

STAGES M2 ou ingénieur 2018 en Géomatique proposés par le laboratoire « Géomatique & Foncier » (GeF, EA Cnam 4630)

Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) 1 boulevard Pythagore 72000 LE MANS

Indemnités de stage : Gratification selon le décret n°2008-96 du 31 janvier 2008 (1/3 SMIC)

Sujet n°1

Étude globale des gradients troposphériques par traitement GNSS

Domaines/Mots clefs : GNSS, PPP, étude des gradients troposphériques, SIG

Commanditaires : MOREL Laurent (laurent.morel@lecnam.net), DURAND Frédéric (frederic.durand@lecnam.net), FOLLIN Jean-Michel (jean-michel.follin@lecnam.net)

Problématique

Le laboratoire de géomatique et foncier de l'ESGT s'intéresse depuis de nombreuses années à l'étude de la troposphère par GNSS. Les observations GNSS réalisées par les stations permanentes ont souvent comme première vocation scientifique les applications de positionnement ou la mesure de déformation géodynamique. Cependant, elles peuvent aussi être employées à des fins météorologiques en estimant les paramètres troposphériques lors de traitements spécifiques à cette application. Ces paramètres, les délais zénithaux et les gradients spatiaux, possèdent des informations sur le contenu en vapeur d'eau et sa répartition spatiale locale. Ce sujet propose une analyse globale du comportement des gradients afin d'étudier s'ils dépendent de la situation géographique des stations ou de tout autre paramètre lié à leur environnement et sans rapport avec le contenu en vapeur d'eau local.

Contexte

Cette étude s'appliquera à des données de stations permanentes réparties sur l'ensemble du globe et choisies de manière optimale pour l'étude du comportement des gradients troposphériques dans l'environnement proche des stations GPS. En effet, après l'étude de données en Corse, en Europe et mondiales lors de précédents travaux, il s'agira ici de reprendre et poursuivre cette étude pour finaliser les analyses.

De nombreux logiciels de traitement des données GNSS existent et permettent la plupart du temps d'estimer ces paramètres. Pour cette étude, la mise en œuvre nécessitera notamment l'adaptation du script de traitement PPP avec GIPSY-OASIS. L'étudiant multipliera les traitements pour vérifier les résultats des précédentes études, les complétera en d'autres sites et

sur de plus longues périodes. Ainsi il pourra corrélérer ces gradients avec le relief et/ou d'autres phénomènes (multitrajets, ...) d'une manière statistique et dégager des conclusions.

La corrélation des gradients estimés avec le relief s'appuiera sur l'utilisation d'outils SIG permettant d'extraire des bases de données cartographiques des informations telles que la présence de reliefs dans l'environnement proche ou plus lointain de la station GNSS (jusqu'à q.q. dizaines de km). Le développement de ces outils SIG, débuté voici quelques années, devra être poursuivi et finalisé lors de ce TFE.

Objectifs

- Recherche de stations supplémentaires avec un environnement géographique particulier.
- Optimisation du script de traitement Recalcul des précédents résultats et complément Amélioration de l'outil « SIG » pour la corrélation géographique.
- Traitements des nouvelles stations sur plusieurs années Analyse des résultats et des corrélations.

Moyens mis à disposition : station de calcul.

Sujet n°2

Correction de séries d'interférogrammes d'images radar par mesures GNSS des délais troposphériques Application sur le Piton de la Fournaise et sur Le Mans

Domaines/Mots clefs : INSAR, GNSS, Tomographie 3D

Commanditaires

SIMONETTO Élisabeth (elisabeth.simonetto@lecnam.net), DURAND Frédéric (frederic.durand@lecnam.net), NICOLAS – DUROY Joëlle (joelle.nicolasduroy@lecnam.net)

Problématique

L'interférométrie d'images radar (INSAR) est une technique permettant de mesurer les déplacements verticaux du sol de faible amplitude (par exemple quelques millimètres par an) et sur de larges étendues spatiales. Outre certaines limites liées à la nature des sols, les mesures doivent être corrigées de l'atmosphère. En effet, la propagation de l'onde radar dans l'atmosphère terrestre induit un retard de trajet non négligeable dans la mesure de déplacements fins.

La littérature fait état de nombreux travaux pour corriger les phases radar du signal atmosphérique (atmosphère neutre et ionosphère), mais cela reste un sujet de recherche très actuel. Concernant l'atmosphère neutre et en particulier la troposphère, le signal est classé en deux catégories : un signal stratifié qui dépend de l'altitude et un signal turbulent local. Ce stage consistera à automatiser et à appliquer la correction de séries d'interférogrammes acquis sur une ou plusieurs années sur deux sites très différents, en s'appuyant sur des travaux antérieurs réalisés au GeF (laboratoire Géomatique et Foncier). Cette correction sera calculée à partir des délais troposphériques issus du traitement de mesures GNSS (Global Navigation Satellite System), éventuellement combinés avec un modèle d'atmosphère global. L'estimation des délais est faite au zénith d'une station GNSS ou peut être structurée par tomographie 3D.

Contexte

Ce stage s'inscrit dans un projet du GeF visant à améliorer les mesures de déformations du sol par combinaison de plusieurs techniques (GNSS, topométrie, INSAR). Dans ce cadre, la combinaison GNSS/INSAR peut prendre différentes formes et ce stage poursuivra l'étude de l'utilisation du GNSS pour corriger la mesure INSAR des phénomènes atmosphériques.

Le GeF a déjà mis en place des outils pour extraire les délais troposphériques zénithaux de stations GNSS à une date et une heure données et pour créer des cartes interpolées de délais troposphériques. Ces cartes sont alors utilisées pour calculer la correction de phase de

l'interférogramme étant donnés un type de capteur radar et ses paramètres d'acquisition. De plus, un modèle d'atmosphère global a aussi été utilisé précédemment pour fournir les délais secs stratifiés et corriger les interférogrammes.

Un traitement plus automatisé pour une série de dates (et donc d'interférogrammes) est maintenant souhaité. En effet, cela permettra d'obtenir des séries temporelles corrigées utiles pour l'interprétation géodynamique des déformations observées.

Le GeF a également mis en place une méthode d'estimation de la variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau par tomographie 3D. On aboutit dans ce cas à une structure 3D de l'atmosphère fournissant un délai non cumulé dans chaque voxel (cube élémentaire). Ces travaux seront alors exploités au cours de ce stage pour estimer plus finement les délais de phase radar dans la direction du satellite par lancer de rayon dans cette structure 3D.

Après la prise en main des outils déjà disponibles et leur automatisation, ils seront exploités sur des données dans deux contextes très différents afin de renforcer la validation de la méthode. Une première application sera réalisée avec des données GNSS et des images radar (Terrasar-X, Cosmo-SkyMed, Sentinel-1) sur le volcan du Piton de la Fournaise (La Réunion) sur une période de plusieurs années depuis 2014 couvrant un nombre important d'éruptions.

Une seconde application sera réalisée en contexte urbain sur la ville du Mans où le GeF a déployé un réseau de 9 stations GNSS pour tester les algorithmes de tomographie 3D. Les images radar Sentinel-1 seront traitées sur les années 2017 et 2018.

Les résultats avant et après correction atmosphérique pourront être comparés avec les mesures de positionnement GNSS et analysés selon les différents cas de figure (avec ou sans modèle global, méthode d'interpolation, avec ou sans la tomographie 3D, ...). De plus, la comparaison avec d'autres méthodes de correction (traitement par points stables, correction de la phase corrélée au relief) pourra également être réalisée.

Objectifs

- Traitement INSAR sur les 2 sites.
- Automatisation de l'extraction des paramètres troposphériques au zenith et par tomographie 3D aux instants d'acquisition des images radar.
- Automatisation de la correction des interférogrammes.
- Validation des méthodes.

Les résultats du stage pourront être valorisés par des présentations dans des colloques internationaux ou par la rédaction d'un article.

Moyens mis à disposition : données, poste de travail, logiciels utiles.

Sujet n°3

Développement d'un outil MSSA pour l'étude des déformations saisonnières environnementales observées par GPS

Domaines/Mots clefs : séries temporelles, géodésie spatiale, GPS, GRACE, effets de surcharge, traitement du signal, rapport signal sur bruit, analyse statistique, MSSA

Commanditaires : NICOLAS – DUROY Joëlle (joelle.nicolasduroy@lecnam.net), VERDUN Jérôme (jerome.verdun@lecnam.net)

Problématique

L'équipe de Géomatique et Géosciences (L2G) du laboratoire Géomatique et Foncier (GeF) de l'ESGT (Le Mans) mène des recherches en géodésie appliquées à la mesure de déformations d'origine géophysiques. La précision actuelle des mesures de géodésie spatiale a rendu possible l'étude de phénomènes géodynamiques de plus en plus fins. Par exemple, le radio-positionnement par satellite opéré par les GNSS (Global Navigation Satellite System), et en particulier le GPS (Global Positioning System), permet aujourd'hui la mesure quantitative des déformations de la croûte terrestre liées aux redistributions des masses environnementales (atmosphère, océans et hydrologie continentale). Ces déformations, appelés effets de surcharge, sont en général de l'ordre du millimètre. Elles peuvent néanmoins atteindre plusieurs centimètres d'amplitude dans certaines zones particulières où les effets de surcharge sont très importants. Les déformations liées aux effets de surcharge se produisent à différentes échelles de temps qui résultent de la superposition de phénomènes périodiques (périodes annuelle, semi-annuelle, diurne...) et ponctuels, liés à des événements majeurs tels que les tempêtes ou les inondations. Ces déformations comportent également des variations inter-annuelles et séculaires liées, par exemple, au changement climatique.

Pour étudier les déformations de la croûte terrestre liées à ces effets de surcharge, notamment les effets saisonniers, il est nécessaire d'étudier des séries temporelles de positionnement précises sur une longue durée, jusqu'à plusieurs dizaines d'années. La technique GPS aujourd'hui très largement répandue, permet de disposer de telles séries sur les nombreux sites équipés de récepteurs GPS (plusieurs centaines). De plus, la mission de gravimétrie spatiale GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) complète les mesures de déformation réalisées par GPS à plus grande échelle spatiale jusqu'à des périodes mensuelles. Afin de mieux comprendre le système Terre et le lien entre déformation et climat, les recherches actuelles requièrent la validation de modèles de déformation précis intégrant les différentes sources de

redistribution des masses. Pour cela, une confrontation aux observations est indispensable. Il est donc nécessaire de disposer d'outils de traitement du signal performants et adaptés à ce type de signaux pour séparer les sources et comparer les observations aux déformations prédites par les modèles géodynamiques.

Contexte

Le laboratoire dispose déjà de deux outils d'analyse des séries temporelles de positionnement : le premier basé sur la SSA (Singular Spectrum Analysis), et le second qui réalise des analyses spectrales à partir de moindres carrés non linéaires. Bien que très performants, ces deux outils ne permettent que des analyses à une variable, ce qui complique l'interprétation de signaux de position par nature tridimensionnels. De plus l'analyse simultanée de deux sources de données différentes s'avère indispensable pour aller plus loin dans la caractérisation des déformations environnementales. De nouveaux outils sont donc nécessaires.

Au cours de ce stage, il s'agira de développer et de valider un nouvel outil d'analyse multivariable des séries temporelles, basé sur la MSSA (Multivariate Singular Spectrum Analysis) et de l'appliquer à l'analyse des signaux de surcharge sur une zone d'étude située en Amérique du Sud. Dans cette région où les signaux annuels sont très forts, près de la moitié de l'amplitude du signal annuel n'est pas expliquée par les modèles classiques ce qui suggère une contribution conséquente des rivières. Leur récente prise en compte dans les modèles de surcharge doit donc être étudiée et validée.

Objectifs

Dans un premier temps, l'étudiant(e) se familiarisera avec les séries temporelles de positionnement et avec les signaux de surcharge, à partir de séries de positions GPS, de séries obtenues par GRACE et de modèles de déformations calculés par ailleurs. Dans un second temps, il s'agira de prendre en main l'outil de SSA déjà développé sous Matlab et de l'adapter sous Python sur le serveur de calcul du laboratoire. Il s'agira notamment de l'automatiser afin de pouvoir l'utiliser aisément pour un nombre important de stations GPS (par exemple plus de 100). L'étudiant(e) devra alors améliorer cet outil et en particulier développer une méthode novatrice basée sur la MSSA. Des sorties graphiques et numériques devront également être développées afin de faciliter l'analyse des signaux de surcharge, notamment en termes de corrélations entre composantes du signal et d'analyse spatiale (ex. distance à la rivière, bassin versant considéré...).

Après validation, les outils développés seront exploités pour la zone Amérique du Sud pour analyser conjointement les signaux GPS et GRACE et les comparer entre eux, puis aux déformations prédites par les modèles géodynamiques. Il s'agira également de voir dans quelle

mesure les différentes composantes du signal saisonnier peuvent être séparées. L'analyse des signaux permettra ainsi de contribuer à une meilleure compréhension des signaux de position ainsi qu'à la validation des modèles de déformations liées aux surcharges environnementales, et en particulier aux développements récents en termes de modélisation hydrologique. Les résultats du stage pourront être valorisés par des présentations dans des colloques internationaux ou par la rédaction d'un article.

Moyens mis à disposition : Poste de travail et accès au serveur de calcul, données, logiciels utiles.

Sujet n°4

Traitement du signal pour la réflectométrie GNSS par mesure du déphasage de porteuse

Domaines/Mots clefs : Réflectométrie GNSS, traitement du signal, déphasage de porteuse, altimétrie

Commanditaires : VERDUN Jérôme (jerome.verdun@lecnam.net), Nicolas-Duroy Joëlle (joelle.nicolasduroy@lecnam.net), CALI José (jose.cali@lecnam.net), LESTARQUIT Laurent (laurent.lestarquit@cnes.fr), BIANCALE Richard (richard.biancale@cnes.fr)

Problématique

La réflectométrie GNSS (GNSS-R) est une technique alternative d'utilisation des GNSS qui consiste à exploiter conjointement les signaux directs et réfléchis, émis en continu par les quelques 90 satellites des constellations GPS/GLONASS/BEIDOU/GALILEO. Ces signaux se réfléchissent à la surface de la Terre essentiellement aux interfaces air/eau et, dans une moindre mesure, aux interfaces air/sol. L'analyse de la différence d'amplitude et/ou du retard de phase entre signaux directs et réfléchis permet de déterminer des grandeurs géophysiques de la surface de réflexion, telles la hauteur, le taux d'humidité, la rugosité, et les teneurs en biomasse, neige et glace (Motte et al., 2016). L'évolution actuelle des GNSS est favorable au développement de la réflectométrie. En effet, le nombre de satellites GNSS en visibilité simultanée progresse constamment et, par ailleurs, le nombre de ceux qui transmettent deux ou trois fréquences non cryptées, c'est-à-dire accessibles sans dégradation, est en forte augmentation de par la modernisation de GPS et le déploiement de GALILEO. Ces signaux ont également l'intérêt d'être plus précis que les signaux GPS « historiques », en particulier le Alt-BOC de GALILEO.

Contexte

Le laboratoire Géosciences Environnement de Toulouse (GET, UMR 5563) et le Centre National d'Études Spatiales ont mis au point et expérimenté avec succès, un récepteur dédié à la réflectométrie, capable de réaliser des mesures de déphasage de porteuse entre les signaux GNSS directs et réfléchis, avec une précision inégalée d'un centimètre sur plusieurs fréquences simultanément (Lestarquit et al., 2016). Pour réaliser le traitement numérique des signaux GNSS, ce récepteur utilise le logiciel libre « GNSS - SDR » (Fernandes - Prades et al., 2011), basé sur la bibliothèque « GNU-RADIO » et développé par le Centre Technique de Télécommunications de Catalogne. L'avantage de ce logiciel vient de ce que le traitement du signal GNSS direct, notamment l'acquisition du signal, la génération des codes, la gestion des canaux et leur démodulation ainsi que l'estimation de la position, la vitesse et le temps (« PVT

computation »), font partie de ses fonctionnalités de base. La difficulté du traitement de réflectométrie GNSS réside dans la fixation de l'ambiguïté entière inhérente à toute mesure de déphasage de porteuse. A l'instar du positionnement GNSS précis, une bonne estimation du retard troposphérique est primordiale pour fixer avec succès les ambiguïtés entières des mesures de phase de porteuse. Dans le cas d'un lever aéroporté de réflectométrie GNSS opéré depuis un drone aérien, un avion ou un ballon « basse couche » ou stratosphérique, la détermination affinée de l'orbite des satellites émetteurs et de la trajectoire du porteur et la prise en compte de la courbure de la Terre et l'ondulation du géoïde sont absolument cruciales pour atteindre un niveau de précision d'un centimètre. C'est pourquoi l'utilisation conjointe, voire l'intégration, des traitements de réflectométrie dans le logiciel de géodésie spatiale GINS doivent être envisagées.

Objectifs

L'objectif de ce stage est de contribuer au développement de la chaîne de traitement de réflectométrie GNSS par la conception et la validation d'un algorithme de fixation des ambiguïtés entières des mesures de phase de porteuse. L'étude se focalisera sur l'altimétrie des plans d'eau (océans, mers, lacs et rivières) avec pour ambition la mesure de la hauteur d'eau avec une incertitude égale ou inférieure à un centimètre. La mise au point d'un protocole de validation et d'évaluation comportant l'acquisition de hauteurs d'eau référence par des techniques classiques de topométrie, y compris le positionnement GNSS conventionnel, et sa mise en œuvre sur des zones de test, constituera le volet expérimental de ce stage. Une évaluation de la qualité des autres grandeurs géophysiques estimées par la réflectométrie, tels le retard troposphérique entre le récepteur et le plan d'eau et la pente de la surface de l'eau, pourra être également réalisée à cette occasion.

Les résultats de ce stage apporteront des informations capitales à la fois pour l'étude de faisabilité et le dimensionnement d'une future mission spatiale de réflectométrie GNSS et la validation des mesures des satellites altimétriques actuels (Jason-3, Sentinel-3, ...) et futurs (Sentinel-6/Jason-CS et, surtout, SWOT), via des récepteurs dédiés au sol ou embarqués sur des drones aériens. Parmi les nombreuses applications scientifiques de la réflectométrie GNSS sur plans d'eau, figurent la mesure sur le long terme et à haute précision (q.q. millimètres) de l'élévation du niveau des mers, la mesure des structures des courants côtiers ou de pleine mer, la mesure des hauteurs d'eau continentales des rivières et des lacs et la détermination du contenu en vapeur d'eau de la portion de troposphère comprise entre le plan d'eau et le récepteur.

Références

Fernandez-Prades C. , Arribas J., Closas P., Aviles C. and L. Esteve (2011). « GNSS-SDR: An open source tool for researchers and developer »; presented at the ION GNSS Conf., Portland, Oregon, Sep. 19-23, 2011.

Lestarquit L., Peyrezabes M., Darrozes J., Motte E., Roussel N., Wautelet G., Frappart F., Ramillien G., Biancale B. and M. Zribi (2016). « Reflectometry with an open-source Software GNSS receiver. Use Cases with Carrier Phase Altimetry », IEEE JSTARS, 2016.

Motte E., Egido A., Roussel N., Boniface K., Frappart F. (2016). « Applications of GNSS-R in continental hydrology ». In Baghdadi N., Zribi M. (Eds.), Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology, 281-321, Elsevier, Amsterdam, Nederland.

Moyens mis à disposition

- Espace de travail à l'ESGT.
- Logiciels de calcul (R, MatLab, SciLab, Maxima) et langages de programmation (C, C++, fortran 95, Python).
- Logiciels de traitement GNSS.
- Logiciel de géodésie spatiale : GINS-PC.
- Récepteur GNSS dédié à la réflectométrie et logiciel GNSS-SDR. - Accès aux serveurs de calcul de l'ESGT.
- Accès aux instruments de topométrie et au parc de récepteurs GNSS de l'ESGT.
- Encadrement assuré par des ingénieurs au CNES, des enseignants-chercheurs des laboratoires GET et GeF.