacements. En sciences de la mesure, la problématique récurrente est de déterminer des paramètres (coordonnées, déplacements, ou autres), en ayant à disposition des observations réalisées grâce à un instrument ou plus généralement un processus de mesure. Comme illustré dans la figure 8, pour obtenir des déplacements à partir d'observations brutes (1), plusieurs étapes sont nécessaires : (2) le pré-traitement éventuel des observations brutes, permettant leur correction ou leur transformation ; puis (3) le processus d'inversion à proprement parler, consistant en la détermination des paramètres optimaux par rapport aux observations en présence. Le résultat de l'ajustement peut alors, suivant le type de technique mise en oeuvre, correspondre directement aux (5) valeurs de déplacements ou être constitué de (4) différents paramètres, qui seront convertis en déplacements. Lorsque l'on cherche à combiner deux techniques géodésiques pour observer des déplacements, la combinaison peut être réalisée à différents niveaux (cf. [Legru et al. 2009] ; [Polidori et al. 2013]) :

- (a) **en mélangeant les observations brutes** issues des deux techniques, afin d'obtenir une nouvelle observation qui servira après ajustement, à déterminer les déplacements. En topographie par exemple, ce type de combinaison de techniques est couramment utilisée, car les stations totales modernes constituent des instruments combinant différentes techniques de mesures : la mesure sur codeurs angulaires pour les mesures d'angles, et un distancemètre / télémètre pour les mesures de distance suivant la pente. Le topographe réalise d'ailleurs régulièrement la combinaison d'une mesure de distance suivant la pente avec une mesure angulaire pour obtenir une mesure de distance horizontale ou de dénivelée indirecte ;
- (b) **en combinant les observations**, brutes ou après pré-traitement, dans le processus d'ajustement.

Il pourra s'agir d'utiliser un logiciel permettant de traiter en bloc l'ensemble des données issues des différentes techniques. En topographie par exemple, les logiciels métiers ou spécialisés tels

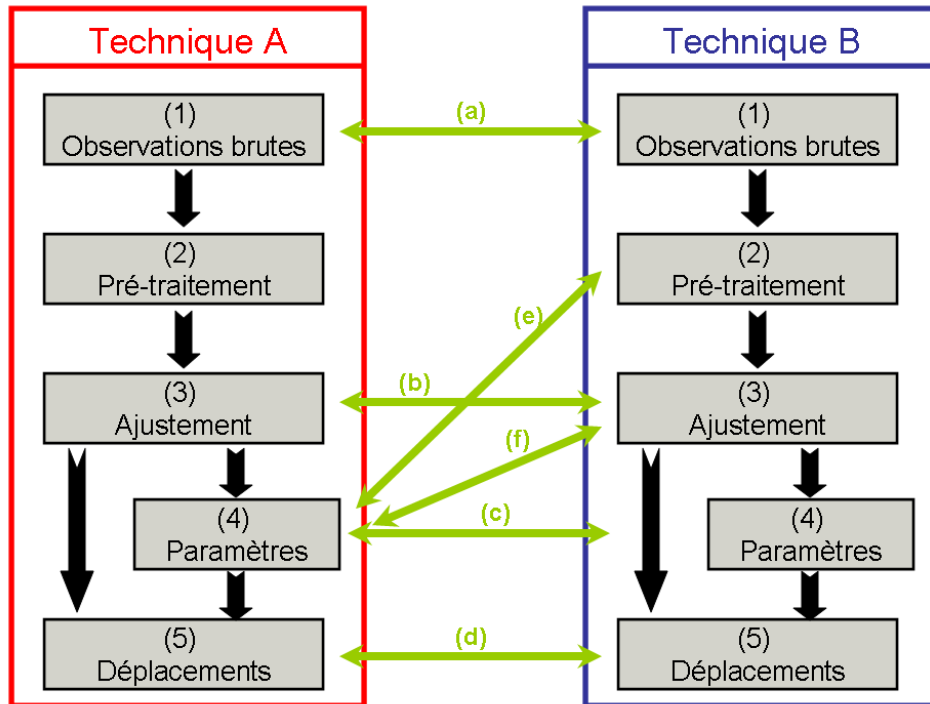


FIGURE 8 – Les différents niveaux de combinaisons possibles entre deux techniques de mesure de déplacements.

que Covadis⁵¹, TopStation⁵² ou Geolab⁵³ permettent le traitement en bloc des mesures topographiques courantes : angles, distances, dénivelées, ...

Il pourra également s'agir, lorsque l'ajustement est réalisé en utilisant la méthode des moindres carrés, de réaliser un cumul d'équations normales, à chaque itération ou à convergence. Cette méthode est largement employée en géodésie, par exemple dans le logiciel GINS développé par le CNES, pour le traitement combiné d'observations GNSS, SLR, DORIS⁵⁴ et VLBI⁵⁵ (cf. [Marty et al. 2011]) ou pour l'établissement du système de référence terrestre international (ITRF - cf. [Altamimi et al. 2011]);

- (c) et (d) **en combinant les coordonnées (paramètres) ou les déplacements issus de l'ajustement.** Cette méthode est la plus employée en géosciences pour l'étude de déformations géophysiques (cf. [Hammond et al. 2010]; [Vasco et al. 2007]; [Cervelli et al 2002]). La comparaison directe des déplacements observés par les différentes techniques permet également l'inter-comparaison et la validation;
- (e) **en intégrant des paramètres issus de l'ajustement d'une technique dans la phase de pré-traitement de l'autre.** Dans le traitement InSAR, pour déterminer un déplacement

51. Logiciel de topographie, terrassement infrastructure-VRD et génie civil de la société Geo-Media

52. suite logiciel des métiers de la topographie de la société JsInfo

53. Logiciel d'ajustement et de pré-analyse de réseaux de la société BitWise Ideas

54. Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

55. Very Long Baseline Interferometry

du terrain à partir des mesures de phase, il faut retirer toutes les phases indésirables, liées à la nature du sol, à l'orbite du satellite imageur, et à la traversée de l'onde dans l'atmosphère (cf. [Emardson et al 2003]; [Shirzaie 2011]; [Bähr and Hanssen 2012]). Comme précisé dans [Bekeart et al. 2015], suivant les études, la phase atmosphérique pourra ne pas être prise en compte, être éliminée par technique d'empilement des interférogrammes, ou être estimée, par un modèle ou à l'aide d'un réseau GNSS. Cette dernière méthode consiste à utiliser un réseau de stations permanentes GNSS pour réaliser une carte de délais zénithaux troposphériques humides (ZWD) dans la zone concernée par les images InSAR. Cette carte est ensuite utilisée pour prendre en compte, dans le traitement InSAR, la phase atmosphérique. Différentes études font usage de cette méthode ([Williams et al. 1998]; [Ge et al. 2000]; [Janssen et al. 2004]; [Xu et al 2006]),

- (f) **en intégrant des paramètres issus de l'ajustement d'une technique comme observation dans un ajustement combiné.** Il s'agira par exemple d'utiliser le vecteur 3D associé à une ligne de base en traitement GNSS différentiel comme une observation parmi d'autres observations topographiques d'angles, de distances ou de dénivelées dans un même traitement en bloc. De nombreux logiciels spécialisés tels que Geolab ou CoMeT (développé par le GεF), permettent cela. Il pourra également s'agir de contraindre certains paramètres dans le traitement InSAR à partir de positions ou déformations calculées par GNSS. Par exemple, en contraignant le déroulement de franges interférométriques par des données GNSS ou de nivellement comme proposé dans [Piyush Shanker et al. 2010].

Ce travail nous a permis de mieux cerner les potentialités de combinaisons entre les techniques et les différents niveaux de combinaison. Il a conduit le laboratoire à concentrer ses efforts sur deux aspects en particulier de la combinaison entre les techniques géodésiques que sont la topométrie, le GNSS et l'InSAR.

Le premier axe concerne l'utilisation du GNSS pour modéliser et corriger la phase interférométrique des images InSAR. Il s'est concrétisé lors de différents stages M2 au sein du laboratoire (cf. [Bacci 2012], [El Hamri 2013]). L'intérêt de ces travaux est d'apporter un éclairage sur l'impact de la méthodologie employée sur la précision de mesure des déformations par InSAR. Nous avons par exemple étudié l'influence de la méthode d'interpolation des cartes troposphériques calculées à partir des ZWD estimés sur le réseau GNSS et l'influence de la densité et de la géométrie du réseau GNSS (cf. [Simonetto et al. 2015]). Cette étude se poursuit actuellement pour comparer ces résultats avec d'autres méthodes de correction propres à l'InSAR comme la méthode d'empilement des interférogrammes par exemple. Le laboratoire envisage également d'exploiter son expérience récente en tomographie par GNSS pour améliorer la prise en compte de la troposphère au dessus de la zone de déformation, en remplaçant la carte de ZWD par une modélisation 3D du contenu en vapeur d'eau.

Le second axe concerne la combinaison des techniques par traitement en bloc des observations. L'idée suivie par le laboratoire dans cet axe est d'utiliser des méthodes d'inversion en GNSS, topométrie et InSAR faisant appel à la méthode des moindres carrés, et de combiner les techniques par cumul des équations normales. Cette philosophie a été mise en application dans le cadre des méthodes GNSS et PS-InSAR (InSAR différentiel utilisant des réflecteurs stables), suite au TFE de Jordan Burdack en 2013. Dans le cadre de la combinaison des techniques topométriques et GNSS, plusieurs travaux, et en particulier la thèse de Benoit Legru et le TFE d'Angélique Azzini en 2010, y

ont été consacrés. La finalité de ce travail est bien entendu dans un premier temps d'améliorer, par la combinaison des techniques, la précision de détermination des coordonnées des points d'un réseau. Avec en ligne de mire de permettre la détermination de déplacements de plus faibles amplitudes, avec une meilleure précision et plus sûrement. L'autre intérêt de ces travaux est de permettre au gestionnaire d'un réseau d'observation, qu'il s'agisse d'un réseau temporaire ou permanent, réalisant des observations en continu ou non, d'optimiser le type d'instrumentation mis en oeuvre (GNSS, tachéomètres, systèmes de nivellement, InSAR, etc) pour garantir une précision et une fiabilité données et permettre la détection de déplacements significatifs, tout en limitant les coûts d'installation et de gestion.

Améliorer la précision du positionnement par combinaison GNSS / topométrie

Le travail de thèse de Benoit Legru s'est rapidement focalisé sur la combinaison des techniques GNSS et topométriques, par cumul des équations normales. L'objectif premier de son travail était de montrer l'intérêt d'une telle combinaison, essentiellement au niveau de l'amélioration de la précision du positionnement.

Dès lors que l'on cherche à combiner des techniques par cumul des équations normales associées, il est essentiel de disposer de ces matrices normales. Dans le cas de la technique GNSS, de nombreux logiciels donnent accès aux matrices normales issues du traitement des observations, qu'ils soient professionnels, tels que le logiciel Leica Geo Office, ou scientifiques, tels que le logiciel Bernese de l'AIUB ou l'outil RTKLib ([Takasu 2010]). Dans le cas de la technique topométrique, l'obtention de matrices normales à l'issue d'un traitement est également possible, dans des logiciels professionnels tels que Geolab (avec l'outil supplémentaire Geolab Explorer) ou par l'utilisation de logiciels gratuits tels que JAG3D⁵⁶. Par contre, si l'on souhaite simuler des matrices normales GNSS, pour réaliser des études sans réaliser d'expérimentation terrain, il n'existe pas à notre connaissance d'outils disponibles.

Une partie des travaux de Benoit Legru a donc été consacrée au développement d'outils permettant la simulation de matrices normales GNSS et leur cumul avec des matrices normales topométriques, sous environnement Matlab, avec comme élément de base les développements que j'avais réalisés en GNSS lors de mon doctorat. Son travail a également participé au développement des fonctionnalités du logiciel CoMeT, pour l'exportation de matrices normales topométriques. Ses simulations ont montré, dans le cas de réseaux combinés GNSS/Topométrie l'intérêt de la combinaison par équations normales pour l'amélioration des précisions sur les coordonnées ajustées. L'étudiant a également confirmé ses simulations sur des données réelles et développé les premiers prototypes, dans le laboratoire, de systèmes permettant la mise en place d'un capteur GNSS à la verticale d'une station totale, comme illustré par la figure 9. La particularité de ce système, contrairement à ceux commercialisés à l'époque avec certaines stations totales, comme l'adaptateur SmartAntenne (GAD104) de chez Leica, est de garder fixe au cours du temps l'antenne GNSS, permettant d'améliorer le traitement GNSS par correction des variations de centre de phase ou prise en compte d'effets de trajets multiples sur le site.

Le travail de TFE d'Angélique Azzini en 2010 a permis de complexifier la géométrie des réseaux

56. Java Gratitude 3D - <http://derletztekick.com/software/netzausgleichung>



FIGURE 9 – Premier prototype de système permettant de positionner un récepteur GNSS à la verticale d'une station totale.

et de vérifier l'intérêt de la combinaison en terme de gain de précision dans ce cas, à la fois en simulation et sur données réelles. Dans les simulations réalisées, nous nous sommes intéressés à un réseau constitué de 3 points avec des altitudes similaires, avec deux points connus en coordonnées, notés $S1$ et $S2$, séparés de $300m$, et un point M de coordonnées inconnues, dont on fait varier les coordonnées Est et Nord dans un intervalle $[-500m; +500m]$ par pas de $25m$ par rapport au point moyen entre $S1$ et $S2$. Pour chaque position du point M , nous avons généré la matrice normale associée aux mesures topographiques entre les points (lectures horizontales de $S1$ vers $S2$ et M , de $S2$ vers $S1$ et M , angles zénithaux de $S1$ vers M et de $S2$ vers M , distances pentes de $S1$ vers M et de $S2$ vers M ; précision angulaire de $0.3mgrad$, précision en distance de $\pm 1mm \pm 1ppm$). En considérant une ligne de base entre le point $S1$ et le point M , nous avons également simulé une matrice normale pour les mesures GPS en incluant les mesures de phase sur la fréquence L1, réalisées à $1Hz$ sur une durée de 10 minutes, en considérant une précision sur la mesure de phase de $2mm$, et une précision sur la ligne de base de $2mm + 2ppm$. Nous avons alors comparé la précision obtenue sur les coordonnées planes du point M , dans le cas des mesures topométriques seules, des mesures GNSS seules et après combinaison des équations normales. Notre comparaison s'est appuyée sur les valeurs du demi grand axe de l'ellipse planimétrique à 95% sur les coordonnées du point M . La figure 10 représente, pour chaque position du point M potentielle, la valeur de ce demi-grand axe d'ellipse à 95% dans le cas des mesures topométriques seules (à gauche), GNSS seules (milieu) et après cumul des équations normales (à droite).

Si on compare les valeurs de demi grand axe obtenues par chaque technique de manière séparée, on constate que dans un rayon de $200m$ autour de la station $S1$, la précision de la technique topométrique est meilleure que celle de la technique GNSS (jusqu'à 50% meilleure à moins de $50m$ de $S1$). Cette tendance s'inverse au-delà de $200m$ de la station $S1$, avec une précision cette fois de la technique GNSS jusqu'à 80% meilleure que celle de la technique topométrique pour des décalages de plus de $450m$ en Ouest. Ces résultats illustrent que la précision que l'on peut atteindre avec chaque technique dépend essentiellement de la taille et de la forme du réseau d'observation, la technique topométrique donnant de meilleurs résultats que la technique GNSS en général à courtes distances et la technique GNSS donnant de meilleurs résultats que la technique topométrique au-delà de quelques centaines

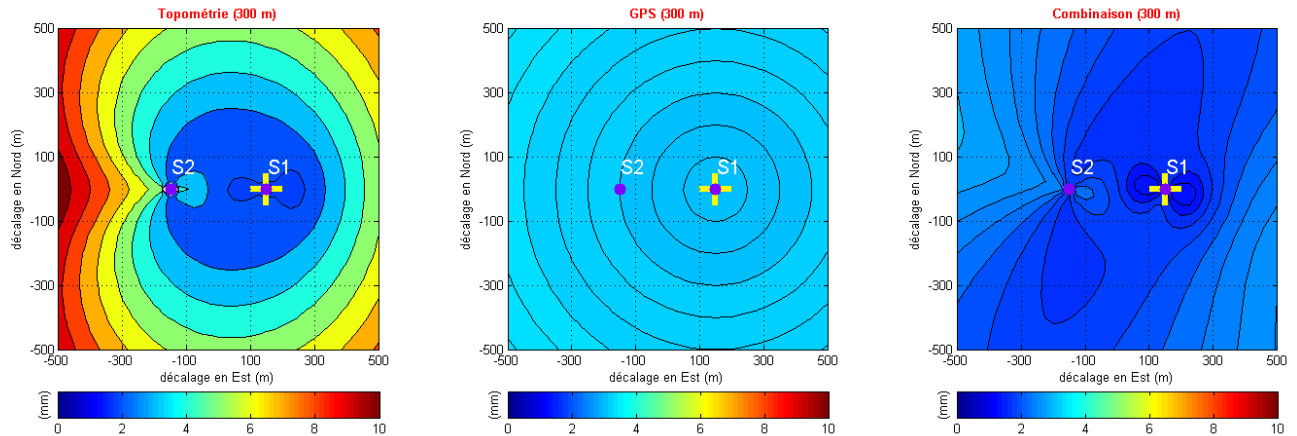


FIGURE 10 – Valeurs du demi grand-axe de l’ellipse de confiance planimétrique à 95% pour les différentes positions du point M . Cas des mesures topométriques seules (à gauche), des mesures GNSS seules (milieu) et de la combinaison par équations normales des mesures topométriques et GNSS (droite).

de mètres. Si l’on regarde maintenant les résultats obtenus lors de la combinaison des techniques (figure 10 à droite), on constate que la valeur du demi grand axe varie de 1.2 mm (à proximité du point $S1$) à 3 mm aux extrémités de la zone d’étude. En comparaison des résultats obtenus par les techniques topométrique seule et GNSS seule, les valeurs de demi axes obtenues sont toujours plus petites après combinaison des techniques. Comparativement à la technique GNSS prise seule, le pourcentage de gain varie entre 9% aux extrémités du réseau et jusqu’à 60% à proximité du point $S1$, avec en moyenne une diminution de la valeur du demi grand axe de 33%. Comparativement à la technique topométrique seule, l’amélioration de la valeur du demi grand axe associée à une utilisation combinée des techniques varie de 17% à proximité du point $S1$ à 78% aux extrémités du réseau, avec une amélioration moyenne de 50%. L’utilisation combinée, par le biais du cumul d’équations normales des techniques GNSS et topométriques permet donc effectivement d’améliorer la précision sur la détermination des coordonnées planes du point M . Ces résultats, ainsi que leur validation sur des données réelles, lors d’une campagne de mesures, ont été publiés dans la revue Instrumentation et Métrologie (cf. [Azzini et al. 2010]).

Améliorer la précision du positionnement par combinaison GNSS / PSInSAR

La thèse de Benoit Legru avait initialement pour objectif de combiner les mesures des techniques GNSS, topométriques et DInSAR. Si pour les deux premières techniques la méthode des moindres carrés est la plus largement employée pour réaliser l’ajustement des mesures, ce n’est pas le cas de la technique DInSAR. Nous avons ainsi rapidement choisi de concentrer le travail de thèse du docteur sur la combinaison des techniques GNSS et topométriques par le biais du cumul des équations normales, en gardant à l’esprit l’idée d’une combinaison des trois techniques .

En 2013, dans le cadre du TFE de Jordan Burdack, financé en partie par le programme TOSCA 2014 du

Cnes, nous avons réalisé une première étude sur la combinaison des techniques GNSS et InSAR par le biais des équations normales. Pour cela, nous sommes intéressés à la méthode PSInSAR développée à la fin des années 90 au Politecnico di Milano (cf. [Ferretti et al. 2001]). Cette technique, dérivée de l'InSAR, permet de mesurer des déformations avec une précision de l'ordre du millimètre sur certains pixels, appelés "Permanent Scatterer". Le second avantage de cette technique est de proposer une mesure ponctuelle, compatible avec le positionnement GNSS et permettant d'envisager la colocation de sites PSInSAR / GNSS.

La technique PSInSAR a fait l'objet de nombreuses recherches et plusieurs algorithmes de calculs ont été mis au point afin d'obtenir une mesure des déplacements la plus précise possible. Parmi ces méthodes de traitement, citons StaMPS⁵⁷ (cf. [Hooper et al. 2007]), DePSI⁵⁸ et STUN⁵⁹ (cf. [Kampes 2006]). L'algorithme STUN propose une approche du traitement PSInSAR très proche du traitement différentiel GNSS : utilisation de la méthode des moindres carrés, différence de phases entre deux PS proches pour éliminer les erreurs spatialement corrélées. Ces similarités nous ont conduit à étudier les possibilités de combinaison des techniques GNSS et PSInSAR par utilisation des matrices normales avec l'algorithme STUN, pour l'estimation de l'erreur sur le modèle numérique de terrain (MNT) et la mesure du déplacement vertical (cf. [Simonetto et al. 2014], [Simonetto et al. 2015b]).

Dans l'algorithme STUN, on forme $n - 1$ interférogrammes différentiels à partir de n images radar, en utilisant une seule image maître. Les PS communs à l'ensemble des interférogrammes sont alors divisés en deux catégories, suivant leur indice de dispersion : les PS de référence (PSC) et les PS secondaires. Les PS de référence forment un réseau de points, formé par exemple en utilisant la méthode de triangulation de Delaunay en essayant de minimiser la longueur des arcs dans le réseau. Un tel réseau est illustré à la figure 11.

A l'intérieur du réseau formé par les PS de référence, on réalise alors un traitement arc par arc. Pour chaque arc, on considère la différence de phases entre l'origine et l'arrivée de l'arc, pour éliminer les erreurs spatialement corrélées (atmosphère, orbites). On estime alors une valeur flottante des paramètres (erreur sur le MNT, déplacement vertical, ambiguïté différentielle de phase InSAR). Puis on utilise la méthode LAMBDA, initialement développée pour des applications GNSS, pour fixer les ambiguïtés différentielles de phase InSAR. On détermine alors les paramètres à ambiguïtés de phase connues et on calcule les paramètres pour l'ensemble des PS secondaires en créant un arc entre ce PS et un PS de référence. Dans le cadre du travail de Jordan Burdack, nous avons simplifié le problème en considérant les phases différentielles InSAR déjà déroulées et les ambiguïtés différentielles GNSS connues. Nous avons alors proposé un algorithme, basé sur celui de STUN, mais réalisant une estimation en bloc des paramètres (erreur de MNT, déplacement vertical) pour l'ensemble des arcs du réseau PSC et incluant des triples différences de mesures de phase (doubles différences dans le temps) sur les arcs équipés de récepteurs GNSS.

Cet algorithme a été testé sur des interférogrammes InSAR simulés grâce aux outils développés en 2012 par Paul Antoine Bacci (cf. [Bacci 2012]) et des mesures de phase GPS (L1 et L2) simulées grâce aux outils développés dans la thèse de Benoit Legru (cf. [Legru 2011]). Dans ces données simulées, une modélisation simplifiée a été utilisée (pas d'erreur d'orbite, pas d'effet atmosphérique). Les

57. Standford Methode for PSInSAR

58. Delft PS-InSAR processing package

59. Spatial and Temporal Unwrapping Network

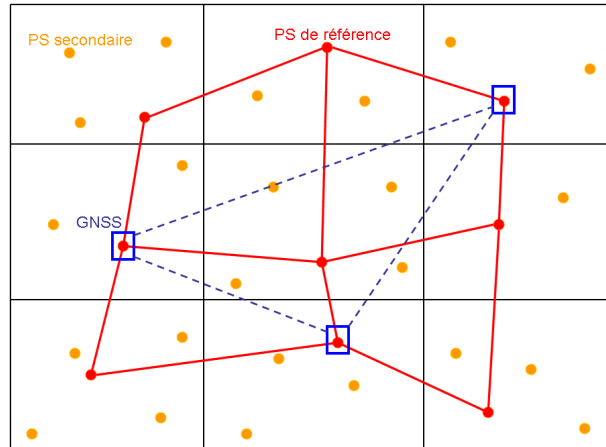


FIGURE 11 – Exemple de réseau PS et GNSS. Les PS présents sur l'ensemble des interférogrammes sont divisés en deux catégories : les PS de référence (rouge) et les PS secondaires (orange). A partir des PS de référence, on forme un réseau de points par triangulation de Delaunay. Certains PS correspondent également à des récepteurs GNSS (rectangle bleu). Un réseau GNSS est formé à partir de l'ensemble des PS disposant d'un récepteur GNSS.

phases interférométriques et les ambiguïtés sur les doubles différences de phase GPS étaient considérées connues. Les paramètres estimés par cet algorithme ont été comparés à ceux d'un algorithme STUN simplifié (aucun déroulement de phase, pas de pondération des mesures). Nous avons ainsi pu montrer que l'utilisation des mesures GPS permettait de retrouver de manière plus précise les valeurs théoriques de déplacement vertical et d'erreur de MNT. En effet, sans utiliser de mesures GPS, la valeur moyenne de l'erreur sur le MNT estimée pour l'ensemble des PS est d'environ 0.03m avec une précision de 0.09m. L'erreur moyenne sur la détermination de la vitesse de déplacement est de -0.05 mm/an avec une précision de 0.86 mm/an. En utilisant les mesures GPS, l'erreur moyenne sur l'estimation de l'erreur de MNT ainsi que l'erreur moyenne sur l'estimation de la vitesse de déplacement sont très fortement améliorés, ainsi que leurs précisions de détermination.

Les résultats obtenus par la mise en oeuvre d'une combinaison directe des observations de phase GNSS et PSInSAR en utilisant le principe de l'algorithme STUN sont prometteurs, mais nécessitent d'être approfondis. En particulier, dans cette approche, le système est actuellement mal conditionné et l'utilisation de données réelles conduirait à des valeurs estimées aberrantes. De plus, pour l'instant, le problème de résolution des ambiguïtés de phase (GNSS et InSAR) n'est pas traité. Une piste actuellement envisagée pour la poursuite de ces travaux est d'utiliser non pas les mesures de phase GNSS brutes, mais le vecteur 3D GNSS issu de leur traitement par un logiciel spécialisé. Cette approche, utilisée également pour la combinaison de mesures GNSS et topométriques, possède l'avantage de conserver en grande partie l'information apportée par les mesures GNSS, tout en simplifiant la mise en oeuvre de l'algorithme et en éliminant le problème de résolution des ambiguïtés sur les mesures de phase GNSS.

Depuis 2016, notre laboratoire cherchait à poursuivre ce travail dans le cadre d'une thèse, et nous avons cherché activement des moyens de financement pour aboutir en avril 2018 au lancement de la thèse de Abdeljalil Nahli dans le cadre d'une convention Cifre avec l'entreprise Cementys.

La société Cementys, créée en 2008, est spécialisée dans l'instrumentation, la surveillance et l'optimisation de la maintenance des infrastructures vieillissantes. Elle développe et exploite depuis de nombreuses années des capteurs à corde vibrante et à fibre optique pour la surveillance automatisée d'infrastructures très diversifiées : ponts, quais, centrales nucléaires, tunnels, canalisations, plateformes offshore, réservoirs, ... Depuis quelques années, la société Cementys cherche à acquérir un savoir-faire et une expertise sur l'utilisation des techniques issues de la géomatique pour la surveillance d'infrastructures, en particulier les techniques GNSS et InSAR. Elle cherche également à développer des savoir-faire inédits dans ces domaines, afin d'être plus concurrentielle sur un marché en pleine expansion. En tant qu'enseignant à l'ESGT, j'ai eu l'occasion à plusieurs reprises depuis 2013 de collaborer avec l'entreprise Cementys dans le cadre de stages de fin d'études d'étudiants du cycle ingénieur de l'ESGT, en tant qu'enseignant référent ou co-encadrant. C'est ainsi que fin 2016, j'ai pu entamer des discussions avec cette entreprise pour aboutir à la définition du sujet et au lancement de la thèse d'Abdeljalil Nahli.

Le contexte de cette thèse est la mesure fine des tassements 3D subis par des ouvrages d'arts, des bâtiments ou des infrastructures en exploitant de manière optimale et combinée les techniques GNSS et PsInSAR. Le premier objectif de ce travail est de mettre en place des chaînes de traitement optimisées pour les techniques PsInSAR et GNSS, adaptées au contexte de surveillance d'ouvrages d'arts, sur un ou plusieurs objets d'études. Au cours de cette première année de thèse, nous avons sélectionné et commencé à instrumenter deux objets d'études particuliers : un tronçon de la ligne 14 du Grand Paris Express, pour lequel la société Cementys a obtenu un marché pour la surveillance de déformation en surface lors de la phase de creusement des tunnels de l'extension de la ligne et le pont de Wadi Lelan en Arabie Saoudite, d'une longueur de 800m. Au niveau GNSS, des récepteurs GNSS bas coût sont privilégiés, et la société Cementys développe actuellement des prototypes basés sur des puces u-blox afin d'optimiser le rapport coût/performance. Au niveau PsInSAR, nous avons développé et mis en place des corner reflectors adaptés à la bande X (Cosmo-Skymed et TerrasarX), qui offrent la possibilité d'intégrer une antenne GNSS.

Le second objectif de ce travail de thèse sera de mettre en place différentes possibilités de combinaisons des techniques PsInSAR et GNSS, avec pour objectif d'améliorer la précision de mesure de déformation des différents points de l'ouvrage, en tenant compte pour chaque type d'ouvrage de la ou des directions pertinentes de déformation. La combinaison des positions ou déplacements mesurés par chaque technique est la technique la plus largement employée en géosciences pour l'étude de déformations géophysiques (cf. [Hammond et al. 2010], [Wei et al. 2010], [Vasco et al. 2007]). Nous chercherons dans un premier temps à appliquer et optimiser ce type de techniques dans le cadre particulier de la surveillance d'ouvrages d'arts. Nous développerons également des méthodes optimales de combinaison comme cela a été proposé dans [Chang2016], qui réalise une inversion combinée des données pour reconstruire le mouvement de la série temporelle de position selon un test d'hypothèse. Enfin, nous poursuivrons nos travaux sur le développement d'une méthode de combinaison directe des mesures de phase interférométriques sur réflecteurs permanents PsInSAR avec des vecteurs GNSS, basée sur l'idée de traitement différentiel de [Kampes 2006].

Maitriser la pondération relative entre les techniques

Dès lors que l'on combine, dans un processus d'ajustement, des observations de natures différentes, se pose la question de leur pondération relative. S'il est bien sur possible de fixer de manière empirique

rique les pondérations relatives entre les types d'observations ou les différentes techniques mises en oeuvre, on peut également chercher à estimer les valeurs des pondérations relatives. F.R. Helmert (cf. [Helmert 1907]) a le premier proposé une solution au problème d'estimation des pondérations relatives entre des groupes d'observations, posant la base des méthodes d'estimation des composantes de la variance (VCE). Le principe revient simplement à complexifier, dans le modèle de Gauss-Markov de l'équation 8, la forme de la matrice de covariance associée aux erreurs accidentelles de mesures, pour faire apparaître p groupes d'observations (cf. [Bähr et al. 2007]) :

$$Q_L = Q_0 + \sum_{i=1}^p s_i^2 Q_i \quad (7)$$

Dans cette expression, pour $i > 1$, s_i^2 est le coefficient VCE associé au groupe i d'observations et Q_i la matrice de covariance a priori sur ce groupe. La matrice Q_0 représente éventuellement une partie déterministe de la matrice Q_L , qui dans la plupart des applications est considérée nulle. L'objet d'une méthode VCE est d'estimer à partir des observations, les coefficients s_i^2 optimaux au sens de la méthode des moindres carrés.

Depuis la première proposition d'Helmert en 1907, de nombreux estimateurs ont été développés pour l'estimation des composantes de la variance, regroupés en deux familles. Les estimateurs rigoureux, dont l'estimateur de Helmert fait partie, et les estimateurs approximatifs. Les premiers sont issus de raisonnements mathématiques et statistiques exacts ; tandis que les seconds sont obtenus en considérant, dans la construction des estimateurs, certains éléments négligeables ou en les approximant. L'intérêt des estimateurs approximatifs est le gain important sur le temps de calcul, par rapport à la dégradation observée sur les résultats.

Pour les travaux menés au sein du laboratoire GEF, cette question de la pondération optimale des observations est cruciale, qu'il s'agisse de combiner des techniques différentes (topométrie/GNSS ou GNSS/InSAR) ou des observations à l'intérieur d'une technique. Des travaux en ce sens ont déjà été réalisés par différents groupes par le passé. Dans [Bähr et al. 2007] par exemple, les auteurs font usage des techniques VCE pour combiner les résultats de différentes techniques de géodésie spatiale (GNSS, VLBI, SLR, DORIS) pour la réalisation de repères de référence terrestre. Dans [Sahin et al. 1992], la technique VCE est appliquée à des mesures SLR⁶⁰, issues de deux systèmes d'observation différents (laser à rubis et technique YAG). Dans [Amiri et al. 2009], la technique VCE est appliquée pour estimer la covariance sur les mesures GNSS. Dans [Kampes 2006], la VCE est employée pour estimer la covariance associée aux différences de phases interférométriques pour un arc et un ensemble d'interférogrammes.

Lors de la thèse de Benoit Legru et des travaux de Angélique Azzini, nous avons fait le choix de ne pas investiguer directement la question de la pondération relative des observations, et utilisé une pondération relative empirique, pour concentrer nos efforts sur les apports de la combinaison des techniques en terme de précision. Ce n'est qu'en 2015, dans le cadre du TFE de Mailys Bucher, que nous avons pu nous concentrer sur la question de l'estimation des pondérations relatives entre les mesures. Dans ce TFE, l'étudiante s'est intéressée aux différentes méthodes d'estimation des composantes de la variance existantes. Outre la méthode de Helmert, présentée en détail dans

60. Satellite Laser Ranging

[Grafarend et al. 1980], de nombreuses méthodes VCE ont été développées depuis une vingtaine d'années : MINQUE - Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation (cf. [Rao 1971]), BIQUE - Best Invariant Quadratic Unbiased Estimation (cf. [Koch 1986]), ML - Maximum Likelihood et REML - Restricted Maximum Likelihood (cf. [van Loon 2008]), AUE - Almost Unbiased Estimation (cf. [Horn et al. 1975]), LSVCE - Least Squares Variance Component Estimation (cf. [Teunissen 2008]), Fröstner (cf. [Förstner 1979]). Comme précisé dans [Bähr et al. 2007], dans le cas de mesures normalement distribuées, la plupart des estimateurs sont équivalents à celui de Helmert. Ainsi, le travail de Mailys Bucher s'est concentré sur l'implémentation et la mise en oeuvre de l'estimateur de Helmert dans le cas d'une combinaison des mesures topométriques et GNSS, avec comme brique principale le logiciel CoMeT. La méthode de Helmert pouvant conduire à des résultats aberrants (coefficients VCE négatifs), la méthode LS-VCE a également été implémentée et testée. A partir de données réelles, elle a montré que ces méthodes pouvaient être appliquées avec succès au cas de la combinaison des techniques GNSS et topométriques. Son travail a conduit à l'intégration dans le logiciel CoMeT de ces méthodes d'estimation des composantes de la variance.

Le travail de Mailys Bucher a soulevé de nombreuses questions sur l'utilisation de la VCE dans le cadre de l'ajustement combiné de mesures topométriques de différents types (angles, distances, dénivelées) et de mesures GNSS (vecteurs 3D avec covariance) dans le contexte de la détermination précise de déplacements, où l'on est amené à s'intéresser à des séries temporelles de données : faut-il estimer un coefficient VCE par type de technique, par type d'observation ? Quelle est l'influence du nombre de groupes VCE formés sur l'évolution des coordonnées ajustées dans une série temporelle ? Quelle influence aura sur l'estimation des coefficients VCE la présence de fautes dans les mesures ? Comment varient les coefficients VCE estimés en cas de déplacement d'un point ?

La réalisation de tests sur le comportement des méthodes VCE, dans le cadre de la combinaison de techniques GNSS/topométrie ou GNSS/PSInSAR, mais également dans le cadre de la combinaison de mesures topographiques (nivellement, tachéométrie, ...) nécessite de disposer d'observations. Entre 2015 et 2016, mes travaux se sont donc orientés dans deux directions complémentaires. D'un côté, la poursuite du développement d'une méthodologie de génération d'erreurs accidentelles compatible avec l'exploitation des observations générées à la fois pour l'inter-validation, l'inter-comparaison de logiciels d'ajustement et l'étude des méthodes VCE. L'avantage de l'utilisation de mesures générées est de permettre d'étudier le comportement des techniques VCE dans différents cas de figure. D'un autre côté, le développement d'outils permettant l'acquisition de mesures réelles, sur un réseau particulier. Le TFE de Sébastien Alliez Dron en 2016, a permis de débiter les investigations sur cet aspect. Son travail a dans un premier temps consisté à mettre en place un réseau de mesures automatisé et continu, combinant observations tachéométriques et GNSS. Outre le développement de logiciels de pilotage des différents instruments, il a créé une première chaîne de prétraitement des données, permettant leur intégration et leur ajustement à l'aide du logiciel CoMeT. Dans une seconde partie de son TFE, Sébastien Alliez Dron a testé différentes manières de former les groupes d'observations pour étudier leur influence sur les coordonnées ajustées des points, les précisions obtenues et les valeurs estimées des coefficients VCE.

La figure 12 (à gauche), illustre la géométrie du réseau test mis en place. Les points *A* et *B* sont connus en coordonnées, équipés de stations totales robotisées (précision angulaire de 0.3 mgrad, précision en distance de $\pm 1\text{mm} \pm 1\text{ppm}$), de prismes (permettant des mesures de lectures horizontales depuis l'autre point connu) et de récepteurs GNSS. Les points *C* et *D* sont de coordonnées inconnues, équipés de prismes permettant des mesures angulaires et de distances depuis les points connus et de récepteurs GNSS. La figure 12 (à droite) présente les valeurs des coefficients VCE estimés par session de 30 minutes, en considérant un groupe pour les mesures GNSS et un groupe pour les

mesures topométriques, lors de la campagne de mesures du 9 au 11 juin (48h de données).

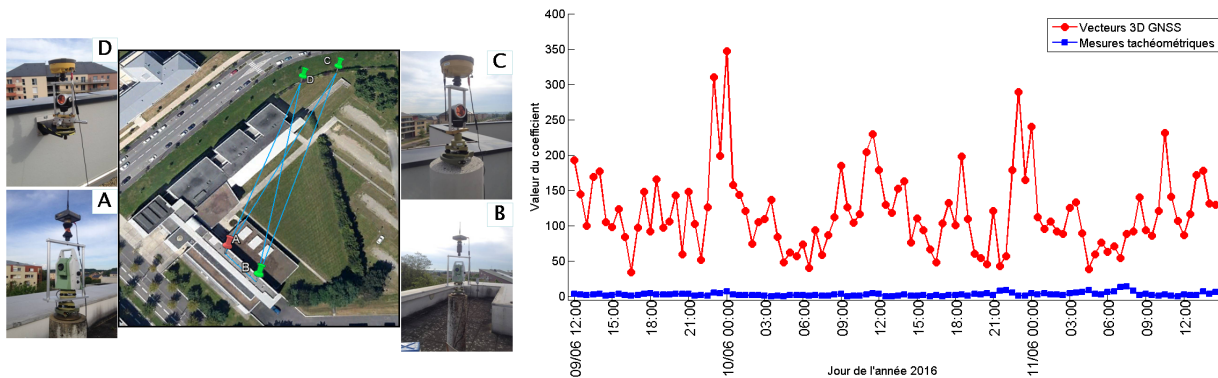


FIGURE 12 – A gauche : réseau d’observation mis en place sur le toit de l’ESGT (2 stations totales, 4 récepteurs GNSS, 4 prismes). A droite : évolution des coefficients VCE associés aux vecteurs 3D GNSS (points rouges) et aux mesures tachéométriques (carrés bleus).

Plusieurs éléments peuvent être relevés sur la figure 12. Le coefficient VCE estimé pour les mesures tachéométriques est en moyenne de 2.7, ce qui signifie qu’à l’issue du traitement VCE, le poids associé à ces mesures est multiplié d’un facteur $\frac{1}{2.7}$. Sur les 48 heures de données, l’écart type pour la valeur estimée du facteur VCE pour les mesures tachéométriques est de 2.5. Le coefficient estimé pour les mesures GNSS est en moyenne de 118 avec un écart type de 57. Ainsi, on constate que suite à la détermination des coefficients VCE, le poids attribué aux mesures GNSS est largement diminué (d’un facteur $1/118$). On constate également une forte variabilité du coefficient VCE associé aux mesures GNSS.

Développer et maîtriser les outils de combinaison de techniques

Peu après mon recrutement en tant que maître de conférences à l’ESGT, j’ai souhaité faire correspondre une partie de mon activité de recherche avec mon activité d’enseignement en topométrie de précision. Le logiciel CoMeT (COmpensation de MEsures Topographiques) est né de ma volonté, en 2007, d’illustrer et de maîtriser plus sûrement les concepts d’ajustement 3D des observations topographiques que j’enseignais aux étudiants, qui font appel non seulement à la topographie, mais également à la géodésie.

Dès lors que l’on dispose d’un instrument topographique, qu’il s’agisse d’une station totale, d’un niveau, d’un récepteur GNSS, d’un prisme, d’une mire, ou autre, placé sur un point M , l’axe naturel privilégié est celui de la direction du fil à plomb en M , la verticale locale. Il est alors naturel de définir au point M un repère lié à la verticale locale, dont l’axe Z correspond à la direction du fil à plomb, orienté positivement vers le zénith, avec un axe Y orienté vers le Nord et un axe X vers l’Est, souvent appelé Repère Local Astronomique (RLA) en M . Dans ce repère local, les équations d’observation associées aux mesures topométriques standards (angles, distances, dénivelées, ...) à l’exception des mesures GNSS, sont relativement simples à exprimer en fonction des coordonnées du point visé et du point stationné.

Lorsque l'on souhaite ajuster un ensemble d'observations réalisées en des points différents, on doit tenir compte des différents repères locaux astronomiques associés aux différents points du réseau, qui, du fait de la sphéricité de la Terre, ne sont pas parallèles. Pour des réseaux de petite taille, où lorsque la précision recherchée n'est pas critique, on peut faire l'hypothèse que les repères locaux astronomiques de l'ensemble des points du réseau sont identiques, à des translations près. Cette méthode, que nous appellerons modélisation 3D locale, a l'avantage de la simplicité, et peut être raffinée par l'ajout de corrections aux observations pour tenir compte en partie de la sphéricité de la Terre, comme cela est le cas dans différents logiciels métiers tels que Covadis ou TopStation. Pour des réseaux plus étendus, ou lorsque la précision recherchée est plus critique, il est primordial de tenir compte effectivement dans le traitement des orientations différentes des repères locaux astronomiques associés aux points du réseau. L'objectif est alors d'intégrer dans les équations d'observation les matrices de rotations entre les différents repères locaux astronomiques, pour exprimer toutes les équations d'observations soit par rapport aux coordonnées dans le repère local astronomique d'un point de référence, soit par rapport à des coordonnées géocentriques. Deux manières de modéliser la sphéricité de la Terre peuvent alors être employées.

Pour des réseaux peu étendus, typiquement moins de 1km carré, on peut faire usage d'une modélisation 3D Sphérique. Etant donné un ellipsoïde de référence et la donnée d'une latitude moyenne pour le réseau, on tient alors compte de la sphéricité de la Terre en l'approximant par une sphère, tangente à l'ellipsoïde au barycentre des coordonnées des points du réseau, dont le rayon dépend des caractéristiques (excentricité et aplatissement) de l'ellipsoïde choisit. Les équations d'observation pour les mesures topographiques sont exprimées par rapport aux coordonnées sphériques des points. Cette modélisation permet également l'intégration de vecteurs GNSS. Différents logiciels proposent ce type de modélisation, dont les logiciels CoMeT, Comp3D de l'IGN ou Columbus de la société Bestfit Computing.

Dans le cas plus général, si l'on veut tenir compte au plus près de la forme de la Terre, il sera nécessaire d'utiliser une modélisation 3D géodésique. Dans ce cas, pour des raisons pratiques, on modélise la forme de la Terre par un ellipsoïde de révolution, et on utilise la notion de coordonnées sur l'ellipsoïde pour se repérer à la surface de la Terre. On est donc amené à considérer en chaque point M un Repère Local Ellipsoïdal (RLE), défini par un axe Z correspondant à la direction de la perpendiculaire à l'ellipsoïde en M (positif vers le zénith), un axe Y orienté vers le Nord et un axe X orienté vers l'Est. La différence entre le repère local astronomique (RLA) et le repère local ellipsoïdal (RLE) en un point est directement liée à la notion de déviation de verticale, décomposée sous la forme d'un angle dans la direction Nord-Sud et d'un angle dans la direction Est-Ouest. Suivant le cas, on tiendra compte des composantes de la déviation de la verticale par mesures in situ, modélisation à partir d'une grille d'ondulation de géoïde, ou estimation dans le processus d'ajustement. Les équations d'observation pour les mesures topographiques courantes sont alors exprimées d'abord dans le repère local ellipsoïdal associé au point stationné, puis par rapport aux coordonnées ellipsoïdales géocentriques. Ce type de modélisation, employée par de nombreux logiciels tels que CoMeT, Geolab, Columbus, Trinet+, PANDA, etc, permet également l'intégration de vecteurs 3D GNSS.

En tant que démonstrateur du cours de topométrie de précision, le logiciel CoMeT intègre ces différentes modélisations de la sphéricité de la Terre. Il permet la compensation de mesures topographiques et de vecteurs GNSS par la méthode des moindres carrés ainsi que la pré-analyse des qualités géométriques d'un réseau de points. Il intègre différents tests statistiques pour la recherche de fautes dans les données, et permet de calculer des régions de confiance et des indicateurs de fiabilités (lo-

cales, interne, externe). Il a été utilisé dès 2007 dans mes activités de recherche, dans le cadre de la thèse de Benoit Legru, où il a permis de calculer et générer les matrices normales liées aux mesures topométriques, pour la simulation et l'ajustement des réseaux.

Tout au long du développement du logiciel CoMeT, les étudiants de l'ESGT ont été impliqués, par le biais de stages ou de projets. En 2008, dans le cadre d'un projet de dernière année, un groupe d'étudiants s'est intéressé à comparer les fonctionnalités de différents logiciels d'ajustement de mesures topographiques, dont les applicatifs métier Covadis et TopStation couramment utilisés dans la profession de géomètre topographe. En 2010, un autre groupe d'étudiants, dans le même cadre, a développé une interface web pour l'utilisation en ligne du logiciel CoMeT. Cette interface a été active jusqu'en 2013 et permettait aux étudiants dans le cadre de l'enseignement de topométrie de précision en dernière année, d'utiliser à distance le logiciel CoMeT pour le design de réseaux et l'analyse de leurs qualités. Si CoMeT a été intégré dès 2007 dans les activités de recherche du laboratoire, son utilisation dans le cadre des enseignements de l'ESGT s'est fait de manière plus progressive, car nécessitait le développement d'une interface graphique complète et conviviale. A partir de 2010, CoMeT a été uniquement utilisé dans le cadre de l'option de topométrie de précision en dernière année du cycle ingénieur ESGT, par le biais de l'interface web développée par les étudiants en 2010 puis d'une interface graphique à partir de 2013. En 2016, un projet d'étudiants a permis de valider entièrement l'interface graphique et le bon fonctionnement de CoMeT pour les besoins de la formation ingénieur ESGT. CoMeT est ainsi utilisé à l'ESGT depuis 2016 (en remplacement de l'outil professionnel Geolab) pour l'ajustement et la pré-analyse de réseaux en topométrie de précision et géodésie.

Le développement du logiciel CoMeT m'a conduit dès 2007 à m'intéresser à la question de sa validation, par inter-comparaison avec d'autres logiciels. L'intérêt de l'inter-comparaison des résultats issus de différents logiciels d'ajustement est multiple. D'un point de vue des professionnels (géomètres et topographes), l'utilisation d'un logiciel métier tel que Covadis ou TopStation regroupant, en un seul outil, non seulement la possibilité d'ajuster en bloc des observations, mais également un ensemble de fonctionnalités métier (calculs topographiques, dessin assisté, voiries urbaines, conception d'infrastructures routières, calculs hydrauliques, métrés, ...) est largement plus productif que l'utilisation d'outils spécialisés séparés. Il est donc important pour la profession de connaître l'impact sur les résultats de l'ajustement, de l'utilisation du logiciel métier par rapport à un logiciel spécialisé d'ajustement de réseaux faisant usage d'un modèle 3D géodésique. Ceci afin de pouvoir choisir, en fonction de la taille du chantier et de la précision requise, l'outil le plus adapté. Pour ce qui est du développement du logiciel CoMeT, l'inter-comparaison avec d'autres logiciels proposant les mêmes types de modélisations permet de valider son bon fonctionnement. Enfin, d'un point de vue de la recherche, même lorsque deux logiciels sont basés sur les mêmes concepts mathématiques, il peut exister des différences au niveau de leur implémentation informatique conduisant à des différences dans les résultats fournis. L'inter-comparaison de logiciels permet alors de quantifier l'impact du logiciel utilisé sur les résultats obtenus. Elle permet également d'évaluer l'influence du choix des paramètres de traitement sur les résultats.

La difficulté de l'inter-comparaison de logiciels est de disposer d'une maîtrise suffisante de chacun, pour ne pas introduire de biais dans les résultats du fait de leur usage non optimal. Dans les quelques années passées, plusieurs études ont été publiées sur la comparaison entre logiciels d'ajustement. Dans [Lösler et al. 2010] et [Schwieger et al. 2010] les auteurs ont comparé plusieurs logiciels commerciaux et libres d'ajustement de mesures topographiques. En utilisant les mesures associées à

un réseau topographique particulier, ils ont comparé les coordonnées ajustées des points du réseau ainsi que différents indicateurs de qualité. Dans [Hermann et al. 2015], les auteurs ont comparé le logiciel Spatial Analyzer, de la société New River Kinematics, avec différents logiciels d'ajustement : Gnu Gama, JAG3D, Move3 (utilisé dans le logiciel professionnel Leica GeoOffice), Netz3D et NetzCG. Spatial Analyzer utilisant une modélisation particulière pour la prise en compte de la sphéricité de la Terre, et afin de produire des résultats comparables, les auteurs ont utilisé les mesures associées à un petit réseau de points, avec une distance maximale entre les points de 30m environ. Il ont comparé les coordonnées estimées obtenues par chaque logiciel ainsi que les précisions a posteriori sur l'ensemble des coordonnées et ont constaté des écarts de 0.4 mm maximum entre les logiciels, attribués aux différences de modèles utilisés par les logiciels.

Dans les différents travaux de comparaison de logiciels d'ajustement, un, plus rarement deux jeux d'observations réelles sont utilisés. Si l'utilisation de données réelles permet de vérifier la capacité des logiciels à traiter des cas réels, elle ne permet pas facilement de réaliser des études comparatives sur l'influence de tel ou tel paramètre physique ou stochastique du réseau, ni d'étudier le comportement des logiciels dans des cas singuliers. Je me suis donc attaché, dans mes travaux de comparaison de logiciels d'ajustements topographiques, à utiliser des observations générées dans lesquelles le modèle fonctionnel et également le modèle stochastique sont parfaitement maîtrisés. Dans ce cas, il ne s'agit plus de savoir quel logiciel permet de modéliser au plus juste les observations, mais d'étudier les différences entre les logiciels au niveau du modèle fonctionnel, ainsi que l'influence des paramètres de traitement.

Le TFE de Clément Guérin en 2010 constitue le premier travail de comparaison quantitatif de logiciels d'ajustements. Après avoir recensé une partie des logiciels existants, il s'est particulièrement intéressé à comparer les fonctionnalités de quelques logiciels : CoMeT, Geolab, Columbus, Comp3D et Covadis. Il a également comparé les résultats obtenus par ces logiciels sur différents jeux de données réels, au niveau des coordonnées ajustées et de la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance. Dans son TFE, nous avons également voulu observer l'influence de la taille du réseau sur le comportement des différents logiciels d'ajustement, avec pour objectif de définir de manière chiffrée les limites en terme de taille de réseau, de l'utilisation de logiciels faisant usage d'un modèle 3D local ou sphérique par rapport à un logiciel utilisant un modèle 3D Géodésique. Clément Guérin a ainsi construit différents jeux d'observations topographiques, sur des réseaux de forme identique mais de tailles différentes, et a comparé les résultats obtenus lors de l'ajustement de ces différents jeux d'observations par les différents logiciels (cf. [Durand et Guérin 2012]). Ce travail a été poursuivi en 2014-2015 par Benjamin Girardot en qualité d'assistant de recherche bénévole, par l'intégration aux comparaisons des logiciels TopStation de JSInfo et Trinet+ de la Heig-VD⁶¹.

Ce travail d'inter-comparaison de logiciels d'ajustement m'a conduit à développer des contacts ou des collaborations avec différentes sociétés ou organismes, en France et à l'étranger : les sociétés JsInfo (Topstation) et Geomedia (Covadis), le CERN, qui développe et exploite depuis de nombreuses années le logiciel LGC, la Heig-VD qui a développé en partenariat avec l'université de Muttenz le logiciel Trinet+. En 2015, j'ai ainsi été mandant lors du travail de Bachelor de Sébastien Chappuis, étudiant de la Heig-VD, portant sur la comparaison des logiciels Trinet+, utilisant une modélisation 3D géodésique, et LTOP de l'Office Fédéral Suisse de Topographie Swisstopo, qui réalise l'ajustement des mesures en séparant les composantes planimétriques et altimétriques (2D+1). Son travail a consisté à comparer la compensation de ces deux logiciels en leur donnant des observations et

61. Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

coordonnées approchées théoriquement "parfaites", c'est à dire dénuées d'erreurs accidentelles. Les différents tests ont mis en évidence que l'ajustement réalisé par LTOP présentait des biais significatifs pour une distance entre les points supérieure à 500 m et en présence d'une forte dénivelée entre les points (angles zénithal proche de zéro), et que Trinet+ était le logiciel le plus adapté dans ce cas.

Dès lors que l'on a fixé une géométrie particulière pour un réseau de points, c'est à dire décidé des positions des différents points du réseau et des types d'observations entre les points, et fait le choix d'un modèle fonctionnel, il est possible de générer des observations sans erreurs accidentelles pour l'ensemble des observations du réseau. On peut alors ajouter à ces observations parfaites une erreur accidentelle, en supposant par exemple un comportement gaussien et en tenant compte de la précision a priori des observations. Les mesures ainsi générées peuvent servir à comparer les modèles fonctionnels utilisés dans différents logiciels. Le problème est que les valeurs d'erreurs accidentelles générées suivant la loi normale de manière aléatoire peuvent conduire, pour un ensemble de réseaux, à des comportement très différents des logiciels : nombre d'itérations de calcul plus ou moins important, nombre de résidus rejetés variable, valeur très diverses de l'estimateur du facteur unitaire de variance. Lorsque l'on compare les résultats issus de différents logiciels sur les données générées d'un seul réseau, cela n'est pas problématique. Lorsque l'on souhaite comparer des logiciels sur un ensemble de réseaux, cela complique grandement le travail de comparaison et de synthétisation des résultats.

Dans [Durand et Guérin 2012], pour solutionner ce problème nous avons dans un premier temps généré aléatoirement des erreurs accidentelles suivant la loi normale, en prenant en compte la précision a priori sur l'observation. Dans un second temps, ces valeurs d'erreurs accidentelles ont été modifiées pour que leur ajustement en utilisant le même modèle fonctionnel que lors de leur génération permette l'obtention d'un estimateur du facteur unitaire de variance proche de 1.

Entre 2014 et 2015, j'ai particulièrement développé cette approche, du point de vue théorique. Elle permet aujourd'hui de faciliter la génération d'observations dans des réseaux de tailles ou géométries variables, ainsi que l'analyse des résultats de leur ajustement par différents logiciels. Le principe mis en oeuvre est succinctement expliqué ci-après.

Les logiciels d'ajustement de mesures topographiques utilisent la méthode des moindres carrés pour ajuster les coordonnées des points aux observations. Supposons qu'un vecteur d'inconnues $X = (x_1, \dots, x_m)^T$, de taille m , doit être estimé à partir d'un ensemble de n observations $L = (l_1, \dots, l_n)^T$, avec $n \geq m$. Dans la méthode classique des moindres carrés, les vecteurs X et L sont reliés par l'équation :

$$L = f(X) + V, V \sim \mathcal{N}(0, Q_L), Q_L = s_0^2 Q \quad (8)$$

dans laquelle f représente le modèle fonctionnel liant les mesures et les inconnues, V le vecteur des erreurs accidentelles, Q_L la matrice de covariance associée aux erreurs accidentelles, composée de s_0^2 , le facteur unitaire de variance et Q la matrice de covariance a priori. L'équation 8 suppose qu'aucune erreur systématique n'est présente dans les mesures et que seules des erreurs accidentelles sont considérées. Il est possible d'utiliser directement l'équation 8 pour générer des observations pour un réseau :

$$L_d = f(X_{th}) + V_d \quad (9)$$

Dans cette équation, L_d représente le vecteur des mesures générées, X_{th} correspond aux coordonnées théoriques des points du réseau et $f(X_{th})$ aux valeurs théoriques des observations, calculées en utilisant un modèle fonctionnel particulier et V_d aux valeurs générées des erreurs accidentelles. Le vecteur V_d doit bien entendu être issu de la loi normale centrée et tenir compte des précisions a priori sur les observations. Comme indiqué dans [Caspary 2000], dans la méthode itérative des moindres carrés, l'équation 8 est linéarisée en utilisant un développement de Taylor à l'ordre 1 autour d'une solution approchée X_0 :

$$B = L - f(X_0) = A(X - X_0) + V, \quad V \sim \mathcal{N}(0, s_0^2 Q) \quad (10)$$

Pour la génération des observations sur nos réseaux tests, le vecteur X_{th} est utilisé d'abord pour construire les mesures théoriques, puis, dans le processus d'ajustement, comme valeurs approchées des coordonnées des points. Le vecteur d'erreurs accidentelles V_d ajouté aux mesures théoriques permet d'assurer que lors de l'ajustement des observations avec le même modèle fonctionnel f que celui utilisé pour leur génération, et en utilisant comme coordonnées approchées X_0 les valeurs théoriques X_{th} utilisées pour la génération des mesures, la solution ajustée obtenue correspondra exactement à X_{th} .

Supposons que l'on dispose d'un vecteur L_d d'observations, générées en utilisant un modèle fonctionnel f et des valeurs théoriques de coordonnées X_{th} pour les points. On cherche maintenant à ajuster ces observations en utilisant le même modèle fonctionnel f et comme valeurs approchées des inconnues, le vecteur $X_0 = X_{th}$. Lors de la première itération du processus d'ajustement itératif par moindres carrés (issu de l'équation 10), on obtient :

$$B = L_d - f(X_{th}) = A(X - X_{th}) + V \quad (11)$$

Notons $P = Q^{-1}$ la matrice de poids associée aux observations, la solution des moindres carrés pour la première itération donne :

$$\hat{X} - X_{th} = (A^T P A)^{-1} A^T P V_d \quad (12)$$

Si on s'arrête à cette première itération, on peut former le vecteur des résidus :

$$\hat{V} = B - A(\hat{X} - X_{th}) = V_d - A(\hat{X} - X_{th}) \quad (13)$$

Ainsi, s'il est possible de trouver un vecteur $V_d \neq 0$ pour lequel $\hat{X} - X_{th} = 0$, alors le processus itératif des moindres carrés s'arrête et la solution ajustée finale \hat{X} correspond exactement à la valeur approchée $X_0 = X_{th}$. Dans ce cas également, le vecteur des résidus \hat{V} correspond exactement au vecteur V_d des erreurs accidentelles utilisé lors de la génération des observations. En notant R la matrice triangulaire supérieure issue de la décomposition de Cholesky de la matrice P , et en posant $K = (A^T P A)^{-1} A^T R^T$, on montre que cette condition est respectée si le vecteur V_d appartient au noyau de l'application K .

Nous avons également intégré deux autres conditions pour la construction du vecteur V_d des erreurs accidentelles associées aux observations générées. À l'issue d'un ajustement par moindres carrés, comme précisé dans [Casparly 2000], il est courant de réaliser un test global de validation, comme première étape dans le processus de recherche de fautes éventuelles dans les mesures. Le test statistique utilisé est :

$$T = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{s_0^2} = \frac{(n-m)\hat{s}_0^2}{s_0^2} \sim \chi_{n-m}^2 \quad (14)$$

expression dans laquelle :

$$\hat{s}_0^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{n-m} \quad (15)$$

correspond à l'estimateur du facteur unitaire de variance. La valeur centrale pour la distribution χ_{n-m}^2 est $n-m$, le degré de liberté du problème. Ainsi, si on peut former un vecteur V_d tel que $\hat{V}^T P \hat{V} = (n-m)s_0^2$, on peut assurer que la conclusion du test de validation globale sera toujours un succès, quelle que soit la valeur du risque de première espèce α choisie. Un autre test statistique couramment utilisé pour détecter la présence de fautes dans les observations dans le cas d'erreurs normalement distribuées est le test dit de Baarda (cf. [Casparly 2000]). Ce test fait l'hypothèse que la valeur s_0^2 est connue, et est basé sur la notion de résidu normé défini par :

$$\forall i = 1, \dots, n, w_i = \frac{\hat{v}_i}{s_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} \quad (16)$$

Ici, \hat{v}_i désigne l'élément i du vecteur \hat{v} et $q_{v_i v_i}$ l'élément (i, i) de la matrice des cofacteurs $Q_{\hat{V}}$ sur les résidus \hat{V} :

$$Q_{\hat{V}} = Q - A (A^T P A)^{-1} A^T \quad (17)$$

Pour un seuil de confiance $1 - \alpha$ donné, il est possible de calculer un intervalle de valeurs $\omega_0 = [-\gamma, \gamma]$, en utilisant la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$. Aucune erreur n'est détectée (au seuil $1 - \alpha$) sur l'observation i si la valeur du résidu normé w_i se trouve dans l'intervalle ω_0 .

Afin de créer des valeurs d'erreurs accidentelles pour les observations générées sur les réseaux tests, nous avons construit le vecteur V_d de telle sorte qu'il satisfasse aux conditions suivantes :

- (a) V_d appartient au noyau de l'application K
- (b) $V_d^T P V_d = (n-m)s_0^2$
- (c) $\forall i, w_i \in [-\gamma, \gamma]$, étant donné un seuil de confiance $1 - \alpha$.

Le modèle fonctionnel utilisé pour la génération des observations est le modèle 3D Géodésique intégré dans le logiciel CoMeT. Ces conditions permettent, lorsque l'on ajuste ces observations générées à l'aide d'un autre logiciel utilisant un modèle fonctionnel proche de celui utilisé par CoMeT d'obtenir :

- (a) en une seule itération une solution ajustée \hat{X} correspondant exactement aux valeurs théoriques $X_{th} = X_0$

- (b) une valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance proche de 1, validant le test de validation globale, et d'une certaine manière le caractère normal du vecteur des erreurs accidentelles utilisé
- (c) pour chaque observation, la validation du test de Baarda au seuil de confiance $1 - \alpha$ (i.e. aucune faute détectée sur l'observation)

Cette méthode de génération des erreurs accidentelles possède quelques différences intéressantes par rapport aux pratiques habituelles. Par rapport à la génération aléatoire d'erreurs accidentelles suivant la loi normale en tenant compte de la précision a priori des mesures, elle permet de contrôler le processus d'ajustement (convergence en une itération - solution ajustée identique à la solution approchée). Elle permet également d'assurer la validation de l'ensemble des résidus (test de Baarda) et de permettre un contrôle de la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance obtenue. Une description complète de la méthode, et une discussion par rapport aux autres pratiques existantes ont fait l'objet d'une publication dans la revue XYZ (cf. [Durand 2018]).

Depuis 2016, cette méthode de génération d'observations topographiques a été employée pour générer plusieurs jeux d'observations sur des réseaux de taille variable entre 30m et 50km, et réaliser la comparaison de plusieurs logiciels d'ajustement de mesures topographiques, faisant usage d'un modèle 3D Géodésique : Geolab, LGC, Trinet+ et CoMeT. L'objectif de ce travail est, dans le cadre des partenariats engagés avec le CERN et la Heig-VD, de vérifier l'interopabilité entre nos logiciels d'ajustement et d'étudier les possibles effets logiciels liés à des choix différents d'implémentation des modèles fonctionnels 3D.

Dans ce travail, nous avons construit des réseaux composés de 2 points connus en coordonnées, nommés $S1$ et $S2$ et d'un point M de coordonnées inconnues. Tous les réseaux utilisés partagent la même forme géométrique (triangle équilatéral), illustrée par la figure 13, et contiennent les mêmes types d'observations entre les points. Les coordonnées théoriques des points $S1$, $S2$ et M pour l'ensemble des réseaux sont déterminées à partir de la donnée des coordonnées du point $P0$, barycentre commun à tous les réseaux, et de la longueur d du triangle.

Le point $P0$ correspond au point fondamental du CERN dont la longitude et la latitude astronomiques ETRS89 sont fixées à 51.3692 et 6.72124 gons respectivement, avec une déviation de verticale considérée nulle par rapport à l'ellipsoïde IAG-GRS80. A partir d'une longueur d de côté de triangle, les coordonnées des points du réseau sont déterminées dans le repère local astronomique associé au point $P0$, en fixant les coordonnées verticales à $+10m$, $-10m$ et $0m$ respectivement pour $S1$, $S2$ et M . Finalement, les coordonnées cartésiennes géocentriques ETRS89 des points du réseau sont calculées (avec une déviation de verticale nulle en $P0$ par rapport à IAG-GRS80).

Pour générer un jeu d'observation pour chaque réseau test, nous avons utilisé le modèle fonctionnel 3D de CoMeT, en considérant des déviations de verticales nulles sur tous les points du réseau par rapport à l'ellipsoïde IAG-GRS80, et ajouté des erreurs accidentelles en utilisant la méthodologie décrite précédemment.

La difficulté de ce travail était, outre la nécessité de maîtriser les différents logiciels testés, de surmonter les limitations pratiques d'usage de ces logiciels pour pouvoir traiter les mêmes jeux d'observations dans les mêmes conditions de traitement.

Pour le traitement des différents jeux d'observations avec le logiciel CoMeT, nous avons intégré directement les points en coordonnées ETRS89, précisé l'usage de l'ellipsoïde IAG-GRS80 et indiqué une déviation de verticale nulle pour tous les points du réseau.

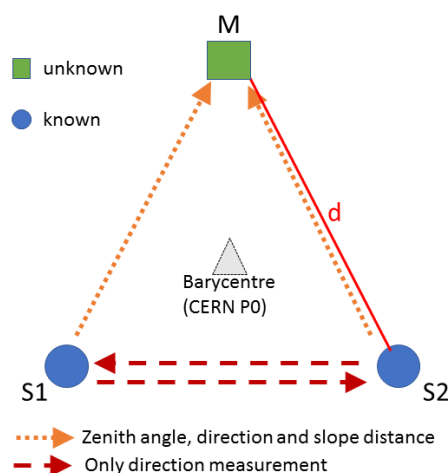


FIGURE 13 – Forme des réseaux utilisés pour la comparaison des logiciels d’ajustement et détail des mesures considérées entre les points du réseau.

Le logiciel LGC impose d’utiliser des coordonnées exprimées en projection CERN, associées au CERN Coordinate System (CCS, cf [Jones 2000]). Ainsi, nous avons dû au préalable transformer les coordonnées cartésiennes ETRS89 en coordonnées CCS, puis convertir les hauteurs ellipsoïdales GRS80 en coordonnées verticales compatibles avec le datum Sphérique vertical du CERN. Pour l’analyse des résultats de traitement, LGC exprime les coordonnées ajustées en coordonnées CCS, et une transformation est nécessaire pour revenir à des coordonnées ajustées cartésiennes ETRS89.

Le logiciel Trinet+ exprime les équations d’observations en fonction de coordonnées topocentriques, associées au repère local astronomique d’un point particulier appelé topocentre. Les coordonnées des points et du topocentre doivent être précisées sous forme de coordonnées cartésiennes CH1903+ et les déviations de verticale par rapport à l’ellipsoïde Bessel 1841 doivent être indiquées. Des études précédentes à la HEIG-VD ont montré que pour des réseaux très étendus, le choix du topocentre pouvait avoir une influence sur les résultats obtenus. Nous avons donc pris soin de choisir, dans nos réseaux, un topocentre permettant de minimiser ce phénomène, situé au milieu de la hauteur du triangle issue du point M . Pour nos différents jeux de mesures, les coordonnées des points sont transformées de ETRS89 à CH1903+, et les déviations de verticale par rapport à l’ellipsoïde Bessel 1841 sont calculées en partant de déviations de verticales nulles sur les points relativement au GRS80.

La comparaison entre les logiciels s’est faite par comparaison des résultats de l’ajustement sur les différents réseaux : coordonnées ajustées, estimateur du facteur unitaire de variance, nombre d’itérations. La figure 14 présente l’évolution de l’estimateur du facteur unitaire de variance pour chaque taille de réseau et chaque logiciel. La figure 15 présente les différences entre les coordonnées ajustées et théoriques du point M sur la composante verticale, pour l’ensemble des logiciels et des réseaux.

Cette étude a permis de définir une méthodologie de traitement commune pour les logiciels CoMeT, Trinet+ et LGC, tenant compte des différences connues en termes d’implémentation des modèles fonctionnels et stochastiques. Nous avons étudié l’impact de la taille du réseau sur les résultats de l’ajustement par ces différents logiciels pour détecter d’éventuelles effets logiciels non connus, liés à

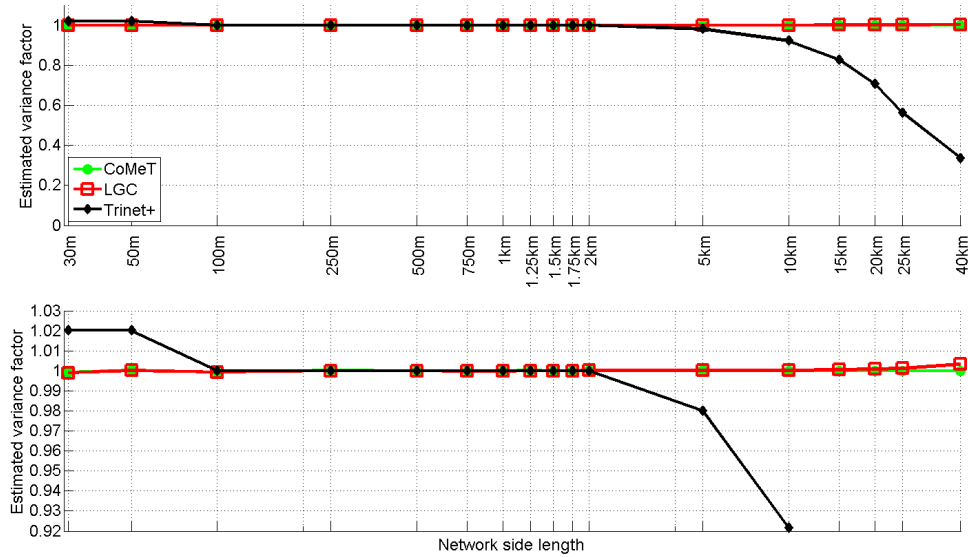


FIGURE 14 – Valeurs de l’estimateur du facteur unitaire de variance en fonction de la taille du réseau. En bas, zoom sur les valeurs autour de 1.

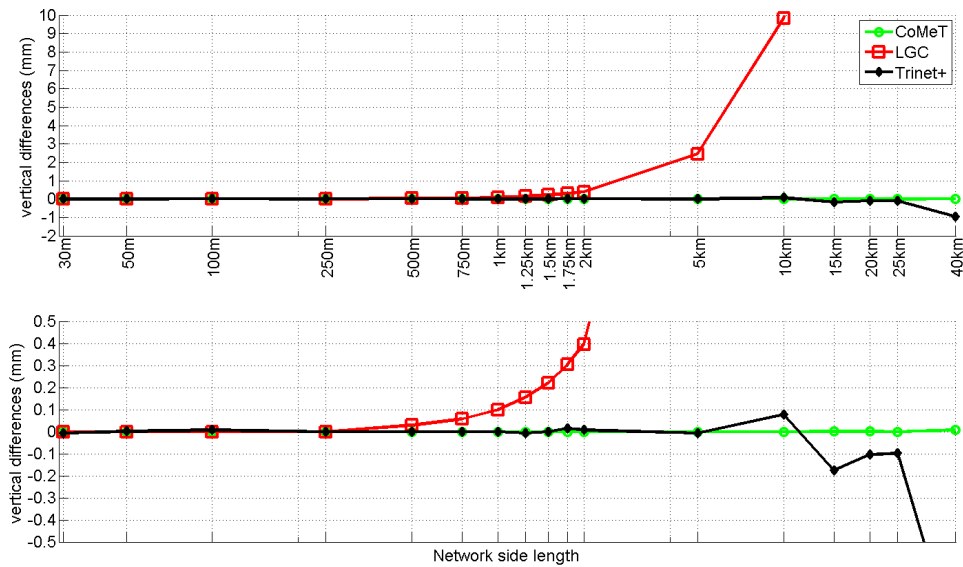


FIGURE 15 – Différence entre la coordonnées ajustée et théorique verticale du point M pour l’ensemble des réseaux et des logiciels. En bas, zoom sur les plus petits écarts.

des différences d’implémentation des modèles fonctionnels. Pour des réseaux de taille inférieure à 15 km, nos résultats montrent que pour les logiciels CoMeT et Trinet+, aucune différence significative n’est observable entre les logiciels. Pour des réseaux de taille supérieure à 15 km, des différences sont visibles sur les coordonnées ajustées, de l’ordre de quelques millimètres à 40km mais également sur les valeurs estimées du facteur unitaire de variance. Il s’agit donc bien de différences causées par

des différences d'implémentation des modèles fonctionnels, qui sont néanmoins assumées par les développeurs, le logiciel Trinet+ ayant été développé à l'origine pour des applications industrielles et non des réseaux d'étendue importante. Pour le logiciel LGC, des différences sont visibles pour des réseaux de taille supérieure à 1km. Ces écarts sont essentiellement liés à l'usage d'un datum vertical lié à la Sphère CERN et non à l'ellipsoïde GRS80. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication en cours d'évaluation en 2018 ([Durand et al. 2018b]).

Pour la suite de cette étude, l'idée est surtout de voir comment exploiter les datum verticaux disponibles dans le logiciel LGC associés à l'ellipsoïde GRS80 et incluant des valeurs de déviation de verticale sur la zone du CERN. Cette étude demande cependant une adaptation du logiciel LGC pour permettre une extraction des valeurs de déviations de verticale pour chaque point du réseau afin de pouvoir les utiliser pour la génération de nouveaux jeux d'observation et leur traitement avec les autres logiciels. Les modèles de déviation de verticale du CERN étant disponibles sur une étendue relativement faible, typiquement moins de 30km de rayon autour du point P0, les travaux à venir se concentreront moins sur la taille des réseaux que sur leur forme, par exemple fortement développés suivant la composante verticale ou avec des géométries particulières mais réalistes, tirées de cas rencontrés au CERN.

Appliquer la mesure de précision dans différents domaines

Mes domaines de recherche concernent depuis de nombreuses années l'optimisation de l'utilisation et la combinaison de techniques géodésiques (GNSS, topométrie, ...) pour améliorer la précision de positionnement ou de mesure de déplacement. Ces recherches méthodologiques trouvent naturellement des applications dans différents domaines, en particulier en géophysique et géotechnique, où la déformation mesurée est l'une des données permettant une meilleure compréhension du phénomène naturel étudié.

Ma position d'enseignant-chercheur en topométrie de précision et GNSS au sein d'une école d'ingénieurs géomètres topographes, dont la spécialité est justement la mesure de coordonnées de points, me permet naturellement de m'intégrer dans différents projets de recherche, essentiellement en géophysique et en géotechnique où ces compétences sont nécessaires, et d'apporter un regard méthodologique sur l'optimisation des techniques de mesures ou le développement de nouvelles techniques.

Dans cette dernière partie de synthèse sur mes travaux de recherche, je présente ainsi les différentes applications auxquelles j'ai pu activement participer depuis mon arrivée au sein de l'équipe de recherche de l'ESGT.

Etude de la surcharge océanique en Bretagne-Cotentin

Le phénomène de surcharge océanique crée des déplacements de la croûte terrestre qui peuvent atteindre jusqu'à une dizaine de centimètres sur la composante verticale et quelques centimètres sur les composantes horizontales dans les régions côtières. La technique GNSS permet l'observation de ces mouvements et peut servir à la validation de modèles de marées océaniques ([Khan et al. 2003], [Yun et al. 2007], [Penna et al. 2008]). La région Bretagne Cotentin est particulièrement intéressante pour l'étude du phénomène de surcharge océanique car elle présente de fortes amplitudes de déplacements verticaux (environ 10 cm sur Brest) mais également horizontaux, ainsi que des phénomènes de réponses non linéaires, dans la région de la baie du Mont Saint Michel par exemple. Le découpage complexe des côtes dans cette région rend le phénomène de marée très complexe et peut mettre en défaut les modèles globaux de marée.

Avant mon arrivée au sein du laboratoire, une première campagne de mesures par GNSS et gravimétrie du phénomène de surcharge océanique en Bretagne de quelques jours avait eu lieu (cf. [Duquenne et al. 2002], [Vey et al. 2002]), en partenariat avec différents organismes nationaux. Une nouvelle campagne de mesure multi-techniques a été réalisée entre février et octobre 2004 dans le

cadre du GDR-G2⁶², impliquant des chercheurs de différents instituts nationaux (ESGT, CNES, IPGP, IGN, OCA, UNSI, EOST, ...) et mettant en oeuvre plusieurs techniques : GNSS, gravimétrie, SLR, inclinométrie. L'objectif de cette nouvelle campagne était de pouvoir comparer les observations de déplacement liés au phénomène de surcharge océanique avec les valeurs théoriques données par les modèles disponibles à l'époque (FES99 - [Lefèvre et al. 2002]) et d'estimer le bilan d'erreur de chaque instrument (cf. [Llubes et al. 2008]). L'équipe d'enseignants-chercheurs, petite et renouvelée, présente au sein de l'ESGT à cette époque, s'est en grande partie construite et structurée autour de cette campagne, en s'y impliquant de manière très importante dès le dernier trimestre de 2003.

Personnellement, je me suis fortement impliqué dans la réalisation et le traitement des données GNSS de la campagne de 2004 : organisation d'une partie de la campagne GNSS (septembre/octobre 2004), participation aux observations terrain (mars-octobre), mise en place de la méthodologie de traitement GNSS permettant de concilier précision du référencement et précision dans l'observation du phénomène de surcharge océanique, étude de l'impact du logiciel et de la stratégie de traitement sur les résultats, par inter-comparaison entre plusieurs logiciels (GAMIT, Bernese, GINS, Gipsy-Oasis II).

Afin de préparer les traitements GNSS pour la campagne de 2004, nous avons repris fin 2003 les données de la campagne de 1999 réalisée sur 3 jours (24-27 octobre), afin d'optimiser la production de séries temporelles de coordonnées GPS en utilisant le logiciel Bernese 4.2. L'étude réalisée a permis d'optimiser les paramètres de traitement et les durées de session pour observer pleinement le phénomène de surcharge océanique en conservant une bonne qualité de référencement (cf. [Durand et al. 2004a]; [Durand et al. 2004b]).

Pour le traitement des données GNSS issues de la campagne de 2004, notre équipe s'est particulièrement intéressée à étudier l'impact de la stratégie de traitement et d'analyse dans l'estimation des déplacements causés par le phénomène de surcharge océanique. En collaboration avec des chercheurs de l'IGN et de l'OMP, nous avons étudié l'influence du logiciel de traitement sur les déplacements estimés, en traitant les données GPS à l'aide de différents logiciels scientifiques (Bernese, Gamit, Gins, Gipsy) et en utilisant différentes stratégies. L'objectif de cette étude était de pouvoir séparer dans les séries temporelles le phénomène de surcharge de l'impact du logiciel et de la stratégie de traitement.

En utilisant des paramètres de traitement les plus identiques possibles entre les différents logiciels GNSS, nous avons quantifié les écarts sur l'estimation des ondes principales de marée. A partir des séries temporelles de coordonnées issues des différents logiciels et en utilisant l'outil T_TIDE (cf. [Pawlowicz et al. 2002]), nous avons en particulier estimé les valeurs d'amplitude et de phase pour l'onde de marée M2. Pour la composante verticale de la station de Brest (BRST), illustrée sur la figure 16 à gauche, on remarque que les valeurs d'amplitudes et de phases estimées sur l'onde M2 par les différents logiciels ne sont ni identiques entre elles ni égales aux valeurs théoriques fournies par le modèle FES2004 (cf. [Lyard et al. 2006]). La corrélation au modèle FES2004 est de 79.7% pour GAMIT, 59.8% pour GINS, 35.8% pour GIPSY et 63% pour Bernese. La figure 16 (à droite) synthétise, pour l'ensemble des sites de la campagne de 2004, les longueurs des vecteurs estimés sur l'onde de marée M2. Les corrélations moyennes entre chaque solution et le modèle de marée FES2004 sont de 82% pour Bernese, 89% pour GAMIT, 77% pour GINS et 61% pour GIPSY (cf. [Nicolas et al. 2009]).

62. Groupement de Recherche en Géodésie et Géophysique

Nous avons ainsi montré que les effets de traitement pouvaient avoir une influence sur l'amplitude du signal entre 10 et 20%. Les écarts entre les valeurs observées par GNSS et le modèle FES2004 ont permis de déceler un manque au niveau du modèle, en particulier sur la composante verticale de l'onde M2.

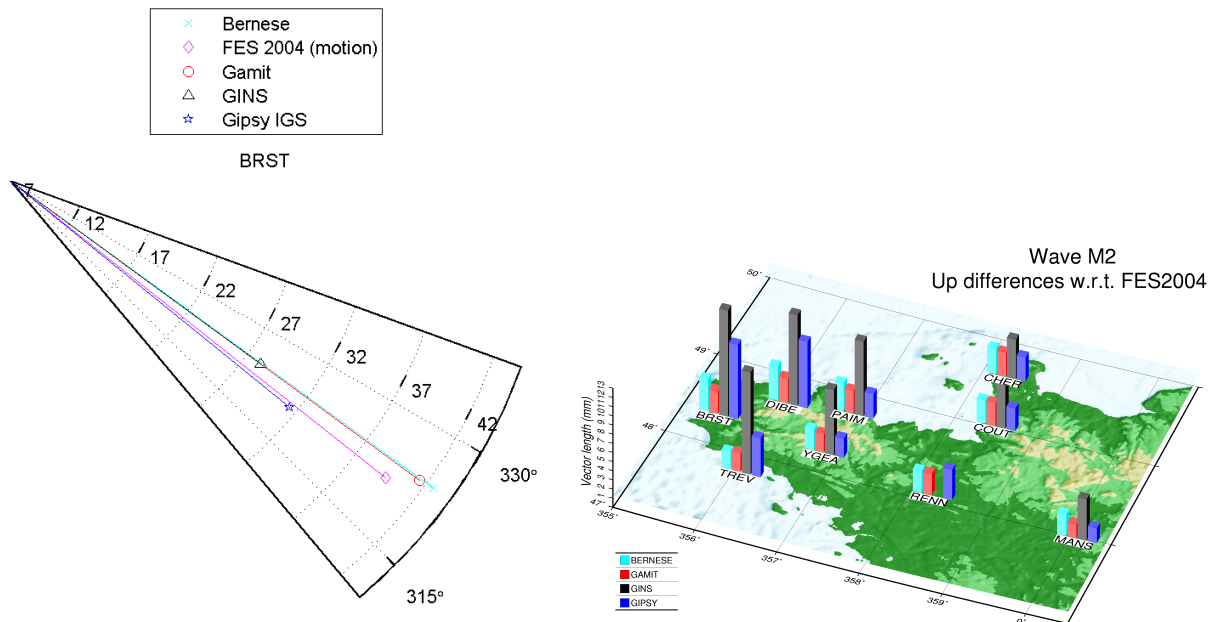


FIGURE 16 – Amplitude (mm) et phase (deg) estimées par le logiciel T_TIDE pour l'onde M2 par l'ensemble des logiciels et le modèle FES2004 (à gauche). Longueur du vecteur 3D estimé sur l'onde M2 par les différents logiciels pour les différents sites de campagne (à droite).

Outre l'impact du logiciel et des paramètres de traitement, nous avons réalisé une étude spécifique sur l'impact de la stratégie de rattachement utilisée. Lorsque l'on souhaite comparer à des modèles géophysiques des séries temporelles de coordonnées ou de déplacements, il est essentiel que le système de référence dans lequel sont exprimés les solutions : (1) soit stable dans le temps et (2) soit compatible avec le modèle géophysique avec lequel on souhaite réaliser les comparaisons. Dans [Vergnolle et al. 2008], le rattachement à l'ITRF2000, après correction des effets de surcharge océaniques induits par le modèle FES2004, a été réalisé suivant deux stratégies différentes. La première, nommée St1, est une solution où les coordonnées d'un ensemble de points sont contraints à leurs coordonnées théoriques (avec prise en compte des effets du modèle FES2004). La seconde, nommée St2, est une solution en réseau libre, dont l'objectif est d'éviter que la solution soit influencée par les coordonnées a priori des stations de référence dans le cas où elles seraient mal corrigées de la surcharge (à cause de défauts dans le modèle FES2004). Nous avons pu montrer, en utilisant l'ensemble des stations de la campagne de 2004, que ces stratégies conduisaient à une estimation quasi identique de l'onde M2, avec des écarts sur la valeur estimée de la longueur du vecteur associé inférieurs à 2 mm, donc négligeables au vue de la précision d'estimation. Si l'on s'intéresse à l'estimation de l'ensemble des ondes de marée sur l'ensemble des sites de campagne, les deux stratégies présentent un décalage moyen d'environ 3 mm, ce qui reste faible au regard des amplitudes de ces signaux.

Finalement, les suites de cette campagne d'étude de la surcharge océanique dans l'Ouest de la France ont permis de conclure sur la capacité effective de la technique GNSS à déceler les mouvements verticaux et horizontaux causés par le phénomène de surcharge océanique, au moins sur les principales

ondes de marée et sur la validation du modèle FES2004 sur la zone d'étude. [Melachroinos et al. 2008].

Etude de la dynamique des segments de rift actifs en Islande

La thèse de Sophie Cravoisier, débutée en février 2004 au Laboratoire de Géodynamique des Rifts et des Marges Passives (LGRMP) de l'Université du Maine, avait pour objectif la caractérisation et la modélisation sur plusieurs échelles de temps du fonctionnement des segments de rifts actifs en Islande, et plus particulièrement au niveau de la péninsule de Reykjanes, située au sud-ouest de l'île. Afin de mieux comprendre le comportement tectonique de cette zone et les interactions avec le volcanisme, plusieurs campagnes de mesures sismologie/géodésie ont été réalisées, en 2005 puis 2006. Pour cette étude, notre laboratoire était responsable du volet géodésie (simulations, organisation, installation, traitement des données), avec pour objectif la mesure de déformations de l'ordre de quelques millimètres entre des points séparés de moins de 100m. Nous avons donc installé localement de part et d'autre de failles, 4 réseaux de points, observés régulièrement par tachéométrie. Début 2005, un projet d'étudiants ESGT a permis d'optimiser par simulation et vérifications en extérieur la géométrie des réseaux, afin de permettre une mesure de déformation millimétrique. Durant leur stage d'été, plusieurs étudiants de l'ESGT sont partis réaliser des mesures régulières sur ces différents réseaux, en 2005 (S. Pitiot, P. Dejonghe) et 2006 (B. Emard, B. Duchatel). Les résultats de la campagne de 2005 ont permis d'observer, sur la période de 2 mois d'observation, une vitesse moyenne de déplacement de la faille de l'ordre de 4 à 7 mm/an sur la composante verticale, avec une forte corrélation liée à l'activité sismique à cette période. (cf. [Durand et al. 2005]; [Nicolas et al. 2008]).

Ce projet a malheureusement été interrompu courant 2006 suite au choix de la doctorante de se réorienter avant la fin de son doctorat, laissant une grande partie des données sismiques et tachéométriques non traitées et analysées. Ce projet a néanmoins permis de montrer l'intérêt de l'utilisation de mesures de déformations en surface pour l'étude de phénomènes volcaniques et sismiques et de créer des liens entre notre laboratoire et le LGRMP, devenu depuis 2018 l'antenne mancelle du LPG⁶³.

Alignement et positionnement dans le cadre du projet ToMuVol

Le projet ToMuVol, pour Tomographie par Muons atmosphériques des Volcans, consiste en le développement d'une méthode de radiographie de la structure interne des volcans actifs, utilisant la détection des muons atmosphériques. Différents systèmes de ce type sont actuellement développés ou utilisés : [Tanaka et al. 2007], [Marteau et al. 2012], [Lesparre et al. 2012] et [Ambrosi et al. 2011]. La particularité du système développé dans le cadre du projet ToMuVol est d'être facilement transportable, robuste et d'utiliser une technologie GRPC⁶⁴ originellement développée dans le cadre du projet ILC⁶⁵ du CERN (cf. [Bedjidian et al. 2011]).

63. Laboratoire de Planétologie et Géodynamique - UMR CNRS 6112

64. Glass Resistive Plate Chamber

65. International Linear Collider

Dans le projet ToMuVol, différents partenaires sont impliqués dont le Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC), chargé du développement du détecteur de muons et de l'exploitation des résultats et l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, en particulier son Laboratoire Magma et Volcans, chargé de la validation de la méthode de détermination de la structure interne des volcans par le détecteur à muons par comparaison à des techniques géophysiques reconnues (sismologie, gravimétrie, tomographie de résistivité électrique et électromagnétisme).

Le volcan du Puy de Dôme a été choisi comme site expérimental pour la validation du détecteur ToMuVol. Sa situation géographique, à proximité des principaux laboratoires impliqués dans le projet permet de faciliter les interventions sur site. Sa structure complexe, avec deux dômes juxtaposés, et la stabilité de son activité volcanique en font un excellent candidat pour tester les capacités du détecteur.

La collaboration entre le projet Tomuvol et le G ϵ F est née fin 2010, lors d'une discussion avec Philippe Labazuy, physicien adjoint au LMV, lors du colloque CNFGG organisé à l'ESGT. Dans le contexte de la validation des performances du détecteur, plusieurs problématiques nécessitaient des compétences en géodésie/topographie. Tout d'abord, pour la reconstruction 3D de la structure interne du volcan avec la technique de tomographie par muons atmosphériques, un Modèle Numérique de Terrain performant de la zone était nécessaire. Un tel MNT a ainsi été réalisé en 2011 par une société externe, en utilisant la technique LiDAR aéroportée et il convenait de valider les performances de ce produit. Ensuite, du fait de la technologie utilisée sur le détecteur, une première campagne de test in situ était planifiée en 2011, dans un local enterré pour limiter le bruit atmosphérique. La difficulté était alors de positionner et d'orienter le détecteur précisément vers le Puy de Dôme. Les TFE de Vincent Tréfond en 2011 et Camille Chanel en 2012 ont servi de base à l'intégration du G ϵ F dans le projet ToMuVol. Dans le cadre de ces stages, outre mon rôle d'enseignant référent pour l'ESGT, j'ai orienté les choix techniques pour le positionnement et l'orientation du détecteur.

En 2013, une campagne de mesure comparée sur le Puy de Dôme a été réalisée. Deux détecteurs à muons atmosphériques, celui du projet ToMuVol et celui du projet MU-RAY (cf. [Anastasio et al. 2013]), ont réalisé de manière indépendante des mesures sur le Puy de Dôme. Ces deux détecteurs utilisent des techniques de détection des muons, mais également des stratégies d'acquisition et d'analyse différentes. Le détecteur MU-RAY a réalisé ses acquisitions de manière quasi continue entre juin et décembre 2013, dans un local situé sur le flanc du cratère principal, au sud-ouest du cratère (Col de Ceyssat). Le détecteur ToMuVol a réalisé ses acquisitions entre novembre 2013 et janvier 2014, dans un local sous-terrain (Grotte Taillerie), situé à l'est du cratère, comme illustré par la figure 17.

Après traitement des données, les détecteurs ToMuVol et MU-RAY permettent d'exprimer le flux de muons atmosphériques mesuré en fonction de l'élévation α et de l'azimut β . La figure 18 représente le flux de muons mesuré (points rouges) en fonction de l'angle d'élévation α , moyenné suivant l'azimut ($\beta \in [-4^\circ, 16^\circ]$ pour le détecteur MU-RAY et $\beta \in [-10^\circ, 10^\circ]$ pour le détecteur ToMuVol). Sont également représentés les flux théoriques associés à une densité uniforme pour le Puy de Dôme compris entre 1 et 2 g/cm³, moyennés suivant les valeurs azimuts comprises dans l'intervalle $\beta \in [-4^\circ, 16^\circ]$. Si les résultats obtenus (cf. [Ambrosino et al. 2013]) montrent un bon accord entre les deux détecteurs, on observe que le flux de muons à haute énergie traversant le Puy de Dôme aux élévations comprises entre 0 et 18° est plus d'un ordre de grandeur supérieur à celui attendu.

Même si la campagne de 2013 n'a pas permis d'imager la structure interne du Puy de Dôme, il s'agit

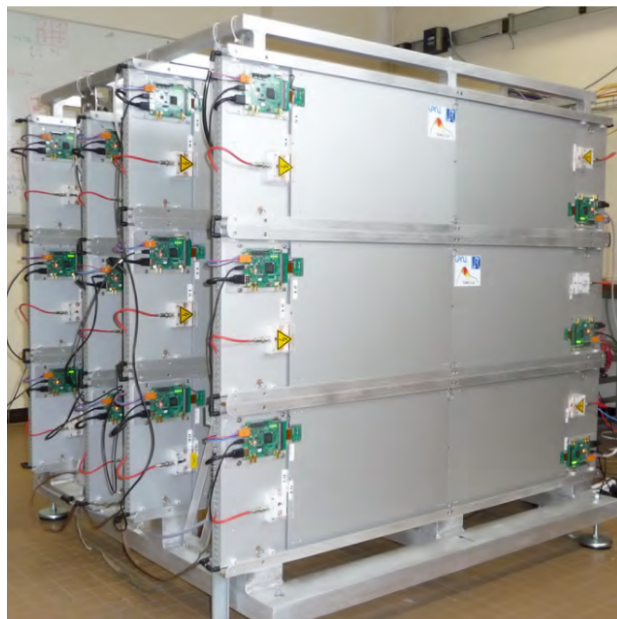
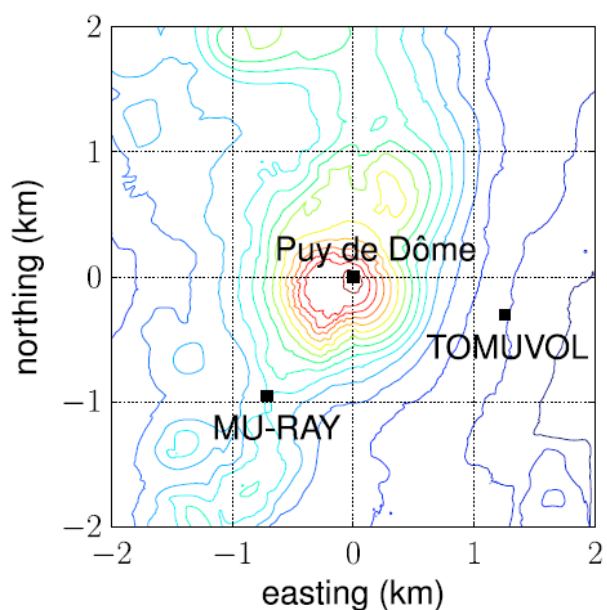


FIGURE 17 – Localisation des détecteurs ToMuVol et Mu-RAY lors de la campagne de mesures de 2013 (à gauche). Le détecteur ToMuVol lors de la campagne de 2013 (à droite).

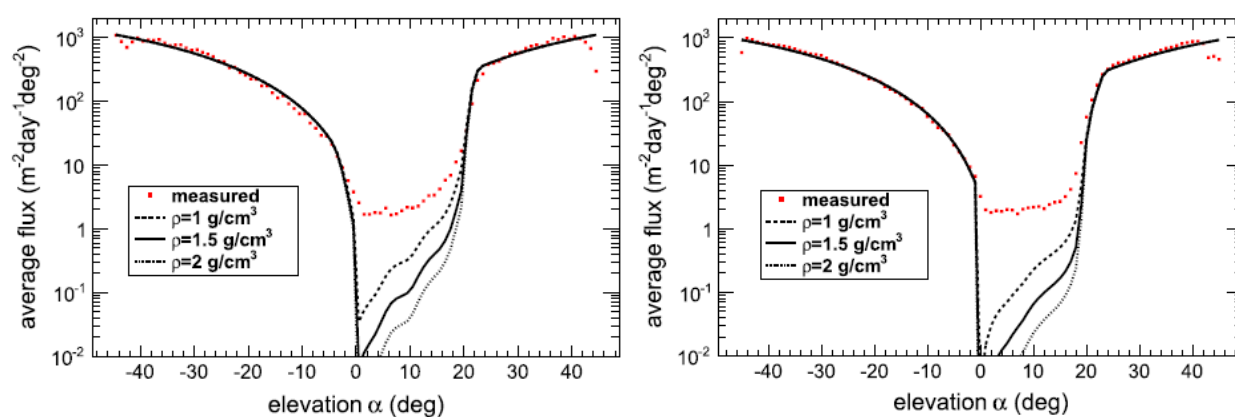


FIGURE 18 – Flux de muons en fonction de l'élévation α , observé par les détecteurs MU-RAY (à gauche) et ToMuVol (à droite).

de la première mise en oeuvre d'une mesure de flux à travers un édifice constitué d'un kilomètre de roches, réalisé par deux détecteurs indépendants situés à plus de 1.3 km d'un volcan.

Fin 2014, le détecteur ToMuVol a été réinstallé sur le site du Col de Ceysnat, pour permettre une comparaison directe avec les données observées en 2013 par le détecteur MU-RAY. D'autres campagnes de validation du détecteur ToMuVol ont eu lieu entre 2014 et 2016, sur les différentes évolutions du détecteur : mise en place d'un mur de plomb pour limiter le flux de muons atmosphériques direct lors du déploiement dans des locaux non enterrés, amélioration du niveau de bruit par modification de différents composants électroniques défaillants, modification des dimensions et du nombre de plans de détection du détecteur. La dernière campagne de test in situ du détecteur a eu lieu de fin 2015 à début 2016, au Col de Ceysnat puis dans la grotte Taillerie, avec un détecteur composé de 4 plans de détection et des dimensions accrues (2m x 1m x 1m). Les différentes évolutions du détecteur ont permis d'améliorer son niveau de performance en terme de résolution et de capacité de détection, en limitant le niveau de bruit.

Tomographie 3D par GNSS pour l'étude de la dynamique de la troposphère

Dans le traitement des mesures acquises par les techniques GNSS et InSAR, à des fins de détermination de position ou de mesure de déplacements, l'impact de la troposphère reste aujourd'hui la source d'erreur prépondérante. Cette couche de l'atmosphère, qui s'étend du sol à une altitude d'une dizaine de kilomètres, est fortement hétérogène du fait de sa teneur en eau. Le G ϵ F s'est intéressé dès 2007 à l'impact de la prise en compte de la troposphère dans le traitement de données GNSS sur la détermination du phénomène de surcharge océanique dans l'Ouest de la France (thèse de François Fund [Fund 2009]). A partir de 2012, les travaux du G ϵ F, se sont intéressés à la signification des gradients troposphériques, paramètres ajoutés dans la modélisation de la propagation des signaux GNSS dans l'atmosphère pour prendre en compte l'hétérogénéité de la troposphère autour de la station (cf. [Morel 2014]) et ont montré une corrélation de ces gradients avec le relief environnant.

C'est dans ce contexte et grâce aux collaborations issues des études précédentes sur la troposphère que depuis 2014, le G ϵ F, en partenariat avec le LAMP⁶⁶ s'emploie à mettre en place, autour de la ville du Mans, un réseau dense de stations GNSS permettant la reconstruction de l'état de la troposphère par inversion tomographique 3D (cf. [Morel et al, 2015]). L'expertise du G ϵ F dans l'estimation des ZWD par GNSS et l'expertise en tomographie et météorologie du LAMP s'avèrent complémentaires afin de développer une étude méthodologique plus complète à partir d'un réseau expérimental permanent dédié. Ce projet fait suite à la réalisation de deux TFE d'étudiants de l'ESGT : le premier réalisé au LAMP par Gaëtan Meunier en 2014, qui a réalisé la tomographie de la troposphère en utilisant un réseau de 14 stations dans le cadre de la campagne GNSS-AGRI, le second réalisé au G ϵ F par Clément Montibert en 2014, qui a pris en main la suite logiciel de traitement tomographique pour notre laboratoire dans la dernière partie de son travail. Les laboratoires G ϵ F et LAMP souhaitent pour cette étude reprendre le logiciel TSAAR (Tomography Software for wAter vApour Retrieval) développé dans le cadre de la thèse de Mathieu Reverdy (cf. [Reverdy 2008]) afin de poursuivre les expérimentations.

66. Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand

Dans ce projet, deux objectifs scientifiques particuliers sont visés. Le premier consiste à réaliser en continu une tomographie 3D de la troposphère, au dessus de la ville du Mans, pour évaluer les structures fines submésos-échelle de la troposphère lors d'évènements météorologiques, en s'appuyant sur un réseau local de stations GNSS permanentes. Le second consiste à mener des études plus méthodologiques sur la chaîne de traitement tomographique, et d'étudier en particulier l'apport de la constellation GLONASS sur le rendu tomographique, l'influence de la géométrie du réseau, l'influence des paramètres de traitement utilisés pour réaliser l'inversion tomographique et l'influence de la méthode d'inversion des mesures utilisées (aujourd'hui moindres carrés pondérés amortis dans TSAAR).

Depuis 2014, une petite équipe de 3 personnes s'est constituée au sein du laboratoire GεF sur ce projet, à l'initiative de Laurent Morel. Mon intégration naturelle dans cette équipe s'est faite pour plusieurs raisons. Scientifiquement, dans ce projet, je suis particulièrement intéressé par les études méthodologiques visant à optimiser les traitements réalisés, en particulier l'intégration de données multi-constellation et le choix de la méthode d'inversion. Ces études nécessitent cependant au préalable que le réseau de stations au sol soit opérationnel et qu'une chaîne de traitement adaptée à ce réseau soit fonctionnelle. Techniquement, de part mes expériences passées, je suis l'un des plus à même au sein du laboratoire de mettre en place un tel réseau. Mes efforts ont ainsi pour l'instant portés essentiellement sur la mise en place du réseau.

Fin 2014, suite au TFE de Clément Montibert et à ses premières expériences sur un réseau temporaire, nous avons ainsi décidé de mettre en place un réseau permanent GNSS sur la ville du Mans. Pour l'établissement de ce réseau, un soin particulier a été apporté au choix de la localisation des sites, afin d'assurer un maillage régulier, orienté nord/sud et est/ouest, suivant les recommandations faites dans le TFE de Gaëtan Meunier, et dense (maillage d'environ 5 km). La qualité des sites (visibilité des satellites, stabilité, facilité d'accès) et leur pérennité a également orienté nos choix. Le réseau s'appuie sur la présence de deux stations GNSS permanentes sur la ville du Mans, intégrées au RGP, que sont la station MAN2 (gérée par le GεF) et la station ARNA (appartenant au réseau temps réel privé S@tInfo). Le laboratoire a également bénéficié de l'appui des collectivités (Département, Le Mans Métropole, conseils municipaux) et d'acteurs privés (Automobile Club de l'Ouest) pour la mise en place des sites. Nous avons également bénéficié de l'appui du RENAG, pour l'acquisition en 2014 de deux stations météorologiques (Vaisala PTU300) et le prêt de récepteurs GNSS du parc Insu depuis 2015. Dans le cadre de l'appel d'offre de "redéploiement des récepteurs de jouvence RENAG", nous avons également pu bénéficier en 2016 de 4 récepteurs GPS (Trimble NetRS), permettant la pérennisation du réseau sur le long terme.

Comme pour tout réseau permanent, l'une des difficultés principales lors de la mise en place est de trouver un bon compromis entre la qualité du site, sa localisation et la facilité d'obtenir une alimentation électrique (gratuite si possible) et les autorisations nécessaires. Depuis 2015, nous avons déployé progressivement les récepteurs GNSS et stations météorologiques sur les différents sites, avec les aléas habituels : vente par la commune de Ruaudin du bâtiment hébergeant la station permanente, obligeant à trouver un autre site, difficulté pour trouver des sites adaptés sur certains endroits.

Dès 2015, un réseau de 5 stations permanentes a été mis en place et exploité dans le cadre du TFE d'Olivier Le Coz (cf. [Le Coz 2015]). Cette étude a essentiellement portée sur la mise en place d'une première chaîne de traitement GAMIT/TSAAR et sur l'optimisation du paramétrage du logiciel

TSAAR. Nous avons ainsi pu détecter et corriger quelques problèmes dans la chaîne TSAAR.

En 2017, nous avons poursuivi le travail d'optimisation de la chaîne de traitement, en particulier sur la partie TSAAR, dans le cadre du TFE de Raphaël Longechamp (cf. [Longechamp 2017]). Dans ce travail, trois points importants ont été étudiés : (1) l'initialisation de l'inversion tomographique en utilisant le modèle météorologique Era-Interim à la place du modèle d'atmosphère standard, (2) la correction de quelques erreurs dans le code conduisant à une surestimation de la quantité de vapeur d'eau, (3) la validation des résultats TSAAR avec le modèle Era-Interim. Pour ce travail, nous avons exploité pour la première fois un réseau complet à 9 stations, mais possédant encore 2 stations temporaires.

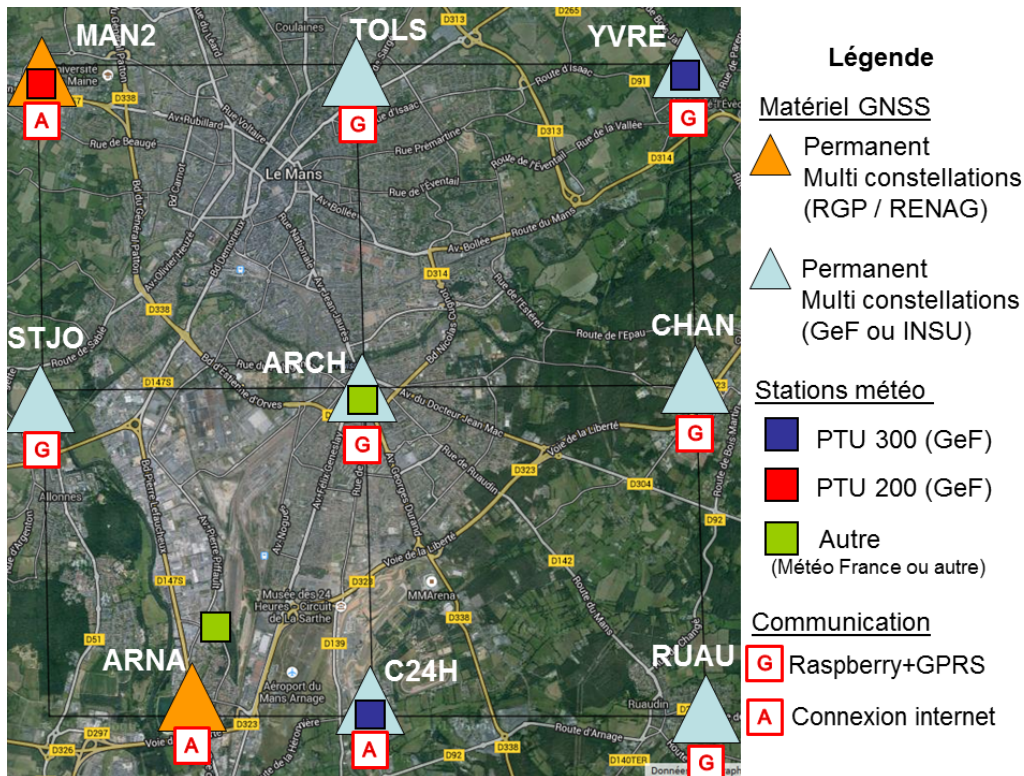


FIGURE 19 – Etat actuel du réseau GNSS sur la ville du Mans pour la tomographie de la troposphère.

Aujourd'hui, nous disposons des autorisations nécessaires pour installer un réseau complet permanent de 9 stations, comme illustré dans la figure 19. Force est de constater cependant que même si le réseau n'est pas très étendu, il faut en pratique plus d'une journée pour visiter l'ensemble des sites et qu'il est difficile de faire cette visite même sur une périodicité mensuelle. Même si une alimentation secteur est disponible sur chaque site, rien ne nous permet d'assurer le bon fonctionnement du réseau complet sur des périodes de temps compatibles avec des études de comportement de la troposphère lors d'événements météorologiques. En 2018, j'ai donc étudié la possibilité d'un rapatriement journalier automatique des données à bas coût, basé sur l'utilisation de cartes Raspberry Pi et de modems GPRS (abonnements Free à 2€/mois). Ce matériel, testé fin 2018 sur le toit de l'école, va être déployé début 2019 sur les différents sites et va permettre une mise en opération optimisée de notre réseau complet.

En parallèle, dans le cadre du TFE de Damien Bergès en 2019, nous allons équiper temporairement l'ensemble des sites de récepteurs multi constellations, pour étudier en particulier l'apport des me-

sures GLONASS sur l'estimation des ZWD dans GAMIT (version 10.70 de juin 2018) et les résultats de l'inversion tomographique dans TSAAR.

Développement de méthodes d'alignement pour le CERN

Depuis de nombreuses années, l'ESGT entretient des relations de collaboration avec le CERN⁶⁷ et surtout l'équipe de géomètres du CERN, en charge de l'alignement des accélérateurs et des travaux de métrologie sur l'ensemble des équipements. Les équipements du laboratoire de métrologie de l'école, dont j'ai la responsabilité depuis mon arrivée fin 2003, sont d'ailleurs identiques à ceux utilisés par le CERN, qui a même participé à leur mise en oeuvre. L'enseignement de topométrie de précision dont je suis également responsable depuis 2003, trouve l'une de ses applications dans les problématiques du CERN de traitement des observations en utilisant une modélisation la plus rigoureuse et exacte possible, pour repousser toujours plus le niveau de précision et de fiabilité lors de l'alignement des composants des accélérateurs.

Cette collaboration se traduit depuis de nombreuses années par le biais de travaux de fin d'études d'étudiants sur les problématiques d'alignement ou de développement de méthodes de positionnement ou de contrôle, mais également par des échanges réguliers entre l'ESGT et le CERN, par exemple lors de conférences données par le CERN aux étudiants de l'ESGT dans le cadre de l'enseignement de topométrie de précision, et des collaborations ponctuelles sur des problématiques communes. Pour plusieurs TFE d'étudiants ESGT, j'ai eu l'occasion de dépasser mon rôle de simple enseignant référent pour m'impliquer dans le choix des candidats, mais également dans les orientations données aux travaux ou l'encadrement des étudiants (TFE de T. Touzé et J. Boerez en 2005, A. Maurisset en 2007, M. Dour en 2010, A. Ardier en 2010, E. Perrier en 2015).

En 2012, j'ai participé au retraitement des données GNSS pour la détermination de la distance entre CERN et LNGS⁶⁸ à l'aide du logiciel Bernese 5.0. Cette étude faisait suite aux résultats de l'expérience OPERA⁶⁹, destinée à observer le phénomène d'oscillation de neutrinos. Cette expérience, débutée en 2006, consiste à observer un faisceau de neutrinos muoniques à haute intensité et haute énergie générée par le SPS⁷⁰ du CERN et dirigé vers un détecteur souterrain installé au LNGS à environ 730 km de distance. En septembre 2011, la collaboration OPERA annonçait que la vitesse de déplacement des neutrinos entre le CERN et le LNGS était supérieure à celle de la lumière. Cette annonce a conduit l'ensemble des acteurs à vérifier leurs données, et les géodésiens impliqués dans le projet OPERA à vérifier la distance entre l'émetteur du CERN et le récepteur au LNGS ([Colosimo et al. 2012]), une erreur sur cette distance d'environ 15 m pouvant expliquer les résultats observés. Cette étude, publiée dans [Jones et al. 2012], a montré que la distance entre CERN et LNGS était connue à environ 20 centimètres près et ne pouvait être la cause de la vitesse excessive observée des neutrinos. Finalement, la source de l'erreur, instrumentale, a été identifiée courant 2012 (cf. [Adam et al. 2013]).

Le CERN a développé et utilise depuis de nombreuses années le logiciel LGC⁷¹ pour ses travaux de pré-analyse et d'ajustement de réseaux. Mark Jones est actuellement le responsable de la mainte-

67. Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

68. Lab Nationale Gran Sasso

69. Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus

70. Super Proton Synchrotron

71. Logiciel Général de Compensation

nance et du développement de cet outil, et la collaboration entre le CERN et le G ϵ F se fait également sur la problématique de comparaison et d'inter-validation de logiciels d'ajustement (cf. partie II).

En 2014 puis en 2015, le CERN et le G ϵ F ont mis en place deux conventions de recherche sur 3 ans chacune portant sur le développement et la validation de méthodes d'alignement dans le cadre des projets CLIC⁷² et HL-LHC⁷³. Ces deux conventions, pour lesquelles je suis coordinateur scientifique et administratif au sein du G ϵ F, ont permis le recrutement en CDD au sein du laboratoire de Vivien Rude en 2014 et Mathieu Duquenne en 2015. Ces travaux portent essentiellement sur le perfectionnement et la calibration de systèmes de positionnement particuliers utilisés au CERN : les capteurs capacitifs destinés au nivellement hydrostatique (HLS⁷⁴) et les capteurs optiques et capacitifs à fil tendu (WPS⁷⁵). Avec pour objectif final une précision d'alignement des différents éléments de la machine à quelques dizaines à quelques centaines de microns pour les besoins des expériences CLIC et HL-LHC. Ces travaux ont produit plusieurs résultats d'intérêt, diffusés par le biais de conférences internationales spécialisées sur l'alignement des accélérateurs de particule (cf. [Rude et al. 2015a], [Rude et al. 2015b], [Rude et al. 2015c], [Duquenne et al. 2016], [Vendeuvre 2018], [Rude et al. 2018]).

Utilisation de fils tendus dans les réseaux tachéométriques

En parallèle des travaux réalisés dans le cadre des conventions recherche avec le CERN je travaille depuis 2016, conjointement avec les géomètres du CERN et des collègues de la HEIG-VD à une utilisation moins spécifique des fils tendus dans le domaine de la topographie et de la mise en place de réseaux d'observation.

Depuis plus de 50 ans, les géomètres qui travaillent sur l'alignement des accélérateurs de particules exploitent les fils tendus pour aligner avec des précisions sub-millimétriques les différents éléments des accélérateurs. Au CERN par exemple, pour l'alignement des composants du LHC - Large Hadron Collider, des fils conducteurs très fins (0.1 mm de diamètre) sont utilisés. Des capteurs capacitifs de positionnement à fils (WPS) permettent de mesurer précisément la position du fil, et des systèmes de centrage à bille spécifiques sont utilisés pour relier la référence d'orientation réalisée par le fil avec les points du réseau topographique. La raison principale du développement de l'usage de ces fils pour les besoins d'alignement des accélérateurs est qu'en pratique, lorsque l'on construit un réseau d'auscultation dans un tunnel, la précision et la fiabilité des coordonnées 3D des points du réseau se dégradent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des extrémités du réseau, surtout suivant la composante transversale. Ceci est dû à la forme très allongée du réseau et à la présence de points connus en coordonnées souvent uniquement aux extrémités du réseau. Un fil tendu sur plusieurs dizaines à centaines de mètres, ne subissant aucune sollicitation extérieure, matérialise un plan vertical et peut servir de référence d'orientation (avec une forme de chaînette suivant la verticale).

L'idée que nous développons depuis 2016 est d'exploiter des fils plus classiques type cordelette en polyéthylène (2-3 mm de diamètre), ainsi que des mesures directes sur les fils, pour profiter de la référence d'orientation créée par le fil et améliorer la géométrie du réseau. Plusieurs méthodes d'ajustement, basées sur les moindres carrés et le logiciel CoMeT, ont été testées avec succès : utilisation de contraintes sur les coordonnées des points sur le fil ou expression des coordonnées en fonction

72. Compact Linear Collider

73. High Luminosity Large Hadron Collider

74. Hydrostatic Leveling System

75. Wire Positioning System

des paramètres du fil (cf. [Duquenne et al. 2016], [Durand et al. 2018]). Nous avons ainsi pu montrer que l'utilisation de fils tendus dans des réseaux longitudinaux permettait d'améliorer la précision de détermination des coordonnées des points dans toutes les directions, et plus particulièrement suivant l'axe transversal. Nous avons aussi montré que l'utilisation de fils tendus permettait d'améliorer la fiabilité locale des observations dans le réseau ainsi que les fiabilités externes sur les points du réseau (cf. [Durand et al. 2018c]).

Les recherches s'orientent aujourd'hui sur l'amélioration de la précision du pointé sur le fil et sur les problématiques de liaison entre deux fils successifs (cf. [Durand et al. 2019]).

Mesures de vibrations acoustiques par vision 3D

Ce projet a pour origine ma rencontre avec Charles Pezerat fin 2009, peu après son arrivée en tant que professeur d'université au sein de l'ENSIM⁷⁶. En tant que chercheur au LAUM⁷⁷, il s'intéressait en particulier à la mesure instantanée de champs vibratoires sur des surfaces, avec pour applications potentielles le monde industriel et automobile. Les techniques de photogrammétrie et de vision 3D par ordinateur, qui font partie des compétences du GεF, m'ont semblé pouvoir s'appliquer à ce type de problématique. Une première étude de faisabilité a été réalisée par E. Simonetto (GεF) et C. Pezerat (LAUM) en 2010 (cf. [Simonetto et al. 2010]), montrant la faisabilité d'une mesure de déplacement sub-millimétrique sur une plaque par simulations. En 2012, le stage de master de Hanen Hamdi, co-encadré par E. Simonetto et C. Pezerat (cf. [Hamdi 2012]) a permis d'approfondir la modélisation en simulation du champ de déplacement de la plaque. Des premiers tests réels sur une plaque en aluminium, dans des conditions statiques, ont été réalisés, pour lesquels j'ai apporté mon expérience en terme de mesure et d'alignement.

En 2013, un projet de 3 étudiants ESGT, M. Biggio, X. Brunetière et B. Houfflain (cf. [Biggio et al. 2013]) puis le TFE de M. Biggio (cf. [Biggio 2013]) que j'ai co-encadré, ont permis d'améliorer les algorithmes de détection des points sur la plaque. Le TFE de Mathieu Biggio, dans lequel je me suis fortement investi, a également permis de proposer un montage photogrammétrique exploitant une seule caméra et un jeu de miroirs, permettant la reconstruction 3D des déformations de la plaque. L'intérêt de ce montage est d'éliminer les problèmes de synchronisation liés à l'utilisation de deux caméras, problème complexe lors de l'utilisation de caméras ultra-rapides, mais également de limiter le coût matériel. Le revers de la médaille est une complexité optique plus importante du système, qui ne facilite pas l'établissement du bilan d'erreur ni son étalonnage. Lors du TFE de M. Biggio, une validation de la chaîne de mesure et de traitement a été réalisée par comparaison avec une instrumentation commerciale, le système ATOS de GUM, disponible au sein du CTTM⁷⁸.

Les résultats de ces travaux ont conduit les trois partenaires que sont le GεF, le LAUM et le CTTM, à proposer avec succès en 2015 le projet Photomevib pour Photogrammétrie ultra-rapide pour la vibro-acoustique, lors de l'appel à propositions le Mans Acoustique (AAP LMAc) 2015 "pari scientifique" financé par la Région des Pays de Loire. Le projet Photomevib inclut le financement d'une thèse de doctorat pour le développement du système et des méthodes de traitement associées suivi d'un post-doctorat plus axé sur l'industrialisation. La thèse de doctorat de Thomas Durand Texte a ainsi débuté le 1er octobre 2015.

76. Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans

77. Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

78. Centre de Transfert de Technologie du Mans

Cette thèse se situe donc à l'interface entre plusieurs disciplines : vibro-acoustique, vision 3D, photogrammétrie, métrologie. Ses objectifs étaient d'étudier l'intérêt et les limites d'utilisation des méthodes de vision 3D, couplées à une caméra ultra-rapide, pour la mesure 3D de champs vibratoires, plein champs et sans contact, pour des applications en vibro-acoustique, et de proposer une chaîne de d'acquisition et de traitement adaptés.

Une première partie du travail de thèse a consisté à poursuivre la mise en oeuvre du montage initial à 4 miroirs avec une seule caméra ultra rapide, pour application à la mesure de vibration acoustique avec l'utilisation de cibles sur une plaque et un haut parleur. La figure 20 tirée de [Durand-Texte et al, 2016], illustre le montage à 4 miroirs utilisé au début de la thèse, observant une plaque en aluminium de 30x30x0.5cm pourvue d'un quadrillage. Nous avons par la suite montré que l'utilisation de cibles avec un motif de point gaussien permettait d'obtenir les meilleurs résultats en termes de précision de déformation observable (cf. [Durand-Texte et al., 2017], , [Durand-Texte et al. 2019]). Nous avons aussi pu constater en particulier sur le haut parleur, dont la géométrie est plus complexe, que l'utilisation de cibles n'était pas la plus appropriée dans un contexte de mesure de vibrations acoustiques.

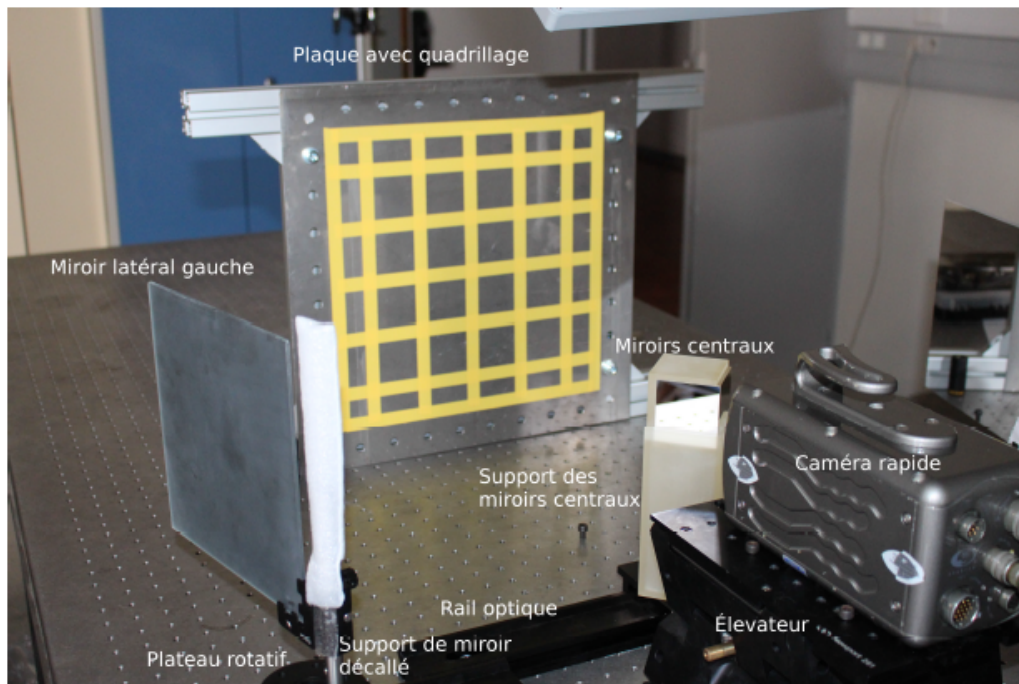


FIGURE 20 – Le prototype du projet Photomevib en 2016, composé d'une caméra ultra rapide, de deux miroirs centraux et de deux miroirs externes permettant de créer deux caméras virtuelles. Au centre de l'image, la plaque test en aluminium, sur laquelle est tracé un quadrillage permettant la reconstruction 3D de l'objet par vision par ordinateur.

La seconde partie de la thèse a donc été consacrée à l'utilisation de mouchetis et d'outils de corrélation d'images. Nous avons en particulier développé une méthode itérative de rectification d'images (méthode IRIs) permettant, à partir d'une mesure de forme initiale de l'objet, de réaliser l'appariement de points entre les deux caméras d'un système stéréoscopique, avec un angle entre les deux caméras supérieur à 60°, pour des objets présentant d'importantes variations de profondeur.

Dans la troisième partie de la thèse, nous avons cherché à simplifier le montage stéréoscopique à 4

miroirs, plus complexe à régler et à manipuler, et proposé un montage utilisant uniquement deux miroirs. Dans ce montage, le miroir central visible dans la figure 20 est supprimé : les deux miroirs servent à créer une caméra virtuelle, approximativement en face de l'objet étudié, tandis que le second point de vue est obtenu directement à travers la caméra. La figure 21, tirée de [Durand-Texte et al. 2018b], illustre à gauche le montage à 2 miroirs avec une caméra ultra rapide et présente à droite un exemple d'images obtenue avec ce montage sur un haut parleur. Les deux points apparaissent sur la même image, avec à droite l'image obtenue avec le point de vue créé par les 2 miroirs et à gauche le point de vue obtenu directement par la caméra.

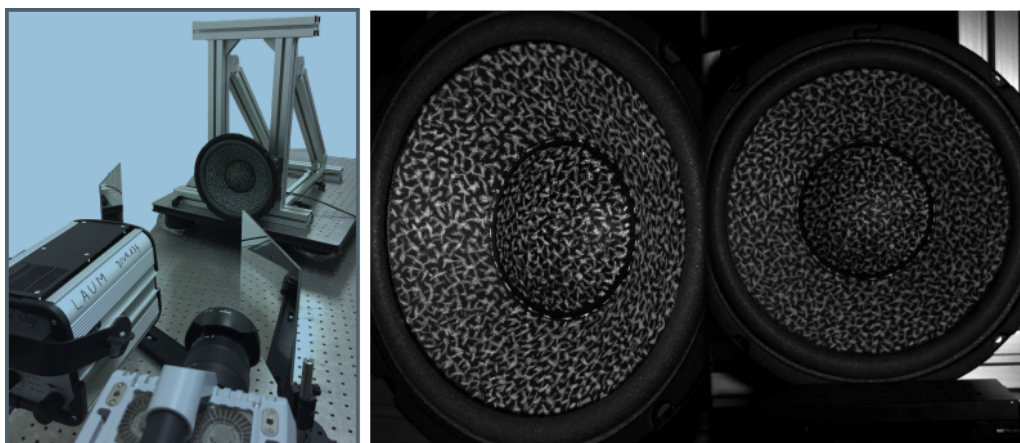


FIGURE 21 – A gauche : le montage stéréoscopique utilisant 2 miroirs. A droite : un exemple d'image obtenue avec ce montage, dans le cas d'un haut parleur sur la membrane duquel est dessiné un motif aléatoire.

La dernière partie de la thèse a été consacrée au développement de deux protocoles de mesures adaptés à la mesure de vibration acoustique mais n'utilisant aucun miroir. Le premier protocole est basé sur le constat qu'en acoustique, pour de nombreux objets, tels que le tambourin par exemple, les vibrations sont essentiellement mono-axiales. Dans ce protocole, la caméra ultra rapide est positionnée latéralement par rapport à l'axe de vibration et est donc sensible aux déplacements hors-plan. À l'aide d'une seconde caméra standard, on réalise au préalable une mesure initiale de forme de l'objet. Lors de l'acquisition d'images haute fréquence, seule la caméra ultra rapide acquiert des images directes sur l'objet. La seconde vue requise pour la triangulation des points est remplacée par une ligne mathématique calculée par le biais de la mesure de forme initiale. Ce protocole permet d'exploiter pleinement la matrice de pixels de la caméra et de simplifier la mise en oeuvre de la mesure. Il a été testé dans le cas d'un tambourin et validé par comparaison à d'autres méthodes : vibromètre laser, protocoles à 2 et 4 miroirs. Le second protocole sans miroir, développé et testé récemment, repose sur le principe de l'utilisation de deux caméras, l'une ultra rapide et l'autre moins, aux cadences d'acquisition différentes. L'objectif de ce protocole est de conserver les avantages de simplicité du premier protocole sans miroir, mais en autorisant la mesure plein champs tridimensionnelle. La caméra rapide, située en face de l'objet, est utilisée pour mesurer les vibrations à des fréquences inférieures à 300 Hz environ. La caméra ultra rapide, positionnée latéralement à l'axe principal de l'objet, permet d'observer les vibrations jusqu'à des fréquences de l'ordre de 1000 Hz.

Aujourd'hui, l'une des idées du G ϵ F est d'exploiter les développements réalisés au cours de cette thèse en les appliquant au domaine de la mesure de déformation d'ouvrages, et à la détermination

de fréquences propres de vibration de structures élancées, telles que des ponts ou des passerelles. Une première expérimentation est en cours, dans le cadre d'un projet d'étudiants en 5ème année du cycle ingénieur ESGT, sur la passerelle piétonne Newton au Mans, en parallèle de mesures GNSS haute fréquence et tachéométriques.

Couplage géodésie/hydrologie pour l'étude de sites hydrogéologiques

Le service national d'observation H+ (ORE H+) est une infrastructure de recherche dédiée à l'étude des eaux souterraines, construite autour d'un réseau d'équipes de recherche et de sites hydrogéologiques, dont le site de Ploemeur (Morbihan). Géré par l'OSUR (Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes), le site de Ploemeur correspond à un aquifère d'eau de très bonne qualité dans une zone de granite intensément fracturée, observé depuis plus de 15 ans (cf. [Touchard 1999]). Il est exploité par la ville de Ploemeur jusqu'à aujourd'hui pour son alimentation en eau potable.

En 2006, dans le cadre du programme coordonné ANR ECCO, une expérience de suivi gravimétrique et de suivi de la déformation du sol suite à l'arrêt total des pompages a été réalisée. Deux conséquences étaient envisagées : d'une part, une variation de la quantité d'eau présente dans le milieu et d'autre part, une déformation du milieu liée en partie aux variations de masses d'eau et des surpressions dans les parties captives de l'aquifère. Le signal gravimétrique devait être a priori principalement sensible aux variations de masses suite à la remontée des niveaux piézométriques dans la partie libre de l'aquifère. De leur côté, les méthodes de suivi de déformation devaient être sensibles à la déformation en surface liée aux déformations du milieu. Combiné avec un suivi fin des variations de niveaux piézométriques, l'objectif de cette expérience était d'imager les propriétés du sous-sol en terme de porosité et de comportement hydro-mécanique.

L'expérience proprement dite s'est déroulée du 10 mai 2006 (arrêt des pompages à 19h TU) au 12 mai 2006 (reprise progressive des pompages à partir de 10h TU). Deux gravimètres absolus et cinq gravimètres relatifs ont été mobilisés pour suivre les variations gravimétriques. La déformation du milieu a été suivie à l'aide de 8 récepteurs GPS, deux inclinomètres longue base (cf. [Boudin et al. 2008]) et deux inclinomètres Blum en continu. Un réseau de nivellement, composé de 42 points, a été mis en place sur le site et observé par mes soins. Il permettait à la fois d'observer en surface les déformations du sol et de faire la liaison entre les différents instruments présents lors de la campagne (inclinomètres, puits de forage, gravimètres). Ce réseau a été observé par nivellement direct, par cheminement en boucles fermées et relèvements avant (9 mai) et après l'arrêt des pompages (12 mai). L'ajustement en bloc des observations, en considérant le point F30 (cf. figure 22 comme hors de la zone d'influence et fixe, a permis de mesurer les déformations altimétriques du sol avec une précision de l'ordre de 1-2 mm. Les valeurs de déformation observées, de l'ordre de quelques millimètres, sont plus faibles que celles attendues (1-2 centimètres prévus), mais sont cohérentes avec celles acquises par les autres instruments.

La figure 22 représente les déformations observées par nivellement direct lors de la campagne, ainsi que la direction du maximum de déformation observée par l'inclinomètre longue base placé en LB1. Ils corroborent l'hypothèse d'un système hydrogéologique formé de deux structures tectoniques : (1) une zone intensément fracturée au contact entre des micaschistes et du granite qui s'enfonce vers

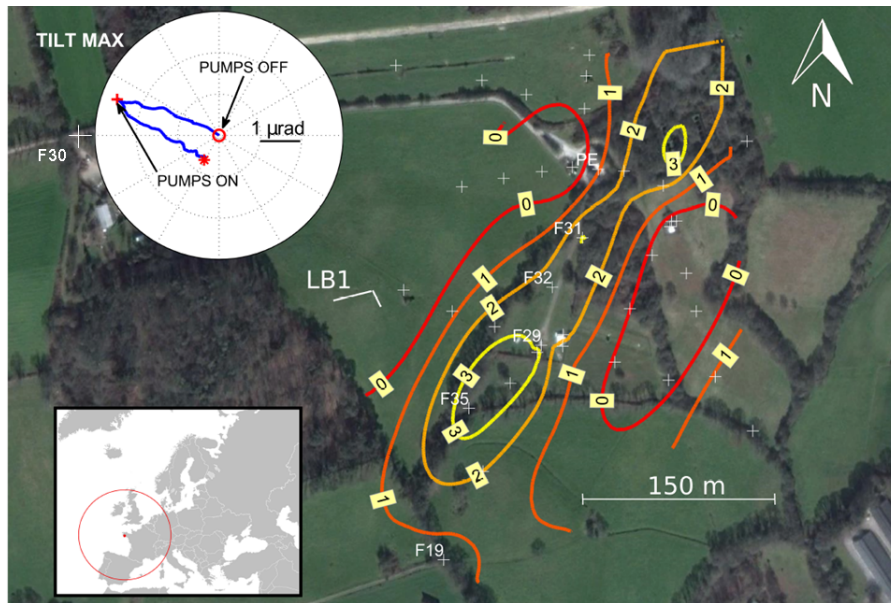


FIGURE 22 – Le site expérimental de Ploemeur localisé dans le Morbihan (en bas à gauche). Direction du maximum de déformation observé par l’inclinomètre longue base localisé en LB1 (en haut à gauche). Déformation verticale observée par nivellement directe (au centre), en millimètres.

le nord, (2) la faille normale associée orientée Nord 30° Est. L’inversion de ces données, réalisée dans [Schuite et al. 2015] a permis de montrer que les mesures de déformation du sol sur de courtes échelles de temps, lors de tests adéquats, apportaient des informations sur la géométrie de l’aquifère et son fonctionnement hydromécanique. Les résultats montrent également la bonne complémentarité et le fort potentiel pour ce type d’études des mesures de nivellement (directe ou indirect) et inclinométriques. Le couplage de mesures géodésiques, permettant d’observer de manière non destructive les déformations en surface aux mesures hydrologiques permet de mieux contraindre l’inertie des systèmes hydrologiques.

Les premiers résultats de cette campagne multi-techniques sur le site de Ploemeur, présentés dans [Moreau et al. 2006] et [Bour et al. 2007] ont montré l’intérêt de réaliser une telle expérience en regroupant différentes techniques complémentaires, pour obtenir à la fois une mesure spatialisée et un suivi temporel fin. Une nouvelle campagne de mesures multi-techniques a été envisagée sur le site de Ploemeur entre 2009 et 2010, et m’a conduit à proposer et encadrer le stage de fin d’études de Jean-François Doré en 2009 et à déposer une demande de Bonus Qualité Recherche (BQR) au sein du Cnam cette même année. L’objectif de l’étude était de mettre en place sur le site de Ploemeur un réseau d’observation tachéométrique automatisé, permettant d’observer les déformations verticales du sol avec une précision inférieure à 2 mm. L’avantage était, par rapport à la technique de nivellement directe mise en oeuvre en 2006, de permettre une mesure plus rapide et plus régulière de l’état de déformation du sol, mais également de pouvoir combiner plusieurs techniques d’observations (nivellement direct, GNSS, tachéométrie, ...). Les travaux réalisés en 2009 n’ont pour l’instant pas directement été appliqués au site de Ploemeur, la campagne multi-techniques prévue à l’époque n’ayant pas eu lieu. Mais les résultats de ces travaux sont également exploitables pour d’autres sites, en particulier celui de Guidel, un aquifère situé à proximité de la ville de Ploemeur, dont l’exploitation pour les besoins en eau de la ville est prévue entre 2019 et 2020, et pour lequel il est envisagé un suivi multi-techniques lors de la phase de mise en exploitation.

Avec l'arrivée au sein de l'équipe *Transferts d'eau et de matières dans les milieux hétérogènes complexes* de Géosciences Rennes de Laurent Longuevergne en 2010, j'ai pu poursuivre cette thématique de l'utilisation et du développement de techniques géodésiques pour la mesure de déformations du sol, à des fins d'étude, par couplage à des mesures hydrologiques, de systèmes hydrogéologiques. Dans le cadre de la thèse de Clément Roques, portant sur l'hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin, le site de Saint Brice en Coglès (Ille et Vilaine - Bretagne) a été particulièrement étudié. Un suivi du site par couplage de mesures géodésiques et hydrologiques a été réalisé, en partenariat avec l'OSUR, le BRGM et l'ESGT. Sur ce site, le couplage des mesures géodésiques aux mesures hydrologiques a permis d'identifier et de caractériser la structure principalement active du système aquifère de Saint Brice (cf. [Roques 2013], [Roques et al. 2012], [Roques et al. 2015]).

L'essai de pompage, d'une durée de 2 mois, a été réalisé en parallèle d'une campagne de mesures géodésiques de déformation du sol, incluant 4 récepteurs GNSS, permettant une observation en continue de la déformation, du nivellement (direct et indirect) et des mesures ponctuelles de gravimétrie. Les mesures de nivellement, dont j'étais responsable, ont été réalisées avec l'aide d'étudiants et de collègues de l'ESGT et du BTS Livet (Nantes) à quatre reprises : avant le début du pompage (septembre 2011), durant le pompage (octobre et décembre 2011) et après le pompage (janvier 2012). La figure 23, tirée de la thèse de Clément Roques, représente les résultats extrapolés des variations d'altitude déterminées par mesures de nivellement entre le 18 octobre et l'état initial du système (au 12 septembre). Une analyse détaillée de ces résultats est actuellement engagée dans les travaux de modélisation hydromécanique du site par l'OSUR.

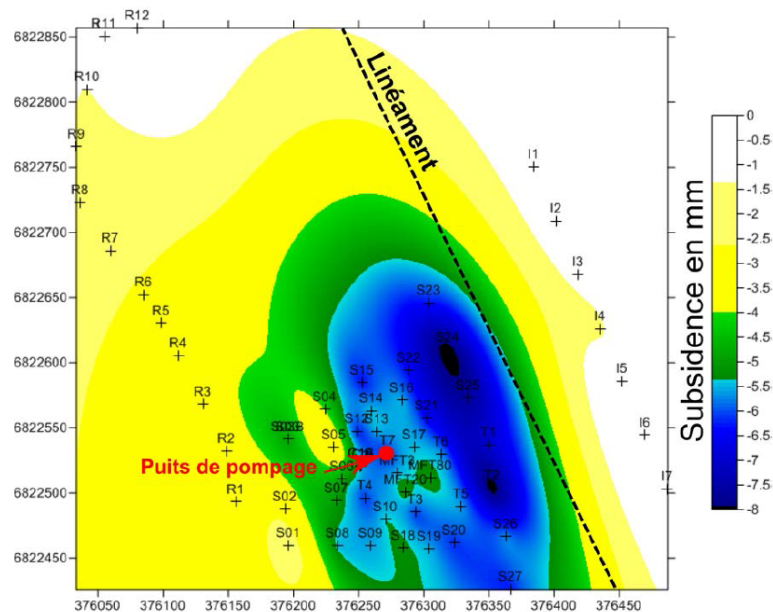


FIGURE 23 – Résultats extrapolés des variations d'altitude déterminées par mesures de nivellement sur le site de St Brice en Coglès. Différence entre les états du 18 octobre et du 12 septembre 2011.

L'exploitation des techniques géodésiques pour la mesure de déformation en surface dans le cadre d'études hydrologiques constitue l'une des thématiques de recherche de Géosciences Rennes en partenariat avec le GεF et d'autres laboratoires et organismes. Elle est inscrite dans le projet d'avenir EQUIPEX CRITEX, qui consiste au développement de méthodes innovantes pour le suivi des systèmes environnementaux, auquel le GεF est associé. Dans ce cadre, j'ai co-encadré en 2015 le pro-

jet de fin d'études de Julien Assemat, dédié à l'*Evaluation des performances de capteurs topographiques pour la mesure de déformation* (cf. [Assemat 2015]). Dans les campagnes de mesures de Ploemeur et St Brice, les techniques utilisées pour la mesure de déformation du sol (nivellement direct, GNSS et tachéométrie) ont été choisies pour optimiser la précision de la mesure et les contraintes des sites. Le travail de Julien Assemat a consisté à évaluer les performances de différentes méthodes topographiques/géodésiques pour la mesure de déformation du sol lors d'études de milieux hydrologiques. Outre la précision atteignable sur la déformation mesurée, il s'est intéressé aux problématiques de matérialisation et de stabilité des points observés et en particulier à l'influence de la réfraction sur les déformations observées.

Le travail de Julien a permis de confirmer que les gradients locaux de température le long de la ligne de visée constituait la perturbation ayant le plus d'incidence sur la précision de la mesure de déformation dans ce type de contexte. Il a été complété en 2017 par le stage de fin d'études de Kévin Gobron (cf. [Gobron 2017]), qui a pu mener des expériences en atmosphère contrôlée et quantifier l'impact du phénomène sur les mesures topographiques. Nous avons ainsi montré que l'influence de ce phénomène se traduisait par une perte de précision sur les déformations observées typiquement de 3 à 5 mm. Nous avons également pu constater que les mesures angulaires réalisées par les stations totales étaient, comme les mesures de distances, fortement impactées par ces gradients horizontaux.

Prise en compte de la réfraction latérale asymétrique dans les réseaux d'auscultation

La problématique de prise en compte des gradients horizontaux de température (réfraction latérale asymétrique), est aujourd'hui le facteur le plus limitant de la précision de la mesure de déformation dans des réseaux de surveillance topographiques. Elle ne concerne pas seulement les travaux que nous menons sur la mesure de déformation du sol pour la caractérisation de réservoirs hydrologiques mais également de nombreux autres domaines, en particulier liés à l'auscultation continue et automatisée d'ouvrages ou de zones naturelles ou artificielles. Dans ce dernier domaine en effet, il est courant aujourd'hui de mettre en oeuvre des systèmes d'auscultation automatisés s'appuyant sur des stations totales robotisées réalisant des mesures en continu, éventuellement couplés à d'autres types de capteurs (GNSS, nivellement, inclinométrie, ...). Ce type de système d'auscultation continu permet d'observer des déformations de quelques millimètres, typiquement 3 à 10 mm en 3D, sur des intervalles de temps de quelques dizaines de minutes à quelques heures. Ils sont aujourd'hui largement mis en oeuvre dans le monde professionnel pour le suivi continu d'ouvrages vieillissants (cf. [Longstreet 2011]), la surveillance temps réel de chantier lors du creusement de tunnels ou d'ouvrages, comme par exemples les chantiers liés au Grand Paris, la surveillance de tunnels (cf. [Berberan et al. 2007], [Lafonta et al. 2013]), ou le suivi de zones naturelles.

La finesse des déplacements observables est bien entendue liée à la géométrie du réseau de points mis en oeuvre et à la qualité des mesures réalisées, mais également aux conditions environnementales de l'objet ausculté. En atmosphère non contrôlée, s'il est possible aujourd'hui de concevoir des réseaux d'auscultation capables en théorie d'observer des déformations de 1 à 2 mm voir mieux, ce niveau de précision est difficile à atteindre en pratique, du fait en particulier des phénomènes de réfraction latérale asymétrique. Pourtant, pour un nombre croissant d'applications, atteindre ce niveau de précision serait essentiel.

Dans le travail de Kévin Gobron, nous avons cherché à corriger l'effet des gradients horizontaux de température sur les mesures topographiques, en exploitant un réseau de capteurs de température disséminés le long des lignes de visée et en mettant en oeuvre des méthodes de type Fast Marching (cf. [Sethian 1998], [Mirebeau 2014]). Ce type de méthode, exploité dans différents domaines tels que l'imagerie ou les géosciences, a pour objectif de calculer l'évolution d'une interface (d'un front) dans un milieu quelconque, c'est à dire de calculer les temps d'arrivée d'une onde en chacun des points de l'espace en fonction d'une carte de vitesses dans le milieu. Nous avons ainsi adapté et testé deux algorithmes de Fast Marching (cf. [Kroon] et [Peyré]), qui, sans être les plus performants pour notre problématique, étaient les plus faciles à exploiter pour montrer l'intérêt de ce type de méthodes. Les résultats obtenus sont encourageants et ont montré la nécessité d'exploiter des méthodes plus avancées et récentes de Fast Marching, comme par exemple celle de [Treister and Haber 2016], ou de développer notre propre algorithme adapté à notre contexte particulier.

Les résultats obtenus dans les travaux de Julien Assemat et Kévin Gobron nous poussent depuis mi 2017 à envisager une poursuite de ce travail dans le cadre d'une thèse de doctorat. Cette problématique intéressant particulièrement les entreprises gérant des réseaux d'auscultation opérant en continu, et dans le contexte actuel des gros chantiers en cours en France, en particulier sur le métro de Rennes et les extensions de lignes du Grand Paris Express, j'ai sollicité fin 2017 différentes entreprises, pour aboutir courant 2018 à une proposition de thèse Cifre diffusée à la mi 2018 avec l'entreprise Cementys. En 2018, nous n'avons retenu aucune candidature sur les 5 reçues, et avons préféré rediffuser en 2019 le sujet pour un démarrage de thèse à la rentrée 2019.

L'objectif principal de cette proposition de thèse est de développer des méthodes de correction, d'estimation ou d'élimination de l'effet des gradients de températures sur les mesures, pour permettre d'améliorer la précision des déformations observables par le réseau, une précision millimétrique voir sub millimétrique étant visée.

Dans les travaux menés jusqu'à présent, nous avons cherché à modéliser l'influence des gradients horizontaux de températures en utilisant des capteurs le long de la visée et des méthodes de type Fast Marching, qui semblent prometteuses mais doivent être adaptés à notre contexte particulier. Il s'agira donc de poursuivre la mise en oeuvre des méthodes de type Fast Marching pour la modélisation du phénomène et la correction des mesures angulaires et de distances fournies par les stations totales. On s'intéressera en particulier à optimiser les méthodes actuelles pour notre contexte particulier, à étudier plus en détail l'influence des méthodes d'interpolation des données issues des capteurs de température pour produire les cartes de vitesses, élément de base pour la mise en oeuvre des méthodes de Fast Marching et à tester des méthodes récentes limitant les approximations faites dans la résolution de l'équation Eikonale.

La mesure d'angle réalisée automatiquement par la station totale est basée sur l'utilisation de caméra CMOS (cf. [Bayoud 2007]), pour le pointé automatique et précis du centre du prisme visé. Il conviendra donc, dans la thèse, de s'intéresser à l'impact du phénomène de réfraction latérale asymétrique sur l'image acquise par le capteur CCD de l'instrument, et aux méthodes possibles de modélisation et de correction. On s'intéressera en particulier à l'apport de caméra externes, du type de celle proposée dans [Guillaume et Burki 2008], permettant d'optimiser les méthodes de détection de prisme et de pointé automatique : amélioration de la qualité du capteur CCD utilisé (densité de pixels, taille, résolution), utilisation de séries d'images pour détecter le centre du prisme, utilisation de filtres de couleurs pour estimer/corriger la réfraction sur l'image (cf. [Kasser et Magnenat 2017]).

Une autre approche développée dans cette thèse sera celle de l'estimation de la réfraction liée aux gradients de température en adaptant le principe des visées réciproques simultanées à l'intérieur du réseau. Il s'agira sur ce point de poursuivre les travaux réalisés en 2017 (cf. [?], [Oubah et al 2018]) sur la mise en place d'un réseau expérimental d'auscultation localisé sur le toit du bâtiment de l'ESGT, permettant la réalisation de visées réciproques simultanées entre deux stations totales automatisées, et la comparaison des valeurs estimées de réfraction avec des données météorologiques le long des lignes de visées. Pour cette étude, comme proposé dans [Hirt et al 2010], on pourra utiliser soit le capteur interne des stations totales, soit mettre en œuvre une caméra externe. Concernant l'estimation de l'erreur liée à la réfraction sur les mesures, la thèse devra également s'intéresser à la faisabilité d'une estimation directe de coefficients de réfractions locaux à l'intérieur du réseau, du fait de la redondance importante des observations et de configurations particulières de mesure (visées doubles simultanées). La thèse s'appuiera pour cela sur le logiciel CoMeT du laboratoire GeF, qui autorise ce type de développements.

Conclusion

Le présent document synthétise mes recherches passées et en cours sur la problématique du positionnement et de la mesure de déformation par techniques géodésiques.

La première partie regroupe mes travaux sur l'amélioration de la précision du positionnement par GNSS initiés au cours de mon doctorat, puis poursuivis par la suite au sein du laboratoire GεF, sur la qualification des performances des méthodes différentielles NRTK, l'apport d'une approche par les graphes algébriques aux positionnements différentiel et PPP et le développement d'un nouveau service de positionnement PPP (avec la thèse de Paulo de Oliveira). Ces recherches me permettent aujourd'hui de disposer d'une certaine expertise sur les concepts et méthodes associés au traitement de données GNSS, dans un contexte de positionnement statique mais également temps réel, que je peux appliquer à d'autres domaines, en particulier la combinaison de techniques géodésiques, objet de la seconde partie de ce document.

Dans cette seconde partie du document, je présente l'état de mes travaux portant sur la combinaison de techniques géodésiques, essentiellement GNSS/topométrie/PsInSAR afin d'améliorer la précision de la mesure de déformation pour le suivi d'ouvrages ou de sites naturels. Ces travaux, entamés lors de la thèse de Benoit Legru dès 2007, m'ont amenés à développer différents outils de traitement de données (logiciel CoMeT) et à réaliser différents travaux de comparaison et d'inter-validation de logiciels d'ajustement de mesures topographiques, avec pour objectif principal l'étude de l'influence du logiciel et de son paramétrage sur les déformations mesurées. Je me suis également intéressé à l'impact de la pondération relative des mesures (entre techniques) sur l'ajustement d'un réseau et sa capacité à détecter des mouvements significatifs. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui dans le cadre de la thèse de Abdeljalil Nahli, réalisée dans le cadre d'une convention Cifre avec l'entreprise Cementys. Les objectifs de ce travail sont, dans le contexte particulier de mesure de subsidence 3D d'ouvrages, d'une part d'optimiser le traitement associé aux techniques GNSS et PSInSAR, et d'autre part de poursuivre le développement d'une méthode de combinaison GNSS/PsInSAR basée sur l'utilisation de la méthode des moindres carrés (algorithme STUN modifié, intégrant des vecteurs GNSS).

La troisième partie de ce document s'intéresse aux travaux d'application des méthodes de positionnement et de mesure de déformation auxquels j'ai pu collaborer et apporter mes compétences, dans différents domaines tels que la géophysique, la volcanologie, l'hydrogéologie, la météorologie ou l'acoustique. Cet aspect de mes activités est fortement lié à ma présence au sein d'une école d'ingénieurs spécialisée dans les domaines de la mesure qui facilite la naissance de partenariats dans différents domaines, conduisant parfois à l'émergence de nouvelles problématiques de recherche. La thèse de Thomas Durand-Texte, portant sur l'exploitation des méthodes de photogrammétrie/vision 3D pour la mesure de vibrations acoustiques est un bon exemple de tels partenariats gagnant/gagnant. Je cherche aujourd'hui à exploiter certains des résultats de cette thèse, toujours en partenariat avec le LAUM, pour la mesure de fréquences propres de passerelles ou de ponts, mais également pour mesurer des déformations basses fréquences d'ouvrages par méthode de vision 3D,

qui pourraient par la suite être combinées à des méthodes géodésiques plus classiques (GNSS, tachéométrie, nivellement automatisé ...).

Aujourd'hui plus que jamais, mes recherches visent à exploiter les techniques géodésiques (tachéométrie, nivellement, GNSS, PsInSAR) pour améliorer la précision et la fiabilité de la mesure de déformation, dans le contexte de la surveillance d'ouvrages d'arts, de zones naturelles ou urbaines. La demande industrielle et le challenge scientifique sont aujourd'hui clairement de pouvoir atteindre avec ce type de méthodes, dans des réseaux d'auscultation, des précisions de mesure de déformation meilleures que 1 à 2 mm, en atmosphère naturelle. L'atteinte de cet objectif passe à mon sens par l'utilisation combinée de techniques géodésiques, et j'ai à coeur de poursuivre et de développer au sein de notre laboratoire cette activité et d'agréger autour de cette thématique de plus en plus de collègues spécialistes de différents domaines. Elle passe également par l'optimisation du traitement réalisé avec chaque technique, et dans le cas de la tachéométrie, par une meilleure prise en compte des effets de réfraction latérale asymétrique, facteur limitant aujourd'hui la précision qu'il est possible d'atteindre avec ce type de technique à 3 à 5 mm en 3D sur des réseaux de quelques centaines de mètres d'étendue (thèse en recherche de candidat pour 2019 en contrat Cifre). Elle passe également par le développement de nouvelles méthodes de mesure et de traitement (vision 3D, mesures sur fils) qui pourront être intégrées dans les combinaisons et apporter un gain de précision et de fiabilité supplémentaires.

Si au sein du laboratoire, cette thématique de recherche est aujourd'hui clairement identifiée comme l'un des axes principaux de recherche, et agrège plusieurs de ses membres, la réalisation de ce projet à moyen et long termes implique la poursuite et le renforcement des collaborations nationales et internationales actuelles tant scientifiques (Geosciences Rennes, LPG, CERN, ETHZ, Heig-VD, ...) qu'industrielles (Cementys, Gexpertise, Sites, Soldata, ...). Avec les projets actuellement en cours et mon implication, tant sur le plan scientifique qu'au niveau de la recherche de partenaires institutionnels et industriels, les ingrédients me semblent en place pour pouvoir accueillir de futurs doctorats et post-doctorats au sein du laboratoire et faire avancer plus sûrement cette thématique dans la bonne direction.

Bibliographie

- [Adam et al. 2013] The OPERA collaboration, Adam, T., Agafonova, N. et al., *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data*, J. High Energ. Phys. (2013) 2013 : 153. doi :10.1007/JHEP01(2013)153
- [Agrell et al. 2002] Agrell E., Erikson T., Vardy A and Zeger K, *Closest point search in lattices*, IEEE Trans. Inform., Theory, 48 :2201-2214,
- [Altamimi et al. 2011] Z. Altamimi, X. Collilieux, and L. Métivier, *ITRF2008 : An improved solution of the international terrestrial reference frame*, Journal of Geodesy, 2011. 33
- [Ambrosi et al. 2011] Ambrosi, G., et al., *The MU-RAY project : Volcano radiography with cosmic-ray muons*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 628, 120–123, 2011
- [Amiri et al. 2009] Amiri-Simkooei A. R., P. J. G. Teunissen, and C. C. J. M. Tiberius, *Application of Least-Squares Variance Component Estimation to GPS Observables*, JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING, pp149-160, november 2009.
- [Anastasio et al. 2013] Anastasio, A., et al., *The MU-RAY detector for muon radiography of volcanoes*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 732, 423–426, 2013
- [Bacci 2012] Bacci Paul Antoine, *Correction des effets atmosphériques en InSAR par mesures GNSS*. Travail de fin d'études ESGT, 2012.
- [Bähr et al. 2007] Bähr H., Altamimi Z. and Heck B., *Variance Component Estimation for combination of terrestrial reference frames*, Universitätsverlag Karlsruhe, Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, 2007
- [Bähr and Hanssen 2012] Bähr H and Hanssen R.F., *Reliable estimation of orbit errors in spaceborne SAR interferometry : The Network Approach*, J Geod, 86 : 1147, 2012
- [Bayoud 2007] Bayoud Fadi, *Leica Geosystems Total Station Series TPS1200*. White Paper Leica Geosystems, 2007
- [Bedjidian et al. 2011] Bedjidian, M., et al., *Performance of Glass Resistive Plate Chambers for a high-granularity semi-digital calorimeter*, J. Instrum., 6, P02001, doi :10.1088/1748-0221/6/02/P02001, 2011
- [Bekeart et al. 2015] Bekeart, D.P.S., Hooper, A., Wright, T.J., *A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data*, JGR Solid Earth, 120, doi :10.1002/2014JB011558, 2015.
- [Berberan et al. 2007] Berberan A., Machado M. and Batista S., *AUTOMATIC MULTI TOTAL STATION MONITORING OF A TUNNEL*, Survey Review, 39, 305, pp203-211, 2007
- [Bertiger et al. 2010] Bertiger, W., Desai, S.D., Haines, B., Harvey, N., Moore, A.W., *Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data*, Journal of Geodesy, 84(5), 327–337, 2010.
- [Biggs 1996] Biggs, N. *Algebraic Graph Theory - Seconde Edition*, Cambridge University Press, 1996
- [Biggio et al. 2013] Biggio M., Brunetière X, Houfflain Delacroix B, *Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur*, Projet Pluridisciplinaire ESGT, janvier 2013

- [Biggio 2013] Biggio Mathieur, *Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur*, TFE ESGT 2013
- [Brenot et al. 2013] Brenot, H., Neméghaire, J., Delobbe, L., Clerbaux, N., Meutter, P., Deckmyn, A., Delcloo, A., Frappez, L., Van Roozendael, M., *Preliminary signs of the initiation of deep convection by GNSS*, Atmos. Chem. Phys. 13, 5425–5449, 2013.
- [Boudin et al. 2008] Boudin, F., P. Bernard, L. Longuevergne, N. Florsch, C. Larmat, C. Courteille, P.-A. Blum, T. Vincent, and M. Kammentaler, *A silica long base tiltmeter with high stability and resolution*, Rev. Sci. Instrum., 79(3), 34502, doi :10.1063/1.2829989, 2008
- [Caissy and Agrotis 2011] Caissy, M., Agrotis, L., *Real-time working group and real-time pilot project*, Int GNSS Serv Tech Rep 2011 :183–190, 2011.
- [Casparly 2000] Casparly W.F., *Concepts of network and deformation analysis*. Edited by J. M. Rüeger. Third (corrected) Impression, 2000.
- [Catalão et al. 2009] Catalão J., Nico G. Hanssen R. And Catita C. Integration of INSAR and GPS for vertical deformation monitoring : a case study in Faial and Pico islands. Proc. Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 30 November – 4 December 2009 (ESA SP-677, March 2010).
- [Cervelli et al 2002] Cervelli P., Segall P., Amelung F., Garbeil H., Meertens C., Owen S., Miklius A., and Lisowski M., *The 12 September 1999 Upper East Rift Zone dike intrusion at Kilauea Volcano, Hawaii*, Journal of Geophysical Research, vol. 107, 2002.
- [Chalaye 2004] Chalaye, L., *Utilisation du GPRS pour le RTK*, Revue XYZ de l’AFT, n°102. 2004
- [Champollion 2005] Champollion Cédric, *Quantification de la vapeur d’eau troposphérique par GPS (modèles 2D et tomographies GPS) - Application aux précipitations intenses*, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2005.
- [Chang2016] Chang L., Hanssen RF, *A probabilistic approach for InSAR time series post-processing*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 10 pages, vol 54, p. 421-430, 2016
- [Chen et al. 2011] Chen X., Allison T., Cao W., Ferguson K., Grünig S., Gomez V., Kipka A., Köhler J., Landau H., Leandro R., Lu G., Stolz R., Talbot N., *Trimble RTX, an Innovative New Approach for Network RTK*, Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR, 2214-2219.
- [Leandro et al. 2011] Leandro, R., Landau, H., Nitschke, M., Glocker, M., Seeger, S., Chen, X., De-king, A., BenTahar, M., Zhang, F., Ferguson, K., Stolz, R., Talbot, N., Lu, G., Allison, T., Brandl, M., Gomez, V., Cao, W., Kipka, A. , *RTX Positioning : The Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning*, Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, 2011, pages 1460 – 1475.
- [Colosimo et al. 2012] *CERN-LNGS distance computation for the OPERA Project*, DICEA, Area di Geodesia e Geomatica - Università di Roma La Sapienza, Rome, January 2012, Italy.
- [Counselman and Gourevitch 1981] Counselman, C. and Gourevich S., *Miniature Interferometric Terminals for Earth surveying : Ambiguity and Multipath with Global Positioning System*, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, GE-19(4) :224-252
- [Dach et al. 2015] Dach R., Lutz, S., Walser P. and Fridez, P, *Bernese GNSS Software Version 5.2*, Astronomical Institute, University of Bern, November 2015.
- [Dubreuil 2016] Dubreuil Vincent, *Correction troposphérique des interférogrammes issus d’images radar par mesures GNSS et modèle global d’atmosphère*, PFE INSA, 2016
- [Duquenne et al. 2002] Duquenne F., Calais E., Llubes M., Maillard D., Lalancette M. F., Serres L., Matthieu F., *GPS determination of ocean tide loading effects on heights : an experiment in Brittany (France)*. XXVII General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, 2002

- [El Hamri 2013] El Hamri Yassine, *Compensation des effets atmosphériques en DINSAR : mesures GPS et autres méthodes*, Travail de fin d'études ESGT, 2013
- [Emardson et al 2003] Emardson T.R., Simons M. and Webb F.H., *Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications : Statistical description and mitigation*. J. Geophys. Res., vol. 108 NO. B5, 2003.
- [Even-Tzur 2001] Even-Tzur Gildad, *Graph Theory Applications to GPS Networks*, GPS Solutions, vol 5, N0 1, pp31-38, 2001
- [Ferretti et al. 2001] FERRETTI Alessandro, PRATI Claudio et ROCCA Fabio, *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001
- [Förstner 1979] Förstner W., *Ein Verfahren zur Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten*, AVN 86 (11-12) :446-453, 1979
- [Fotopoulos and Cannon 2001] Fotopoulos, G. and Cannon, M. E., *An Overview of Multi-Reference Station Methods for Cm-Level Positioning*, GPS Solutions, Vol. 4, No. 3, pp. 1-10, 2001
- [Frei and Beutler 1990] Frei E., Beutler G., *Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach FARA : theory and first results*, manuscripta Geodeatica, vol 15, No 6, pp325-356, 1990.
- [Fund et al. 2011] Fund, F., Morel, L., Boehm, J. Mocquet. A., *Discussion of Height reductions for Zenith Hydrostatic Delays derived for weather models*, Journal of Applied Geodesy. DOI 10.1515/JAG.2011.006, 2011.
- [Fund et al. 2010] Fund, F., Morel, L., Boehm, J., Mocquet, A., *Assessment of ECMWF derived tropospheric delay models within the EUREF Permanent Network*, GPS Solutions, DOI : 10.1007/s10291-010-0166-8, 2010
- [Fund 2009] Fund François, *Etude des déformations de la surface terrestre du Grand Ouest de la France avec le réseau GPS réel TERIA et les stations GPS permanentes régionales*, thèse de doctorat, Ecole SPIGA, 2009
- [Ge et al. 2000] Ge, L., Han, S., Rizos, C., *The double interpolation and double prediction (DIDP) approach for INSAR and GPS integration*, IAPRS, vol.XXXIII, Amsterdam, 2000.
- [Ge et al. 2008] Ge M., G. Gendt, M. Rothacher, C. Shi, J. Liu, *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations*, Journal of Geodesy, 82 :389–399, DOI 10.1007/s00190-007-0187-4, 2008.
- [Gounon and Barboux 1997] Gounon, René, Barboux, Jean-Pierre, *DASSAULT-SERCEL NP's KART technique extended to dual-frequency reception : New applications are made possible*, Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997), Kansas City, MO, September 1997, pp. 1773-1779.
- [Grafarend et al. 1980] Grafarend E.W, Kleusberg A et Schaffrin B, *An Introduction to the Variance-Covariance-Component Estimation of Helmert Type*, p.161-180, 1980
- [Guillaume et Burki 2008] Guillaume, S., and B. Bürki, *Digital astrogeodetic online observation system Daedalus : User manual v1.0*, report, Inst. Geod. Photogramm., ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2008.
- [Haan et al. 2009] Haan, S., Holleman, I., Holtslag, A., *Real-Time Water Vapor Maps from a GPS Surface Network : Construction, Validation, and Applications*, J. Appl. Meteor., 45, 467–475, doi :10.1175/JAM2338.1., 2009.
- [Hadas et al. 2013] Hadas, T., Kaplon, J., Bosy, J., Sierny, J., Wilgan, K., *Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique*, Meas. Sci. Technol.24 055003 (12pp), 2013.

- [Hammond et al. 2010] Hammond W.C., Li Z., Plag H.P., Kreemer C. Blewitt G., *Integrated INSAR and GPS studies of crustal deformation in the Western Great Basin, Western United States*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan, 2010 p.39-43
- [Hamdi 2012] Hamdi Hanen, *Mesure de vibration d'une structure par photogrammétrie ultra-rapide*, rapport de Master 2 Recherche ENSIM, 2012.
- [Han and Rizos 1997] Han S. and C. Rizos, *Comparing GPS ambiguity resolution techniques*, GPS World, vol 8, no 10, 1997
- [Hatch 1989] [Hatch 1989] Hatch, R., *Ambiguity Resolution in the fast Lane*, Proc. of ION GPS 89, pages 45-50, 1989
- [Helmert 1907] Helmert Friedrich Robert, *Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate*, Second Edition, Teubner, Leipzig, Berlin, 1907
- [Hermann et al. 2015] Herrmann C., M. Lösler, and H. Bähr, *Comparison of SpatialAnalyzer and Different Adjustment Programs*, 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems, Volume 140 of the series International Association of Geodesy Symposia pp. 79–84, 2015.
- [Hirt et al 2010] Christian Hirt, Sébastien Guillaume, Annemarie Wisbar, Beat Bürki, and Harald Sternberg, *Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements*. Journal of Geophysical research, vol 115, 2010
- [Hooper et al. 2007] Hooper A, Segall P, Zebker H, *Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo*. JGR, 112(B07407), doi :10.1029/2006JB004763, 2007.
- [Horn et al. 1975] Horn S.D., Horn R.A., Duncan D.B., *Estimating heteroscedastic variances in linear models*, Journal of the American Statistical Association, Vol. 70, No. 350, pp. 380-385, 1975
- [Janssen et al. 2004] Janssen, V., Ge, L., Rizos, C., *Tropospheric correction to SAR interferometry from GPS observations*, GPS Solutions, 8, 140-151, 2004.
- [Jones 2000] M. Jones, *Geodetic definition (datum parameters) of the CERN Coordinate system*, CERN Internal Note, EMDS Document nr 107981, Feb 29 2000
- [Kacmarik et al. 2017] Kačmařík M., J. Douša, G. Dick, F. Zus, H. Brenot, G. Möller, E. Pottiaux, J. Kaplon, P. Hordyniec, P. Václavovic, L. Morel *Inter-technique validation of tropospheric slant total delays*, Atmos. Meas. Tech, 10, 2183-2208, 2017
- [Kampes 2006] KAMPES Bert, *Radar Interferometry Persistent Scatterer Technique*, Springer, 2006
- [Kasser et Magnenat 2017] Michel Kasser et Jean-Luc Magnenat, *Etude d'un nouveau procédé pour la mesure et la correction de la réfraction par corrélation d'images*, Revue XYZ, n°153, 4ème trimestre 2017
- [Khan et al. 2003] Khan, S. A., Scherneck, H.-G., *The M2 ocean tide loading wave in Alaska : vertical and horizontal displacements, modelled and observed*, Journal of Geodesy, 77, 3-4, 117-127, 2003.
- [Kind and Bock 2015] King, R.W. and Bock, Y., *Documentation for GAMIT GPS Analysis Software, Release 10.6*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2015
- [Kroon] Dirk-Jan Kroon, Implémentation Matlab d'une méthode Multistencils Fast Marching. (<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24531-accurate-fast-marching>).
- [Koch 1986] Koch K.R., *maximum Likelihood Estimate of Variance Components*, Bulletin Géodésique 60 :329-338, 1986

- [Kouba and Héroux 2001] Kouba, J., Héroux, P., *GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products*, GPS Solutions, Vol.5, No.2, pp. 12-28, 2001.
- [Lachapelle et al. 1992] Lachapelle, G., Cannon, M., Lu, G., *High precision GPS navigation with emphasis on carrier phase ambiguity resolution*, marine Geodesy, 15(4) :253-269, 1992
- [Lafonta et al. 2013] Jean-Ghislain LaFonta, Loic Galisson, and Boris Caro Vargas, *Close monitoring for the construction of Alaskan Way Tunnel SR99 in Seattle*, Tunnels et espace souterrain, n239, Septembre/octobre 2013
- [Lannes 2001] Lannes André, *Integer ambiguity resolution in phase closure imaging*, J. Opt. Soc Am. A, 18 :1046-1055, 2001
- [Lannes 2007] Lannes, André, *Differential GPS : the reduced difference approach*, Journal of GPS, vol 6, pp23-37
- [Lannes and Gratton 2008] Lannes, A. and Gratton, S., *QR implementation of GNSS Centralized Approach*, Journal of GPS, vol 7, No 2, pp133-147, 2008
- [Lannes and Gratton 2009] Lannes, A. and Gratton, S., *GNSS Networks in Algebraic Graph Theory*, Journal of GPS, vol 8, No 1, pp53-75, 2009
- [Lannes 2013] Lannes, A., *On the theoretical link between LLL-reduction and LAMBDA-decorrelation*, Journal of geodesy, 87 :323-335, 2013
- [Laurichesse and Langley 2015] D.Laurichesse, R. Langley, *Handling the Biases for Improved Triple-Frequency PPP Convergence*, GPS World, Innovation column, April 2015
- [Laurichesse and Privat 2015] D.Laurichesse, A. Privat, *An Open-source PPP Client Implementation for the CNES PPP-WIZARD Demonstrator*, Proceedings of the ION GNSS+ 2015, September 2015, Tampa, Florida
- [Li et al. 2014] Li X, Dick G, Ge M, Heise S, Wickert J, Bender M, *Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor : precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections*, Geophys Res Lett 41, 2014
- [Le Coz 2015] Le Coz Olivier, *Tomographie troposphérique par réseau GNSS dense sur le site du Mans. Mise en oeuvre et premières analyses.*, Mémoire de TFE ESGT, 2015
- [Legru 2011] Legru Benoit, *Mesure de déformation par combinaison de techniques géodésiques : Auscultation par GPS et topométrie*, Thèse de doctorat de l'école doctorale Arts et Métiers, spécialité géomatique, 2011
- [Lesparre et al. 2012] Lesparre, N., D. Gibert, J. Marteau, J.-C. Komorowski, F. Nicollin, and O. Coustant (2012), *Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe volcano : Comparison with geological, electrical resistivity and gravity data*, Geophys. J. Int., 190, 1008–1019.
- [Longechamp 2017] Longechamp Raphaël, *Optimisation, validation du logiciel TSAAR et densification du réseau pour l'étude de la troposphère par tomographie*, Mémoire de Fin d'Etudes ingénieur ESGT, 2017.
- [Longstreet 2011] Brad Longstreet, *Monitoring Toronto's Union Station*, Leica Reporter, n°65, septembre 2011.
- [Lösler et al. 2010] Lösler M. and Bähr H., *Vergleich der Ergebnisse verschiedener Netzausgleichsprogramme*, Vernetzt und Ausgeglichen. Kit Scientific Publishing, Zippelt, K. (ed.), Karlsruhe, 2010.
- [Lyard et al. 2006] Lyard, F., F. Lefèvre, T. Letellier and O. Francis, *Modelling the global ocean tides : a modern insight from FES2004*, Ocean Dynamics, 56, 394-415, 2006.

- [Luo and Qiao 2011] Luo Y., Qiao, S., *A parallel LLL algorithm*, Proceedings of the fourth international conference on computer science and software engineering, ACM Int Conf P Series , pp93-101, 2011
- [Lefèvre et al. 2002] Lefèvre, F., F. Lyard, C. Le Provost, and E.J.O. Schrama, *FES99 : a tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information*, J. Atm. Oceano. Tech., 19 (9), 1345-1356, 2002.
- [Lenstra et al. 1982] Lenstra AK, Lenstra HW, Lovász L, *Factorizing polynomials with rational coefficients*. Math Ann 261 :515–534, 1982
- [Macabiau 1996] Macabiau C., *Comparison of the LSAST and MAPAS methods for ambiguity resolution on the fly* DSNS'96, St Petersburg, Russia, 1996
- [Marques et al. 2011] Marques, H.-A., Monico, J.F.G., Aquino, M. , *RINEX_HO : second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files*. GPS Solutions. Volume 15, Number 3, pages 305-314, DOI : 10.1007/s10291-011-0220-1, 2011.
- [Marteau et al. 2012] Marteau, J., D. Gibert, N. Lesparre, F. Nicollin, P. Noli, and F. Giacoppo, *Muons tomography applied to geosciences and volcanology*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 695, 23–28, 2012
- [Marty et al. 2011] Marty JC., S. Loyer, F. Perosanz, F. Mercier, G. Bracher, B. Legresy, L. Portier, H. Capdeville, F. Fund, J.M. Lemoine, R. Biancale, *GINS : the CNES/GRGS GNSS scientific software*, 3rd International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 2011
- [Melbourne 1985] Melbourne WG *The case for ranging in GPS based geodetic system*. First International Symposium on Precise Positioning with GPS, Rockville, USA, 1985
- [Mirebeau 2014] Jean-Marie Mirebeau, *Anisotropic fast-marching on Cartesian grids using lattice basis reduction*, SIAM Journal on Numerical Analysis 52.4, pp. 1573–1599, 2014
- [Morel 2014] Morel, L., Pottiaux, E., Durand, F., Fund, F., Boniface, K., de Oliveira, P.-S., Van Baelen, J., *Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica*, Adv. Space Res. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.10.004>, 2014
- [Oubah et al 2018] Hamza Oubah, Leslie Sokeng, Juliet Thomas, *Développement d'une chaîne d'acquisition automatisée de mesures tachéométriques*, Projet préprofessionnel ESGT 5ème année du cycle ingénieur, 2018
- [Peyré] Gabriel Peyré, Implémentation Matlab de la méthode de Fast Marching Classique (<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6110-toolbox-fast-marching>).
- [Penna et al. 2008] Penna NT, Bos MS, Baker TF, *Assessing the accuracy of predicted ocean tide loading displacement values*, J Geod 82 :893–907. doi :10.1007/s00190-008-0220-2, 2008
- [Roman 1975] Roman, P., *Some modern mathematics for physicists and other outsiders - Volume 2, functional analysis with applications*, Pergamon, 1975
- [Roques 2013] Roques Clément, *Hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin : implications en terme de ressources en eau pour le Massif Armoricaïn*, Thèse de doctorat de l'université Rennes 1, 2013
- [Pawlowicz et al. 2002] Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S., *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE*. Computers and Geosciences 28(8) 2002.
- [Piyush Shanker et al. 2010] Piyush Shanker Shanker A. and Zebker H., *Edgelist phase unwrapping algorithm for time series InSAR analysis*, J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. 2010 Mar 1 ;27(3) :605-12. doi : 10.1364/JOSAA.27.000605, 2010

- [Rao 1971] Rao C.R., *Estimation of variance and covariance components – MINQUE theory*, Journal of multivariate analysis I, pp. 257-275, 1971
- [Reverdy 2008] REVERDY Mathieu, *Estimation des paramètres atmosphériques par GPS : analyse de la variabilité spatio - temporelle de la vapeur d'eau*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, 264p, 2008
- [Rude et al. 2018] Rude Vivien, Jaros Jakub, Zemanek Anna, Sosin Mateusz, *CLIC pre-alignment strategy : final proposal and associated results*, International Workshop on Accelerator Alignment, Chicago, 8-12 october, 2018
- [Rude et al. 2015a] Rude V. et al., *Short range alignment strategy in CLEX and first results*, Clic workshop 2015, 26-30 janvier 2015, Cern, Genève
- [Rude et al. 2015b] Rude V., *CLEX constraints between the 2 linacs*, CLIC meeting, 18 march 2015, CERN, Genève
- [Rude et al. 2015c] Rude V. et al., *Alignment and Survey results from CLEX and Lab module*, CLIC module Revue, 22 juin 2015, CERN, Genève
- [Sahin et al. 1992] Sahin M., Cross P. A. and Sellers P. C., *Variance Component Estimator applied to satellite laser ranging*, Bulletin Géodésique, 12 pages, 1992
- [Sethian 1998] James A Sethian, *Fast marching methods and level set methods for propagating interfaces*, Lecture series-van Karemman Institute for fluid dynamics 3 (1998), A1–A59.
- [Shi and Han 1992] Shi P.H. and Han S., *Centralized undifferential method for GPS network adjustment*, Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying, 57 :89-100
- [Shi et al. 2014] Shi, J., Xu ,C., Guo J., Gao ,Y., *Local troposphere augmentation for real-time precise point positioning*, Earth, Planets and Space. 66 :30, 2014.
- [Shirzaie 2011] Shirzaei M and Walter T.R., *Estimating the Effect of Satellite Orbital Error Using Wavelet-Based Robust Regression Applied to InSAR Deformation Data*, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 49, NO. 11, NOVEMBER 2011
- [Sillard 1999] Sillard Patrick, *Modélisation des systèmes de référence terrestres*. PhD thesis, Observatoire de Paris, 1999
- [Simonetto et al. 2010] Simonetto Elisabeth and Charles Pezerat, *Feasability of the deformation analysis of plate subjected to vibrations using recent computer vision methods*, PCV 2010 - ISPRS Technical Commission III Symposium on Photogrammetry Computer Vision and Image Analysis, 1-3 Sept. 2010, Paris, France, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3B, pp. 121-125.
- [Schwieger et al. 2010] Schwieger V., K. Foppe, H. Neuner, *Qualitative Aspekte zu Softwarepaketen der Ausgleichsrechnung*, Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, Contributions to the 93rd DVW-seminar. Series of the DVW, Vol. 61, 2010.
- [Takasu 2010] Takasu, T. , *Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock*, Tokyo University of Marine. IGS Workshop, 2010.
- [Tanaka et al. 2007] Tanaka, H., T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, and K. Niwa, *Development of an emulsion imaging system for cosmic-ray muon radiography to explore the internal structure of a volcano, Mt. Asama*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 575, 489–497, 2007
- [Teunissen 1995] Teunissen P.J.G., *The least square ambiguity decorrelation adjustment : a method for fast GPS ambiguity estimation*, J.Geodesy, vol.70, 1995
- [Teunissen 2008] Teunissen PJG, Amiri-Simkooei AR, *Least-squares variance component estimation*, J Geod 82(2) :65–82, 2008

- [Touchard 1999] Touchard, F., *Caractérisation hydrogéologique d un aquifère en socle fracturé*, PhD, Université de Renne 1, France, 1999
- [Treister and Haber 2016] Treister Eran and Haber Eldad, *A fast marching algorithm for the factored eikonal equation*, Journal of Computational Physics, 324 :210-225, November 2016.
- [Troller et al. 2002] Troller, M., Bürki, B., Cocard, M., Geiger, A., and Kahle, H.-G., *3-D refractivity field from GPS double difference tomography*, Geophys. Res. Lett., 29(24), 2002
- [Vasco et al. 2007] Vasco D. W., Puskas C. M., Smith R. B., and Meertens C. M., *Crustal deformation and source models of the Yellowstone volcanic field from geodetic data*, Journal of Geophysical Research, vol. 112, 2007.
- [van Loon 2008] van Loon J., *Functional and stochastic modelling of satellite gravity data*, PhD thesis, Delft University of Technology, 247 pages, 2008
- [Vendeuvre 2018] Vendeuvre Camille, Duquenne Mathieu, Rude Vivien, Vlachakis Vasileios, *Validation of Wire Measurements in the LHC Tunnel*, International Workshop on Accelerator Alignment, Chicago, 8-12 october, 2018
- [Vey et al. 2002] Vey S., Calais E., Llubes M., Florsch N., Woppelmann G., Hinderer J., Amalvict M., Lalancette M.F., Simon B., Duquenne F., Haase J.S., *GPS measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimates : a case study in Brittany, France*, Journal of Geodesy, 76 :419-427, 2002
- [Webb and Zumberge 1995] F.H. Webb, J.F. Zumberge, *An Introduction to GIPSY/OASIS*, JPL D-11088, 1995.
- [Welsch 1978] Welsch W., *A postenon Varianzenschätzung nach HELMERT*, AVN, Vol 85 : 55-63, 1978
- [Wei et al. 2010] Wei M, Sandwell D, Smith-Konter B., *Optimal combination of InSAR and GPS for measuring interseismic crustal deformation*, J. Adv. Space Res., doi :10.1016/j.asr.2010.03.013, 2010.
- [Wubben et al. 2014] Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A., *PPP with ambiguity resolution (AR) using RTCM-SSR*, IGS Workshop, 23.-27.06.2014, Pasadena, CA, USA, 2014.
- [Wubben et al. 2005] Wübbena G, Schmitz M., Bagge A., *PPP-RTK : Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks*, 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California
- [Wubben 1985] Wübbena, G, *Software Developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements*, Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the GPS, Rockville, USA, 1985
- [Williams et al. 1998] Williams, S., Y. Bock, and P. Fang , *Integrated satellite interferometry : Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products*, J. Geophys. Res., 103(B11), 27051–27067, doi :10.1029/98JB02794, 1998
- [Xu et al 2006] Xu, C., Wang H., Ge L., Yonezawa C., Cheng P., *InSAR tropospheric delay mitigation by GPS observations : A case study in Tokyo area*, J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 68, 629-638, 2006.
- [Yun et al. 2007] Yun, H.-S., Lee, D.-H., Song, D.-S., *Determination of vertical displacements over the coastal area of Korea due to ocean tide loading using GPS observations*, Journal of Geodynamics, 43, 528-541, 2007.
- [Zhang et al. 2013] Zhang H., Gao Z., Ge M., Niu X., Huang L., Tu R. and Li X., *On the Convergence of Ionospheric Constrained Precise Point Positioning (IC-PPP) Based on Undifferential Uncombined Raw GNSS Observations*, Sensors, 13, 15708-15725, 2013

[Zumberge et al. 1997] Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, F. H. Webb, *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks*, J. Geophys. Res., 102 (B3), pp 5005-5017, 1997