



HAL
open science

Mise en place d'une méthode de détermination de la hauteur d'eau des océans à partir d'un capteur LiDAR aéroporté dans le cadre de la calibration / validation de l'altimètre SWOT

Romain Serthelon

► To cite this version:

Romain Serthelon. Mise en place d'une méthode de détermination de la hauteur d'eau des océans à partir d'un capteur LiDAR aéroporté dans le cadre de la calibration / validation de l'altimètre SWOT. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03268346

HAL Id: dumas-03268346

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03268346>

Submitted on 23 Jun 2021

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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Romain SERTHELON

Mise en place d'une méthode de détermination de la hauteur d'eau des
océans à partir d'un capteur LiDAR aéroporté dans le cadre
de la calibration / validation de l'altimètre SWOT

Soutenu le 14 octobre 2020

JURY

Monsieur José Cali	Président du jury
Monsieur Laurent FROIDEVAL	Maître de stage
Monsieur Jérôme VERDUN	Enseignant référent

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Laurent Froideval pour m'avoir permis d'intégrer le laboratoire M2C. Je le remercie de m'avoir conseillé et aidé tout au long de ce travail de fin d'études. Je le remercie aussi pour sa bienveillance et son suivi lors de cette période compliquée.

Je remercie Christophe Connessa et Xavier Pellerin-Lebas pour l'apport de leurs connaissances ainsi que pour leur aide concernant la mise en place des logiciels et du système d'exploitation Linux.

Je remercie Olivier Montfort pour les conseils sur les mesures GNSS ainsi que pour tout le temps qu'il m'a consacré.

Je tiens à remercier l'équipe du GRGS et plus particulièrement Jean-Charles Marty ainsi que Félix Perosanz. Ils m'ont tous deux apporté une grande aide dans la mise en place et l'utilisation du logiciel GINS ainsi que des conseils précieux concernant les traitements GNSS.

Enfin, je remercie Jérôme Verdun pour son suivi ainsi que pour ses réponses toujours très pertinentes.

Liste des abréviations

AMR : Advanced Microwave Radiometer

CNES : Centre National d'Études Spatiales

DGPS : Differential Global Positioning System

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

FOV : Field Of View

GINs : Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées

GLONASS : GLobalnaïa NAvigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPS : Global Positioning System

GRGS : Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale

IGS : International GNSS Service

IPPP : Integer Precise Point Positioning

LiDAR : Light Detection And Ranging

MSS : Mean Sea Surface

NTC : Non Time Critical

PCO : Phase Center Offset vector

PPP : Precise Point Positioning

RGP : Réseau GNSS Permanent

RMS : Root Mean Square

SAR : Synthetic Aperture Radar

SLA : Sea Level Anomaly

SSE : Sea Surface Elevation

SSH : Sea Surface Height

SSHA : Sea Surface Height Anomaly

SWOT : Surface Water and Ocean Topographie

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Introduction	5
I LA MISSION SPATIALE : SWOT	9
I.1 LES ENJEUX DE LA MISSION SPATIALE.....	9
I.1.1 Mieux comprendre le fonctionnement des océans	9
I.1.2 Observer les ressources d'eau douce de la Terre.....	10
I.2 FONCTIONNEMENT DU SATELLITE D'OBSERVATION SWOT.....	12
I.2.1 Altimétrie satellitaire	12
I.2.2 Instruments d'orbitographie	13
I.2.3 Instruments d'observation de la surface terrestre.....	15
I.3 CALIBRATION DES MESURES DU SATELLITE SWOT.....	18
II DETERMINATION DE LA SURFACE DES OCEANS PAR LiDAR AEROPORTE	21
II.1 PRESENTATION DES MOYENS ET DES RESSOURCES UTILISES DANS CES TRAVAUX	21
II.1.1 Le système LiDAR	21
II.1.2 Les logiciels utilisés.....	24
II.1.3 Les données sélectionnées	26
II.2 DETERMINATION DE LA TRAJECTOIRE DE L'AERONEF.....	28
II.2.1 Le positionnement GNSS.....	28
II.2.2 Les erreurs dues aux mesures GNSS	29
II.2.3 Les méthodes de traitement des mesures GNSS	31
II.2.3.1 Differential Global Positioning System.....	31
II.2.3.2 Integer Precise Point Positioning	32
II.2.4 Traitement des données GNSS réalisé.....	34
II.2.5 Détermination de la SSH.....	36
II.3 ANALYSE DES RESULTATS	37
II.3.1 Analyse de la trajectoire calculée à partir de mesures GNSS	37
II.3.2 Analyse des nuages de points.....	43
III INTEGRATION DES MESURES LiDAR DANS LE PROJET SWOT.....	44
III.1 LES PRODUITS DES MISSIONS SENTINEL 3.....	45
III.1.1 Les différents types de produits	45
III.1.2 Les différents types de données	48
III.2 METHODES DE CALIBRATION ET VALIDATION DES MESURES SATELLITAIRES.....	50
III.2.1 Études de comparaisons de SSH déterminée à partir de données LiDAR et satellitaires.....	50
III.2.2 Proposition de comparaison des données SSH du laboratoire M2C avec celles de la mission Sentinel 3.....	52
Conclusion.....	54
Bibliographie	56
Table des annexes.....	59
Liste des tableaux	78

Introduction

Les océans forment le plus grand écosystème sur la planète Terre. Ils recouvrent environ 71% de la surface du globe. Par ailleurs, ils constituent l'un des milieux naturels les plus méconnus. En effet, compte tenu de leur taille, des zones éloignées des terres ainsi que des zones profondes, l'Homme peine à les explorer. La complexité des moyens à mettre en œuvre pour observer cet environnement ralentit l'étude et la compréhension de cet écosystème. Pour autant, l'Homme connaît l'importance des océans pour la vie sur Terre. Ces derniers fournissent plus de 50 % de l'oxygène présent, indispensable pour un grand nombre d'espèces vivantes. De plus, à travers l'action thermique du soleil, l'eau présente dans les océans s'évapore et forme un cycle permettant d'alimenter l'ensemble de la Terre en eau douce.

Les océans ont pour particularité d'absorber de grandes quantités de dioxyde de carbone et de chaleur. Ils représentent ainsi le plus grand réservoir de chaleur de la planète. Cette chaleur est absorbée, transportée et restituée grâce aux mouvements d'eau. Ces mouvements sont dus à de multiples phénomènes et sont en particulier causés par les courants tels que le Gulf Stream. Par conséquent, ils régulent le climat mondial et façonnent les saisons.

Les océans forment également le biotope disposant du plus grand nombre d'espèces animales et végétales. Les ressources qui le composent sont très nombreuses et représentent une grande richesse pour l'Homme. Elles permettent de nourrir environ 3.5 milliards d'êtres humains, soit près d'une personne sur deux. L'étude des éléments qui constituent ce biotope a notamment permis à l'Homme de faire des avancés dans des domaines tels que la médecine et la cosmétique. Sur un plan économique, les océans offrent de véritables opportunités. Ils ont permis de développer le tourisme, l'industrie, la pêche, les transports, les énergies renouvelables ou encore le commerce.

Les océans sont donc essentiels à la vie sur Terre. Cependant, ils sont aussi à l'origine de phénomènes dévastateurs tels que les cyclones, les tsunamis et les inondations. En outre, ils participent au réchauffement climatique : la vapeur d'eau qui en émane forme un gaz à effet de serre bien plus puissant que le dioxyde de carbone. Par conséquent, l'Homme n'a cessé de développer des méthodes afin d'étudier les océans et de comprendre leur fonctionnement.

De nombreuses méthodes ont été créées afin d'étudier les océans comme les marégraphes, les bouées GPS, ou encore les sonars. Cependant, ces méthodes fournissent des mesures sur des portions infimes de l'océan à un instant précis. Ces mesures permettent ainsi d'obtenir des informations importantes sur cet écosystème mais ne permettent pas

d'observer des phénomènes à grande échelle. Malgré la réalisation de grandes campagnes de mesures, il est impossible de couvrir l'ensemble des océans. De plus, il est compliqué d'étudier des phénomènes de petite taille ou non prévisibles du fait de leur caractère éphémère. Le manque d'information fait de cet écosystème un milieu peu connu. Pour résoudre ce problème, l'altimétrie satellitaire a été développée. De nombreuses missions ont été mises en place par la NASA et le CNES depuis les années 1970.

La première véritable mission d'observation satellitaire se nomme TOPEX/Poseidon et débuta en 1992 selon la page Missions Passées du site du CNES (CNES, 2020). Elle permit pendant près de 13 ans d'observer la surface des océans. Ces missions ont pour but d'observer la Terre et plus particulièrement les océans à grande échelle. La figure 1 illustre une partie des satellites mis en place durant ces missions. L'altimétrie satellitaire permet de couvrir de grandes zones en peu de temps ainsi que d'observer des zones difficiles d'accès. L'altimétrie satellitaire possède donc de gros avantages. Cependant, seule la surface des océans est observée car les



Figure 1 : Extrait des missions satellitaires (JPL, 2020)

signaux envoyés par les instruments présents à bord des satellites ne permettent pas de pénétrer la surface jusqu'au plancher océanique. De plus, la résolution des capteurs actuel ne permet pas d'observer les phénomènes de petite taille.

La dernière mission en liste se nomme Surface Water and Ocean Topographie (SWOT) et est mise en place par la NASA, le CNES, le Canadian Space Agency et le UK Space Agency d'après la page SWOT du site du CNES (CNES, 2020). Dans la poursuite des précédentes missions (JASON 1 et JASON 2), le satellite SWOT a pour objectif d'observer les surfaces en eau de la Terre. Il possèdera un altimètre nadir, permettant d'observer la surface se trouvant au nadir de sa position, similaire aux instruments des missions précédentes. À cela s'ajoutera un radar interférométrique fonctionnant en mode SAR afin d'observer une bande d'environ 120 km de large le long de la trace au sol. Grâce à ce dispositif, le satellite SWOT observera la quasi-totalité de la surface des océans en 21 jours.

De plus, le satellite SWOT mesurera 60 % des lacs et des rivières ainsi que les zones inondables et les zones humides. Ce nouvel instrument apportera également une résolution d'observation dix fois plus fine que les meilleurs capteurs actuels. Sa capacité à observer des phénomènes de petite ampleur à l'échelle de la Terre sera sans précédent. En effet, les perturbations océaniques d'une dimension de 20 kilomètres, les lacs d'une surface supérieure à 250 x 250 mètres ainsi les cours d'eau de plus de 100 mètres de large seront pour la première fois mesurés sur l'ensemble de la Terre.

La mise en place de l'altimétrie satellitaire pose la question de l'étalonnage des capteurs présents sur les satellites. Bonnefond and al (2011) relèvent la complexité d'établir des mesures avec une autre méthode pouvant servir d'élément de comparaison aux mesures satellitaires. Ces mesures doivent provenir du même endroit dans le même cadre de référence avec une meilleure précision que celles des satellites. Les mesures réalisées par le laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) pourraient résoudre ce problème.

Dans le cadre de la mission SWOT, le laboratoire M2C fait partie de la Science Definition Team qui définit les objectifs scientifiques de la mission et la contribution de SWOT dans les zones côtières et estuariennes. Ce laboratoire est une unité mixte de recherche (UMR 6143) créée en 1996 rattachée au CNRS, à l'université de Caen Normandie et à l'université de Rouen Normandie. Le laboratoire s'intéresse à la caractérisation et à la modélisation de la dynamique des processus naturels et des différents compartiments le long du continuum Terre-Mer. Afin d'étudier ce milieu, le laboratoire dispose d'un système LiDAR aéroporté. Cet instrument lui permet de cartographier les zones côtières. Il sert aussi à topographier la surface des océans afin de déterminer la Sea Surface Height (SSH).

En outre, le laboratoire a bénéficié d'un soutien fort de la part du CNES sur SWOT sur plusieurs années au travers des projets Tosca. Ces projets s'intéressent à l'application de SWOT dans l'estuaire de la Seine et de la Gironde et sur le littoral haut-normand. À l'issue de ces projets, l'estuaire de la Seine a été retenu par le CNES et la NASA parmi les Golden sites pour la calibration et la validation des mesures SWOT. Par conséquent, la question suivante se pose : « Que peuvent apporter les mesures de la SSH par LiDAR aéroporté dans la validation et la calibration des capteurs de la mission SWOT ? ».

Pour répondre à cela, ce mémoire présentera dans un premier temps les objectifs et les moyens mis en place pour la mission SWOT. Il détaillera le fonctionnement du satellite ainsi que la détermination de la SSH à partir de mesures satellitaires. Par la suite, le matériel et les moyens utilisés pour ces travaux seront identifiés. Les traitements des mesures LiDAR

seront expliqués et évalués afin d'étudier la capacité de ces mesures dans la calibration du satellite SWOT. Pour finir, les données produites à partir des mesures satellitaires seront présentées. Des méthodes de comparaison de SSH calculées grâce aux mesures LiDAR et de SSH déterminées à partir de données satellitaires seront proposées afin de poursuivre cette étude dans le but d'établir une méthode de calibration et de validation des mesures du satellite SWOT.

I La mission spatiale : SWOT

I.1 Les enjeux de la mission spatiale

La mission SWOT sera la première étude mondiale couvrant l'ensemble des surfaces en eau présentes sur la Terre. En effet, ses prédécesseurs Jason 1 et 2 ainsi que TOPEX/Poseidon n'observait que la partie de l'océan se trouvant au nadir de leur position. De plus, grâce à l'interférométrie radar dernière génération, le satellite SWOT pourra également observer des zones plus restreintes telles que les lacs, les rivières et les zones humides.

I.1.1 Mieux comprendre le fonctionnement des océans

L'océan est le plus grand réservoir de chaleur et de dioxyde de carbone de la Terre. Les circulations de masses d'eau internes aux océans façonnent et régulent le climat à l'échelle du globe. Ce phénomène est amplifié par la vapeur d'eau issue de l'évaporation des océans. L'eau présente dans l'atmosphère produit un effet de serre beaucoup plus important que celui créé par le dioxyde de carbone. Les missions satellitaires existantes et précédemment réalisées ont permis de mieux comprendre cette particularité des océans et de mettre en évidence des phénomènes tels qu'El Niño ou la Niña selon TERNON (2019). Elles ont aussi permis de déterminer la topographie des océans, puisque ces derniers possèdent des vallées et des collines similaires à celles observables sur la terre ferme. Ces différences de hauteurs sont principalement liées à l'attraction gravitationnelle.

Malgré ces importantes avancées scientifiques, une grande partie du mouvement océanique se produit à une trop petite échelle pour être détectée par les technologies actuelles. Cependant, ces mouvements ne sont pas négligeables puisqu'ils contiennent la majeure partie de l'énergie permettant le mélange et le transport de l'eau. Afin d'améliorer la compréhension du climat, il est donc primordial de les observer. Selon la National Aeronautics and Space Administration (NASA), le satellite SWOT possédera une technologie capable de détecter des caractéristiques de l'océan avec une résolution plus de 10 fois supérieure aux capteurs actuels. En effet, la meilleure résolution spatiale existante étant de 200 km, elle passera à 15 km avec le satellite SWOT. Ce satellite permettra désormais d'étudier la majeure partie des phénomènes transportant la chaleur et le carbone, se produisant à une échelle inférieure à 100 kilomètres, encore jamais observés à l'échelle de la Terre. SWOT détectera la formation,

l'évolution et la dissipation des tourbillons, les courants étroits et les turbulences afin de comprendre la dynamique des océans.

De plus, les progrès d'observations mis en place à travers la mission SWOT auront un impact dans plusieurs domaines d'application autres que le climat. En effet, selon la page Oceanography du site du JPL (JPL, 2020), le mouvement océanique déplace de la chaleur, mais aussi des nutriments qui sont présents en suspension dans l'eau. Ces nutriments servent de nourriture au phytoplancton qui sert lui-même de nourriture aux poissons. Ainsi, une meilleure compréhension des déplacements océaniques permettra une meilleure gestion des pêcheries et des réserves marines.

La mission SWOT, au travers de l'étude des courants océaniques, pourra également apporter des informations supplémentaires concernant le mouvement des polluants présents dans l'eau. Ces derniers (pétrole, débris, rejets nocifs, etc.) sont transportés par l'eau et se dispersent en fonction des courants à petite échelle. Un suivi précis de leur mouvement facilitera l'évaluation, la prévision et la réponse aux risques naturels. Une meilleure compréhension des courants marins servira aussi aux transporteurs maritimes afin d'optimiser les trajectoires des bateaux durant leurs opérations.

Enfin, les zones côtières seront surveillées de près par le satellite SWOT. Cela permettra d'améliorer la gestion des côtes et de prévenir notamment l'érosion du littoral et les risques d'inondation liés à la montée des eaux. De plus, des applications propres à ces zones particulières telles que la modélisation des ondes de tempête et du transport de sédiments ou encore l'étude de la qualité de l'eau seront améliorées.

I.1.2 Observer les ressources d'eau douce de la Terre

L'eau douce est l'une des ressources les plus prisées sur Terre compte tenu des besoins vitaux de l'être humain. Cependant, l'inégale répartition et les variations temporelles de cette ressource complexifient sa gestion. D'après Mekonnen and al. (2016), l'eau serait présente en quantité suffisante pour répondre aux besoins de notre société. Pourtant, une fraction croissante de la population mondiale subit des pénuries d'eau durant des périodes précises de l'année. Ce phénomène est dû en partie au réchauffement climatique. La gestion de l'eau douce est donc un enjeu majeur de notre société.

Le stockage et les variations d'eau douce liés au cycle de l'eau sont des phénomènes encore peu étudiés et mal compris. L'apport en eau douce provient de la fonte des neiges et des glaces ainsi que des pluies générées par l'évaporation de l'eau et l'évapotranspiration des

plantes. Ces eaux s'infiltreront ensuite dans le sol et ruissellent pour atteindre les océans ou se stocker dans des réservoirs d'eau naturels. Par conséquent, la majorité de l'eau douce accessible aux êtres humains est disponible dans les lacs, dans les cours d'eau (ruisseaux, rivières, fleuves) et dans le sol (rivières souterraines, nappes phréatiques).

Les précédentes missions satellitaires utilisent majoritairement des altimètres nadir afin d'observer ces réserves en eaux. Ces instruments permettent une grande précision de mesures, mais limitent la surface d'observation au sol. En effet, 60% des lacs et rivières sont manqués. D'après la page Hydrology du site du JPL (JPL, 2020), grâce aux nouvelles technologies développées par la mission SWOT, la quasi-totalité des masses d'eau sur Terre sera observée. De plus, l'amélioration de la résolution des capteurs permettra désormais de détecter les lacs et les réservoirs d'eau d'une dimension supérieure à 250 m x 250 m. Les cours d'eau d'une largeur supérieure à 100 m, les canaux, les plaines inondables et les hautes terres seront eux aussi mesurés. SWOT aura pour objectif de fournir la toute première vue complète des masses d'eau douce présentes sur Terre.

L'eau se déplace sur Terre en formant un cycle perpétuel. Sous l'effet du soleil, l'eau des rivières, des lacs, des mers et des océans s'évapore en de fines gouttelettes. En se regroupant, elles forment des nuages qui, poussés par le vent, rencontrent des masses d'air froid et donnent naissance à la pluie. L'eau de pluie s'infiltré dans le sol et rejoint les nappes phréatiques, les sources, les rivières et les fleuves pour recommencer sans fin le même voyage. Dans ce schéma simplifié, les quantités d'eau quittant la surface terrestre sont égales aux quantités d'eau se déversant sur Terre. Cette équation d'équilibre sert de base aux modèles actuels. Les modèles les plus avancés comparent les prévisions avec les précipitations réellement tombées afin de s'améliorer. Tout comme les modèles de prévisions de précipitation, les bilans hydriques réalisés ne reflètent pas la réalité. Ce problème est dû au manque d'information sur les ruissellements mondiaux et notamment dans les zones reculées. De plus, des études ont montré que les modèles prédisent parfois des schémas de ruissellement très différents de la réalité. Pour pallier ce problème, la nouvelle technologie embarquée par le satellite SWOT permettra d'observer les ruissellements avec une échelle spatiale plus fine. Ces mesures, combinées aux observations des océans et des réserves d'eau douce, permettront de calculer les échanges d'eau au niveau mondial et ainsi d'améliorer le bilan hydrique.

L'approche globale de la mission SWOT rendra possible l'observation des environnements éloignés et politiquement instables. Toutes ces observations permettront d'enrichir notre savoir sur l'ensemble des phénomènes hydriques sur Terre. Grâce à une

meilleure compréhension du climat et du cycle de l'eau, les risques liés aux inondations et aux sécheresses seront mieux appréhendés. De plus, les impacts provoqués par le réchauffement climatique et par la montée des eaux sur les secteurs tels que l'agriculture seront visibles.

Sur un aspect plus économique, la meilleure gestion des risques bénéficiera au secteur des assurances. En effet, chaque année des milliards de dollars de dommages matériels sont à déplorer à cause des inondations. La page Application Areas du site du JPL (JPL, 2020) fait référence à une étude publiée dans Engineering News Record montrant que les sites ayant investi dans la préparation contre les inondations ont subi 70% de dégâts matériels en moins.

Le commerce fluvial pourra lui aussi se servir des observations du satellite SWOT puisque ces dernières apporteront une connaissance supplémentaire sur les débits et les hauteurs d'eau. Les bateaux et navires pourront aborder plus facilement les itinéraires à emprunter et intégrer les mesures de SWOT pour connaître les profondeurs d'eau réelles à travers leurs instruments de bathymétries.

La mission SWOT présente donc des enjeux très importants et vise à mieux comprendre l'ensemble des phénomènes hydrauliques grâce à l'observation de la quasi-totalité de la Terre avec une résolution encore inégalée. L'avancée majeure envisagée par cette mission aura des répercussions dans un très grand nombre de domaines et sera possible grâce à la mise en place du satellite SWOT.

I.2 Fonctionnement du satellite d'observation SWOT

I.2.1 Altimétrie satellitaire

Afin d'observer la Terre à grande échelle avec une fréquence d'observation élevée, l'altimétrie satellitaire a été développée par les agences spatiales. La première mission nommée GEOSAT a vu le jour dans les années 70-80. Son but premier était de mesurer le géoïde marin mais, lors de sa seconde phase, elle a aussi permis d'observer les dynamiques océaniques.

En 1982, la mission Topex/Poseidon a développé des instruments plus précis et a lancé un grand nombre de missions utilisant l'altimétrie radar pour observer la surface des océans. Les satellites radar émettent des signaux vers la surface de la Terre et mesurent le temps aller-retour de chaque impulsion. À partir de cette mesure du temps, la distance entre le satellite et la surface ayant réfléchi l'onde peut être calculée. Une fois cette distance connue, il suffit de déterminer l'orbite du satellite afin de connaître la position des surfaces au sol avec plus ou moins de précision suivant les instruments utilisés. Selon les missions, le radar

altimétrique utilise des ondes de fréquences différentes (bande ku, bande C, bande S...). Chaque fréquence possède des propriétés spécifiques utiles ou non pour la mission. De plus, l'analyse du signal reçu après réflexion sur la surface visée permet d'obtenir des informations sur les caractéristiques physiques de cette surface. Par exemple, la rugosité des matériaux modifie l'onde reçue par le satellite, il est donc possible de savoir s'il s'agit d'eau, de glace, de terre, etc.

SWOT fera partie de la dernière génération de satellite radar et possèdera des instruments propres à sa mission. Le fonctionnement de ce satellite peut se diviser en deux sections. Une première permettant de déterminer la position du satellite et une seconde servant à observer la Terre.

I.2.2 Instruments d'orbitographie

Comme énoncé précédemment, pour déterminer la topographie des océans avec précision, le satellite doit dans un premier temps connaître précisément sa position. Pour cela, d'après la page SWOT du site du CNES (CNES, 2020), un système Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) est embarqué par le satellite SWOT. Cet instrument a été développé par le CNES, conjointement avec l'Institut de l'information géographique et forestière (IGN) et le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS) à la fin des années 1980 afin de déterminer avec précision les orbites des satellites. Selon la page Le système DORIS du site de l'IGN (IGN, 2020), DORIS fonctionne grâce à un réseau mondial de balises émettrices situées à la surface du sol et connues en coordonnées. Chaque balise émet deux signaux omnidirectionnels à des fréquences connues. Le récepteur embarqué réalise des mesures de décalages Doppler sur les deux fréquences afin de déterminer la distance qui le sépare de la balise. L'utilisation de signaux bifréquences sert à réduire les erreurs dues à la propagation du signal dans l'atmosphère. Une fois les mesures réalisées, elles sont stockées par le satellite et envoyées à des stations de calcul au sol. Des traitements d'orbitographie sont ensuite réalisés sur les mesures afin d'éliminer les erreurs ou de les réduire dans le but d'obtenir des orbites précises. Le récepteur DORIS que possède SWOT est le même que celui embarqué par les satellites Sentinelles 3 (A et B). Il est dit récepteur de nouvelle génération et permet d'effectuer des observations multicanaux et numériques sur sept balises émettrices en simultané. De plus, il possède un système Diode permettant aux satellites de calculer sa position et sa vitesse en temps réel. D'après la page SWOT du site du CNES (CNES, 2020), la précision en temps réel de la solution DORIS est d'environ 10 cm.

En complément, SWOT embarque un système de positionnement GNSS afin de déterminer précisément son orbite. Cet instrument a été conçu en s'inspirant des appareils embarqués sur les satellites COSMIC 2 et DASC dans le but d'atteindre les mêmes exigences de performance que celui présent sur Jason 1. Ce système peut recevoir les signaux de navigation bi-fréquences des satellites de la constellation GPS. À partir de ces signaux, l'instrument réalise des mesures de pseudo-distance d'une précision de 10 cm et des mesures de phase avec une précision de 1 millimètre. La combinaison des mesures GPS et DORIS dans le traitement améliore la précision du positionnement dans les trois dimensions.

Le dernier système servant à déterminer la position du satellite est le Laser Retroreflectory Array (LRA). Il permet de réfléchir une impulsion laser envoyée depuis la Terre jusqu'à son point d'origine. Une fois de plus, le temps aller-retour du signal permet de déterminer avec précision la position du satellite. Le nombre limité de stations au sol envoyant les impulsions ainsi que la sensibilité des lasers aux conditions météorologiques ne permettent pas un suivi du satellite. Ainsi, ce système est utilisé pour calibrer les deux précédents systèmes de localisation. Ce dispositif LRA, visible sur la figure 2, se compose de neuf coins de cubes en quartz disposés en forme de cône tronqué. Un coin de cube est situé au centre et les huit autres sont placés autour.

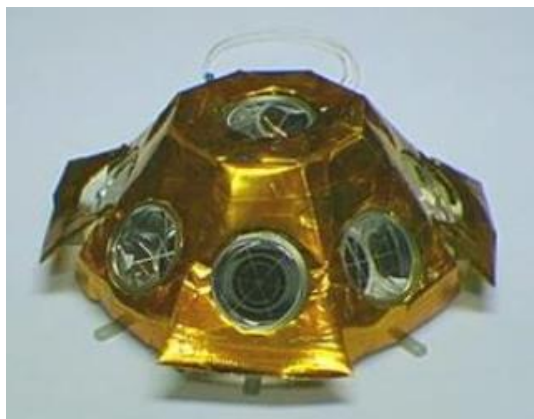


Figure 2 : Dispositif LRA, (CNES, 2020)

Le LRA a été optimisé pour réfléchir les lasers d'une longueur d'onde de 532 nanomètres. Le dispositif présent sur SWOT est identique à l'unité de Jason-3 permettant de déduire l'altitude du satellite à quelques millimètres.

Comme évoqué précédemment, les orbites des satellites sont connues à une dizaine de centimètres en temps réel (sous 3 heures) grâce aux mesures DORIS. Des orbites plus précises sont calculées avec des délais supplémentaires. En combinant les mesures des différents appareils, les orbites sont déterminées à 4 centimètres au bout de trois jours. Après 30 jours, elles sont connues à 2.5 cm avec l'objectif de descendre à 1 cm. Pour atteindre cet

objectif, il est nécessaire de connaître précisément le satellite et ses variations (manœuvres, consommation de carburant, position des panneaux solaires, etc.) et de déterminer précisément le champ de gravité proche de la trajectoire du satellite.

D'après Vaze and al. (2018), le satellite SWOT sera placé sur une orbite non héliosynchrone avec une répétitivité de 21 jours. Il possédera une altitude d'environ 891 km lui permettant de limiter les interactions avec l'atmosphère ainsi qu'une inclinaison de 77.6 degrés afin de minimiser l'aliasing des marées et d'assurer la couverture des principaux plans d'eaux sur le continent.

I.2.3 Instruments d'observation de la surface terrestre

Une fois les orbites déterminées précisément, il suffit de déterminer la distance entre le satellite et la surface observée pour déterminer la topographie de cette dernière. SWOT est équipé de l'altimètre nadir Poseidon-3C aussi appelé radar altimétrique. Cet appareil est dérivé de l'altimètre Poseidon-3B présent sur Jason 3. L'altimètre nadir Poseidon-3C émet en bi-fréquence, bande Ku (13.375 GHz) et bande C (5.3 GHz). De plus, il possède un mode « open loop » permettant une meilleure accroche sur l'eau. Un signal à très haute fréquence (2060 impulsions par seconde) est émis à la verticale en direction du sol et l'altimètre reçoit en retour l'écho réfléchi par la surface visée. L'analyse de la mesure permet de déterminer précisément le temps aller-retour de l'onde. En multipliant le temps par la vitesse de l'onde, la distance séparant le satellite de la surface peut être connue. Toutefois, les ondes émises subissent des perturbations liées principalement à l'atmosphère. Suivant le taux d'humidité, le taux d'ionisation et d'autres phénomènes, les ondes électromagnétiques sont plus ou moins ralenties. L'erreur provoquée par la modification des ondes devra être corrigée afin de pouvoir exploiter les mesures. En plus de la distance, l'altimètre nadir doit connaître son orientation afin de topographier la surface visée. Pour cela, il dispose d'une unité de référence inertielle composée principalement d'un gyroscope. Dans le but d'améliorer les résultats, les observations sont moyennées sur une seconde. L'altimètre Poséidon 3C permettra donc de connaître la topographie des océans se trouvant au nadir de la trajectoire du satellite.

Selon la page SWOT du site du CNES (CNES, 2020), la grande nouveauté du satellite SWOT est son interféromètre radar bande Ka nommé KaRIn. Le radar interférométrique utilise le retard relatif entre les observations d'un même point au sol observé depuis deux positions différentes. Une première antenne émetra un signal qui sera réfléchi par la surface

ciblée. Ce signal sera reçu par l'antenne émettrice et par une seconde antenne disposée à une distance connue de la première. De manière schématique, pour chaque point observé, un triangle est formé. L'un des côtés du triangle correspond à la longueur qui sépare les deux antennes. Les deux autres côtés sont les distances respectives entre le point au sol et les antennes A1 et A2 comme illustrés sur la figure 3.

Afin de calculer la hauteur ellipsoïdale des océans noté h sur le schéma, le traitement des mesures de l'interféromètre détermine dans un premier temps la distance r_1 . L'antenne A1 étant une antenne émettrice et réceptrice, cette distance correspond au temps aller-retour de l'onde multiplié par sa vitesse de propagation. Comme pour l'altimètre radar, cette vitesse dépend de la composition de l'air traversé.

Par la suite, le déphasage entre les ondes réfléchies provenant de la même onde émise est calculé grâce à

$$\Delta\varphi = \frac{-2\pi}{\lambda (r_2 - r_1)}.$$

Cela permet de calculer l'angle de visée (θ) selon l'équation : $\Delta\varphi = kB \sin(\theta)$, où k est le nombre d'onde électromagnétique relatif à la longueur d'onde et B la distance séparant les deux antennes.

Une fois l'angle de visée connu, la hauteur h (correspondant à la SSH) est déterminée par l'équation $h = H - r_1 \cos(\theta)$ avec H la hauteur ellipsoïdale du satellite.

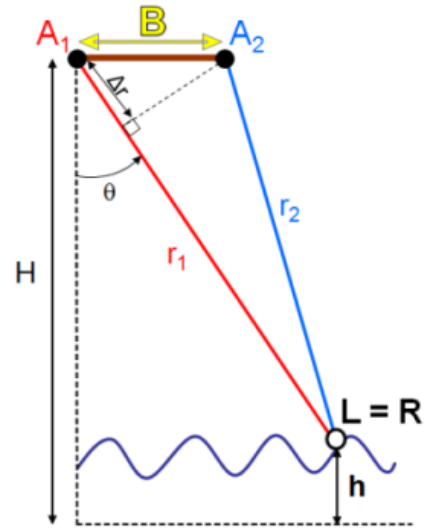


Figure 3 : Schématisation d'une mesure de l'interféromètre radar, (CNES, 2020)

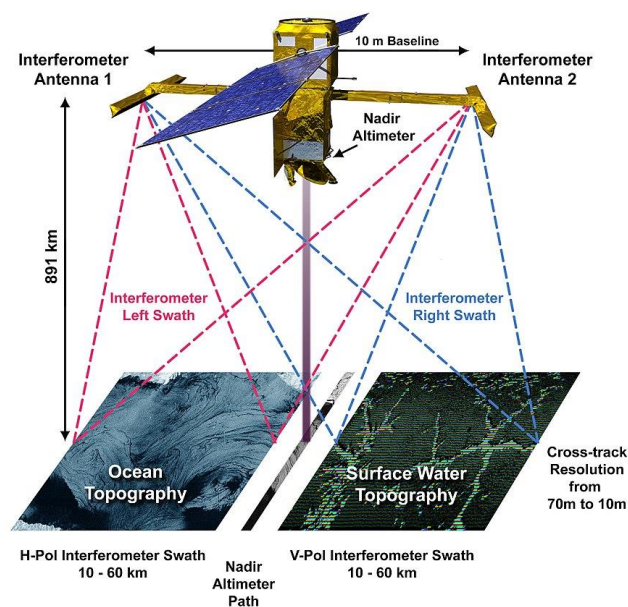


Figure 4 : Système KaRIn embarqué par le satellite SWOT, (JPL.NASA, 2020)

Le radar altimétrique KaRIn a été conçu à partir des études sur un altimètre à large fauchée pour l'océan (Wide Swath Ocean Altimeter) envisagé sur Jason 2 selon la page SWOT du site du CNES (CNES, 2020). Il est composé de deux antennes radar à synthèse d'ouverture (SAR) de 5 mètres de long et 0.25 mètre de large disposées de part et d'autre d'un mat d'une longueur de 10 mètres. Les deux antennes peuvent émettre et recevoir, mais dans les faits, seule une émettra et les deux recevront. Le système KaRIn est illustré en figure 4. Il permettra d'observer les surfaces hautement réfléchissantes de l'eau avec un angle de 1 à 4 degrés de chaque côté du nadir. Puisque le satellite est à une hauteur d'environ 891 km, l'interféromètre radar mesurera une bande s'étalant de 10 km jusqu'à 60 km en transversal de part et d'autre de la trace du nadir. Ce système illumine alternativement les deux fauchées d'une largeur d'environ 50 km des deux côtés de la trace du satellite au sol. Les impulsions renvoyées par la surface ciblée auront une résolution d'environ 5 mètres en azimut et de 10 à 60 mètres en distance comme illustrées sur la figure 5. Pour les mêmes raisons que l'altimètre nadir, Karin dispose lui aussi d'une unité de référence inertielle. Les mesures de l'instrument KaRin permettront de déterminer la hauteur avec une précision de 50 cm en instantané.

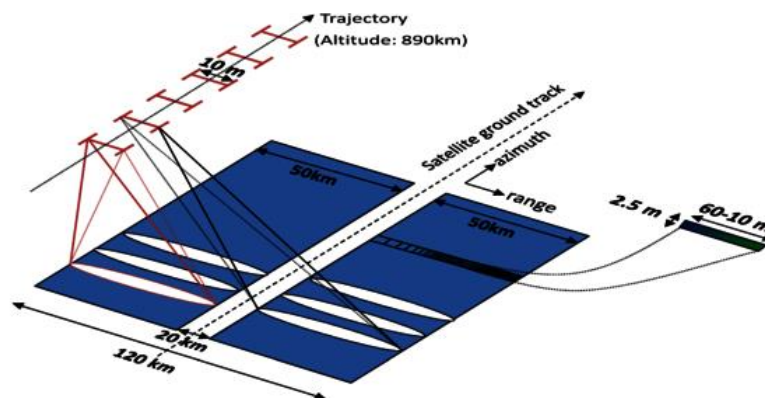


Figure 5 : Schéma des fauchées d'observation de l'interféromètre radar KaRIn, (CNES, 2020)

Les ondes émises par le radar altimétrique Nadir ainsi que par l'interféromètre radar sont perturbées par le contenu en eau de l'atmosphère. Pour limiter les erreurs liées à ce phénomène et améliorer la précision des résultats, SWOT est équipé d'un Advanced Microwave Radiometer (AMR). Cet instrument est une version adaptée à la mission SWOT de l'AMR présent sur le satellite Jason 3. L'AMR est un récepteur passif utilisant les rayonnements de l'océan pour effectuer des mesures. Les rayonnements perçus dépendent de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, mais aussi de la température de l'océan, du vent en surface, de la salinité de l'eau, de la présence d'écume, etc. Afin de connaître avec précision la composition en eau de l'atmosphère, il est nécessaire de déterminer les autres

facteurs modifiant le rayonnement. Pour ce faire, l'AMR capte des rayonnements à trois fréquences différentes : 18.7 GHz, 23.8 GHz et 34 GHz. Chacune de ces fréquences est plus ou moins sensible aux différents facteurs. 23.8 GHz est la fréquence principale servant à déterminer la quantité de vapeur d'eau. La fréquence 34 GHz est plus sensible aux nuages non précipitants tandis que la fréquence 18.7 GHz réagit avec les variations de la surface de l'eau liées au vent. En combinant les mesures faites à chacune de ces fréquences, la composition en vapeur d'eau peut être déterminée. La mission principale de l'AMR est donc d'améliorer les résultats des observations de la surface de la Terre, mais ces mesures peuvent aussi servir à étudier l'atmosphère.

I.3 Calibration des mesures du satellite SWOT

La mission satellitaire SWOT représente de très gros enjeux ainsi qu'un coût économique important : environ un milliard de dollars répartis entre la NASA (600 millions) et le CNES (400 millions). Par conséquent, les agences spatiales à l'origine de cette mission doivent s'assurer de son utilité et de son bon fonctionnement. Pour cela, la Science Definition Team a été créée il y a une dizaine d'années durant la phase de pré-lancement du satellite SWOT. Elle se compose de plusieurs groupes de recherche dont le laboratoire M2C. Cette équipe de chercheur a pour but de définir les objectifs de la mission et les enjeux scientifiques ainsi que la contribution de SWOT dans un grand nombre de domaines.

En parallèle de ces travaux concernant les apports scientifiques de la mission SWOT, des préparations à la phase de calibration et validation sont mises en place. En effet, d'après la page SWOT 1-Day Repeat Orbit du site du JPL (JPL, 2020), le satellite SWOT réalisera une phase de calibration et de validation, intitulée Fast Sampling Orbit, 90 jours après son lancement. Ce lancement est prévu pour février 2022 et les 90 premiers jours serviront à la mise en service du satellite ainsi qu'au contrôle de son bon fonctionnement. Durant la période de calibration et de validation, le satellite réalisera des acquisitions sur une bande de largeur réduite afin d'obtenir une redondance de mesures. Afin de préparer cette étape, des collaborations avec des chercheurs sont mises en place, comme par exemple les projets Tosca réalisés par le laboratoire M2C. Cette phase de calibration/validation comprendra des inter-comparaisons entre les mesures SWOT et d'autres satellites altimétriques tels que Sentinel 3A. De plus, plusieurs campagnes sont lancées afin d'acquérir des données de comparaison. L'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MOI) ainsi que le laboratoire LOCEAN à Paris ont réalisé des campagnes bateaux utilisant des bouées GPS, des gliders

ou encore des drifters afin de mesurer les courants dans le but de les comparer aux données SWOT.

Concernant le LiDAR, cette technique, encore peu utilisée pour topographier les océans, n'a jamais servi à la calibration et la validation des satellites altimétriques. Les travaux les plus avancés à ce jour sur ces sujets ont été menés au Scripps Institution of Oceanography à San Diego par Luc Lenain et Ken Melville. Le document Melville and al (2016) décrit le système LiDAR ainsi que les caractéristiques de chacun de ses composants. De plus, les documents Lenain and al (2017) et Lenain and al (2019) montrent l'utilisation des données LiDAR afin de déterminer la hauteur significative des vagues, le spectre des vagues, les courants, les pentes océaniques ou encore la SSH.

Le laboratoire M2C a pour objectifs, à travers les projets Tosca, de reproduire les mesures réalisées par le Scripps et de définir leur efficacité pour la calibration et la validation des mesures SWOT. S'il s'avère que ces données sont utilisables pour la calibration et la validation, le laboratoire M2C devra les définir et mettre en place leur méthode d'acquisition. Les principaux acteurs en France sur ces projets sont Nicolas Picot au CNES, Pascal Bonnefond à l'observatoire de Paris, Benoit Laignel et Laurent Froideval au laboratoire M2C respectivement pour la partie littorale et pour la partie planification et acquisition des données LiDAR. Les détails de cette phase de calibration et de validation ne sont pas encore connus et restent à définir par les institutions spatiales en collaboration avec leurs partenaires. Malheureusement, à cause de la situation sanitaire liée au COVID-19, aucune réunion n'a pu se tenir afin de traiter de ce sujet.

Dans le cadre de cette étude, les données SSH ainsi que leur acquisition par LiDAR aéroporté seront étudiées afin de calibrer et valider les mesures SWOT. La détermination de la SSH sur la quasi-totalité des océans fait partie de l'un des objectifs de la mission SWOT. La SSH correspond à la différence de hauteur entre l'ellipsoïde de référence et la surface de l'eau à un instant t et est calculée grâce à la formule suivante :

$$SSH = \text{hauteur ellipsoïdale satellite} - \text{distance (satellite} \rightarrow \text{surface)}$$

Cette hauteur devrait correspondre à la distance entre l'ellipsoïde de référence et le géoïde, car ce dernier est défini comme la surface équipotentielle de pesanteur au niveau moyen des océans. Pour autant, les mesures démontrent que la SSH ne correspond pas à l'ondulation du géoïde. Cette inégalité de hauteur est due à plusieurs paramètres physiques détaillés par

la suite. Le service de Surveillance de l'Environnement Marin Européen (CMEMS) traite les observations satellitaires et étudie la SSH à travers le programme Copernicus.

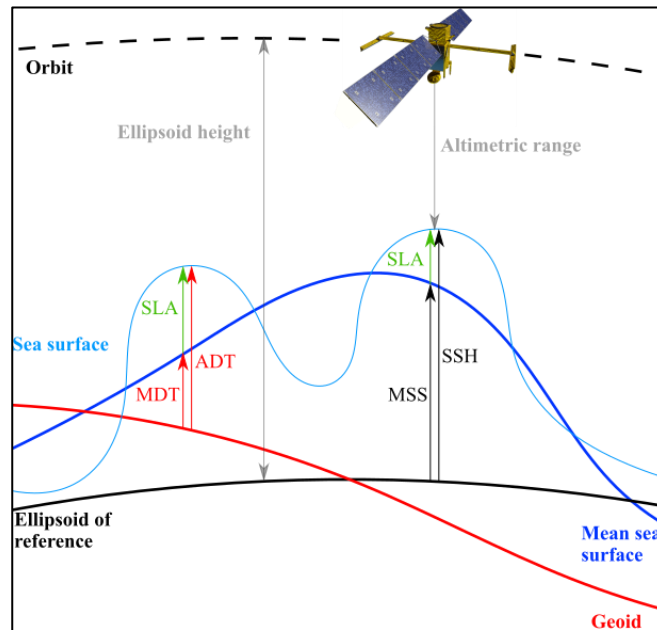


Figure 6: Composantes de la Sea Surface Height

La figure 6 montre les différentes composantes de la hauteur de la surface des océans calculées à partir des mesures satellitaires. Les variations de hauteur provoquées par les vagues à la surface de l'eau, les marées ainsi que d'autres phénomènes temporels faussent la SSH. Afin d'éliminer ces phénomènes, d'après Copernicus (2017), la Mean Sea Surface (MSS) est calculée. Elle correspond à la moyenne de la SSH sur une période donnée. Des modèles peuvent aussi être utilisés afin d'éliminer les variations de hauteur. La différence entre la MSS et la SSH est appelée Sea Level Anomaly (SLA) ou Sea Surface Height Anomaly (SSHA). L'Absolute Dynamic Topography (ADT) correspond à la distance entre le géoïde et la surface de l'océan à un instant t . Une moyenne de l'ADT est aussi calculée dans le même but que la MSS et se nomme Mean Dynamic Topography (MDT). La différence entre l'ADT et la MDT permet également d'obtenir la SLA. De plus, suivant les missions satellitaires, les calculs de ces produits peuvent varier.

Les paramètres physiques influençant la SSH sont d'intensité différente. En effet, l'altération la plus importante est due au champ gravitationnel. Selon la page EARTH du site de la NASA (NASA, 2020), son inégalité à la surface de la Terre peut créer des variations de SSH allant jusqu'à 150 mètres. Les marées, les courants océaniques et le vent sont aussi des phénomènes importants. Leur variation peut engendrer une élévation ou un abaissement de la surface d'environ 1 mètre. La température ainsi que les tourbillons océaniques provoquent des modifications de dizaines de centimètres. Dans une moindre mesure, la

salinité et la pression atmosphérique influencent la SSH. Pour finir, l'effet de Coriolis induit par la rotation de la Terre modifie le vent et les courants océaniques et donc la SSH.

Selon la NASA (2018), l'erreur de la détermination de la SSH est définie sous la forme d'une pente entre deux mesures de SSH. La valeur de l'erreur prévue est de 4 cm/cycle/km avec pour objectif d'atteindre 1 cm/cycle/km. Des échanges avec Monsieur Bonnefond ont permis de définir la précision de la SSH moyennée sur 2 km² à 2 cm.

II Détermination de la surface des océans par LiDAR aéroporté

II.1 Présentation des moyens et des ressources utilisés dans ces travaux

II.1.1 Le système LiDAR

La difficulté de la calibration des radars altimétriques réside dans l'acquisition de la SSH au même endroit et au même moment. Pour ce faire, le laboratoire M2C utilise un LiDAR aéroporté. Selon Pellerin Le BAS (2018), la technologie LiDAR a été développée dans les années 60, notamment dans le projet « Project Luna See » visant à déterminer la distance Terre-Lune. Le LiDAR est une technologie de télédétection active reprenant le principe de l'écho radar. Il émet une impulsion d'onde électromagnétique et mesure le temps aller-retour de l'onde entre la source et la cible. Sachant que l'onde possède une vitesse constante dans un milieu de propagation donné, la distance source-cible peut être calculée avec la formule suivante :

$$R = c \times \frac{t}{2}$$

Dans cette équation, R représente la distance source-cible, c la vitesse de la lumière et t le temps que l'onde a mis pour parcourir l'aller-retour source-cible.

Il est évident qu'en pratique, le milieu traversé par l'onde modifie sa vitesse. Les propriétés des milieux traversés par l'onde apportent donc des imprécisions dans le calcul. Une fois la distance connue, il restera à déterminer la position de la source pour connaître celle de la cible. À partir des années 1980, grâce à la création d'un système de balayage, cette technologie devient aéroportée.

Dans le cadre des travaux réalisés par le laboratoire M2C visant à déterminer la SSH, un système LiDAR est installé à bord d'un aéronef de la société PixAir Survey. Le LiDAR balaye une surface sous la trajectoire de l'avion qui correspond à une bande plus ou moins large selon l'altitude et l'ouverture de l'appareil comme indiqué sur la figure 7. Dans la

plupart des cas, la largeur de la bande vaut entre 400 et 1000 m. À partir des différentes mesures réalisées, des nuages de points de la surface des océans sont créés.

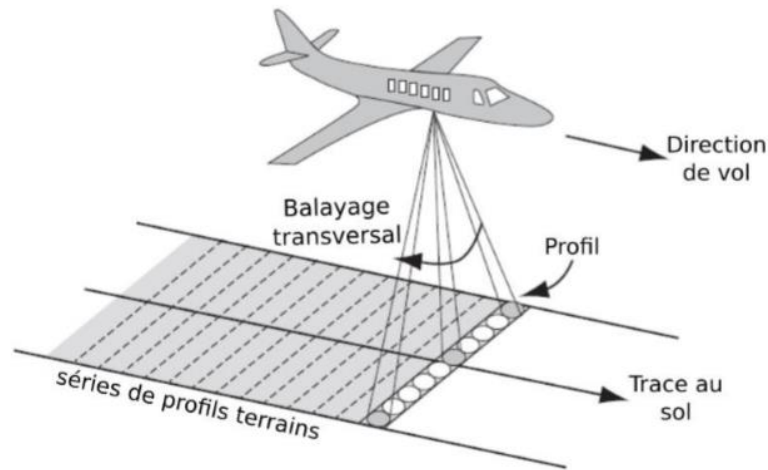


Figure 7 : Schéma du fonctionnement du système LiDAR aéroporté, d'après Temon (2019)

Dans cette étude, le système LiDAR Leica ALS60 est utilisé. Il se compose de deux segments, un premier permettant de définir la distance entre l'avion et la surface des océans et un second servant à déterminer la position de l'avion. Le système LiDAR possède deux contrôleurs, un pour le laser et un pour le système, visibles sur la figure 8.



Figure 8 : LiDAR Leica ALS60, d'après Leica Geosystems (2008)

Le contrôleur laser a pour objectif d'émettre le faisceau laser en direction du sol avec des caractéristiques précises. Il est positionné sous le plancher de l'avion en face d'une ouverture dans la carlingue. Il envoie des impulsions laser d'une longueur d'onde de 1064 nm permettant une bonne réflexion par l'eau à une fréquence allant jusqu'à 200 000 Hz. Les impulsions ont une fréquence maximum de 144 Hz et un angle de divergence de 0.22 mrad. De plus, un miroir rotatif d'une fréquence pouvant aller jusqu'à 100 Hz est présent dans le contrôleur laser. Ce dispositif sert à orienter le faisceau avec un angle de 0 à 37.5° de part et d'autre du nadir perpendiculairement à la direction de l'avion. La totalité de l'ouverture

forme un angle appelé Field of View (FOV) ou champ de vision. L'ouverture maximum du FOV est donc de 75°. Cependant, il n'est pas possible d'utiliser le FOV maximum avec la plus grande fréquence d'impulsion. En effet, la fréquence d'impulsion laser est limitée par le champ d'ouverture du capteur, comme le montre la figure 9. Selon la description de l'appareil, le LiDAR doit se situer entre 200 et 6200 m d'altitude pour un bon fonctionnement. Il est alors possible d'obtenir une fauchée maximum d'environ 7500 m.

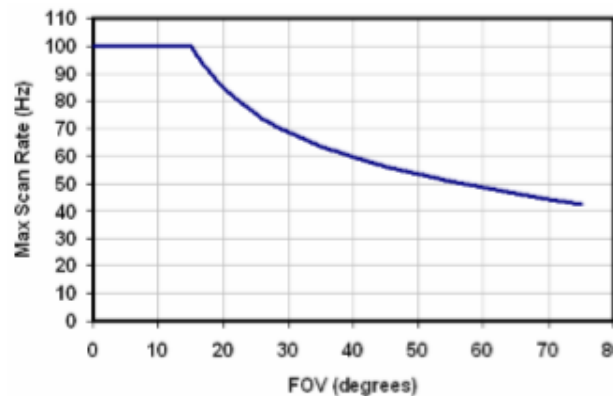


Figure 9 : Fréquence de balayage en fonction du champ de vision, d'après Leica Geosystems (2008)

Le contrôleur système a deux rôles. Le premier est de contrôler les impulsions émises par le contrôleur laser et de récupérer les données acquises par le récepteur. Le second est d'enregistrer les données fournies par une centrale inertielle et une antenne GNSS afin de positionner l'avion. La centrale est composée de gyromètres et d'accéléromètres qui servent à déterminer la vitesse de l'avion ainsi que son comportement (mesures de tangage, roulis, lacet) avec une fréquence maximum de 500 Hz. En ce qui concerne la détermination de la position, une antenne Aeroantenna Technology AT1675 est installée à l'avant de l'avion. Cette antenne permet au système LiDAR d'enregistrer les signaux émis par les constellations GPS et GLONASS avec une fréquence de 2 Hz.

L'entreprise Leica Geosystems fournit des précisions pouvant être atteintes grâce à ce système. Cependant, ces dernières sont valables dans des conditions très précises et ne sont pas toujours applicables à notre utilisation. Dans le graphique figure 10, les valeurs sont fournies pour un FOV de 40° et pour un sigma avec un positionnement DGPS d'une précision inférieure à 5 cm. Sachant que les vols réalisés par le laboratoire M2C ont une hauteur comprise entre 800 et 1500 m, les précisions des nuages de points sont estimées entre 10 et 20 cm. de points sont estimées entre 10 et 20 cm. entre 10 et 20 cm.

Ces résultats sont à nuancer car ils dépendent fortement de la couche traversée par le laser, qui peut varier d'un vol à un autre, et de la précision de la trajectoire calculée. Il est important de souligner que le laser possède un angle de divergence de 0.22 mrad. Cela

signifie que pour des hauteurs variant de 800 à 1500 mètres, l’empreinte au sol mesure entre 18 et 33 cm de diamètre. Sur cette empreinte, il est possible que l’altitude du point varie de plusieurs dizaines de centimètres. La précision des points obtenus par LiDAR aéroporté dépend de nombreux paramètres qui diffèrent selon les vols. Il est donc difficile de déterminer une précision s’appliquant à l’ensemble des acquisitions LiDAR.

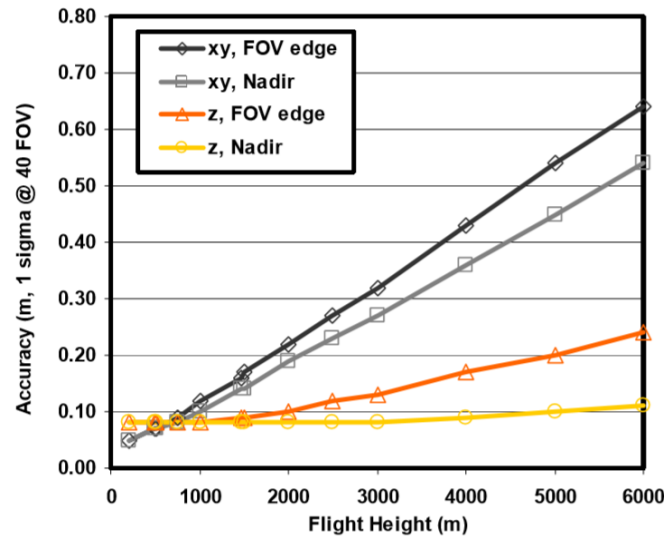


Figure 10 : Précision des points obtenus à partir des mesures du LiDAR Leica ALS60 en fonction de la hauteur de vol, d’après Leica Geosystems (2008)

En pratique, le laboratoire mesure pour chaque vol des points au sol connus précisément en coordonnées (< 1 cm). À partir de ces points, un écart quadratique moyen peut être calculé. En moyenne, l’erreur altimétrique vaut 6 à 7 cm et la planimétrique environne les 10 cm. Pour l’ensemble des vols, des zones échantillons servent à contrôler la précision du nuage de points. Ensuite, la précision de la totalité des points est supposée égale à la précision des zones de contrôle. Cependant, la méthode utilisée ne peut pas fonctionner pour la totalité des vols réalisés comme indiqué dans la suite de ce mémoire.

II.1.2 Les logiciels utilisés

Pour déterminer la SSH, les mesures GNSS acquises grâce au LiDAR sont tout d’abord traitées avec le logiciel Grafnav GNSS Post-Processing Software développé par Novatel. Les traitements sont réalisés par méthode DGPS en Post Processing Kinematic (PPK) avec une fréquence de 2 Hz. Par la suite, les mesures de la centrale inertielle sont intégrées avec une fréquence de 500 Hz grâce au logiciel IPAS Pro. Pour finir, les acquisitions du contrôleur laser sont intégrées pour créer les nuages de points en utilisant le logiciel ASL PP. Ces deux logiciels sont propriétaires de Leica Geosystems.

L'ensemble des trajectoires est calculé à partir d'un positionnement DGPS. Pour cela, des bases installées au sol et/ou des stations du RGP sont utilisées. Cette méthode pose un problème lorsque les lignes de base sont trop longues, ce qui est souvent le cas pour les mesures de SSH. En effet, les mesures sont réalisées au large donc à plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres des terres. Par conséquent, la détermination d'une méthode de calibration à partir des mesures LiDAR passe par la mise en place d'une autre méthode de positionnement GNSS. L'un des buts de ces travaux est donc de déterminer la position de l'avion en utilisant la méthode PPP avec une précision suffisante pour la calibration du radar altimétrique. Cette méthode est expliquée dans la partie II.2.3.2. Afin d'espérer arriver à ce résultat, il est nécessaire d'utiliser un logiciel permettant des libertés dans les calculs et une transparence sur les précisions qu'il fournit. En effet, il est intéressant de pouvoir gérer les différents paramètres de traitement et d'analyser la qualité des résultats. La plupart des logiciels commerciaux proposent des résultats qui semblent satisfaisants, mais ne permettent que très peu de libertés. Au contraire, les logiciels de recherche sont souvent moins contraints et possèdent des outils d'analyse des résultats qui leur sont propres.

D'après les critères précédents, les logiciels les plus adaptés pour le positionnement PPP sont Gipsy X développé par la NASA, Bernese GNSS Software mis place par Astronomical Institute of the University of Bern (AIUB) et GINS créé par le Groupe de Recherche et de Géodésie Spatiale (GRGS). Dans le cadre de ce projet, le logiciel GINS a été retenu pour le traitement PPP puisqu'il possède l'ensemble des critères recherchés. Ce dernier fonctionne uniquement sous système d'exploitation Linux et permet de traiter un grand nombre de mesures différentes (Laser, Doppler, VLBI, Optique, GPS PPP, GPS en double-différence, éphémérides...). Il permet d'utiliser une nouvelle méthode de traitement PPP nommée Integer Precise Point Positioning (IPPP) ou Precise Point Positioning Ambiguity Resolution (PPPAR) amenant à des résultats plus précis. Cette méthode est expliquée dans la partie II 2.1.7. De plus, l'acquisition de ce logiciel par le laboratoire M2C a été facilitée. En effet, ce laboratoire est impliqué dans plusieurs projets CNES qui fait lui-même partie du GRGS.

Les trajectoires sont aussi calculées avec le logiciel open source RTKLIB. Celui-ci ne permet pas de réaliser des calculs IPPP mais uniquement un positionnement PPP. Ce deuxième calcul a pour but de comparer les deux méthodes de traitement PPP et d'analyser les résultats. Pour finir, le logiciel open source CloudCompare a été utilisé afin de manipuler les nuages de points et d'évaluer la qualité de ces derniers.

II.1.3 Les données sélectionnées

Le laboratoire M2C Caen réalise des levés LiDAR dans le but d'acquérir des données topographiques pour différents projets. L'ensemble des levés est préalablement défini par Monsieur Froideval et Monsieur Conessa. Les vols doivent respecter des contraintes communes et d'autres propres à chacun.

La première contrainte commune à tous les vols concerne la hauteur par rapport à la surface de l'océan. Celle-ci ne doit pas dépasser 1500 mètres afin de conserver une bonne qualité de mesures : limiter le bruit dû à la propagation du signal, éviter une taille d'empreinte trop importante. Cependant, plus la hauteur de vol est importante, plus la largeur de la fauchée est grande. Par conséquent, une hauteur de vol élevée diminuera les coûts car le vol durera moins longtemps afin de recouvrir une zone. La hauteur influence également la taille de l'empreinte du laser au sol donc la taille des détails levés. Pour les vols servant à déterminer la SSH, l'objectif est d'obtenir la meilleure précision possible pour la hauteur ellipsoïdale des points de la surface de l'océan. La hauteur de l'aéronef est alors comprise entre 400 et 600 m.

A cela s'ajoute la vitesse de l'avion définie en fonction de la densité de points au sol recherchée. Pour finir, la météo doit être intégrée dans la programmation du vol. En effet, il est impératif que l'avion se trouve en dessous du plafond nuageux. Le temps idéal étant un ciel dégagé et un faible taux d'humidité. Or, il est difficile de prévoir la météo longtemps à l'avance. Ainsi, pour chaque levé, au moins trois plans de vol sont réalisés à des hauteurs différentes afin de s'adapter à la météo. Ces trois contraintes devront être adaptées aux objectifs de chaque projet.

Pour certains projets, de nouvelles contraintes spécifiques apparaissent. Par exemple, la période d'acquisition peut être imposée dans le projet et impossible à adapter. En effet, si l'objectif est de comparer les mesures LiDAR à celles réalisées par un satellite, il faut qu'elles soient faites au même endroit et au même moment. De plus, dans le cas d'étude de phénomènes spatio-temporels tels que les marées, de nouvelles contraintes peuvent apparaître.

La planification des vols LiDAR est réalisée à partir du logiciel Leica MissionPro Flight Planning Software. Ce logiciel permet de déterminer la puissance et la vitesse du laser ainsi qu'une trajectoire adaptée au projet à réaliser. Une fois déterminée, la trajectoire est envoyée au pilote de l'entreprise Pixair Survey basée à Rouen. Ce dernier devra suivre précisément la hauteur de vol, la vitesse et la trajectoire définies et demander les

autorisations nécessaires pour voler. De plus, l'angle de roulis doit être compris entre -30° et 30° afin d'éviter l'effet de masque créé par les ailes de l'avion et la perte de satellite.

Dans cadre de cette étude, deux levés ont été sélectionnés. Le premier se nomme 190830 puisqu'il a été réalisé le 30 août 2019 et a pour objectif la surveillance géomorphologique en estuaire. Le vol débute à l'aéroport de Rouen, comme la totalité des vols. Pour autant, l'acquisition LiDAR n'a eu lieu qu'entre Cabourg et Hermanville-sur-Mer, visibles sur la photo aérienne en figure 11. L'acquisition a été réalisée à une hauteur d'environ 1500 mètres sur une durée de 34 minutes. Pendant le vol, deux bases ont été installées, une première sur le toit du laboratoire M2C et une seconde à Merville-Franceville. Ce vol a été sélectionné pour ce projet puisque la base M2C se trouve au maximum à 25 km de l'avion et la base Merville-Franceville se trouve à moins de 14 km durant la phase d'acquisition.



Figure 11 : Représentation de la trajectoire de l'avion lors du vol 190830

Nous pouvons donc supposer que la trajectoire calculée en DGPS est de bonne qualité. Par la suite, la trajectoire DGPS servira d'élément de comparaison pour évaluer la qualité de la trajectoire IPPP et PPP.

Le second vol se nomme 191120. Il a été réalisé afin de voler sur la trace du satellite Sentinel 3A de façon synchrone. Ces données ont pour objectif de développer des méthodes de calibration et de validation de données satellitaires. Sa trajectoire représente un aller-retour entre la France et l'Angleterre. La trajectoire réalisée par l'aéronef est représentée sur

la figure 12. L'acquisition a été réalisée entre 500 et 600 mètres d'altitude pendant 2 heures et 25 minutes.

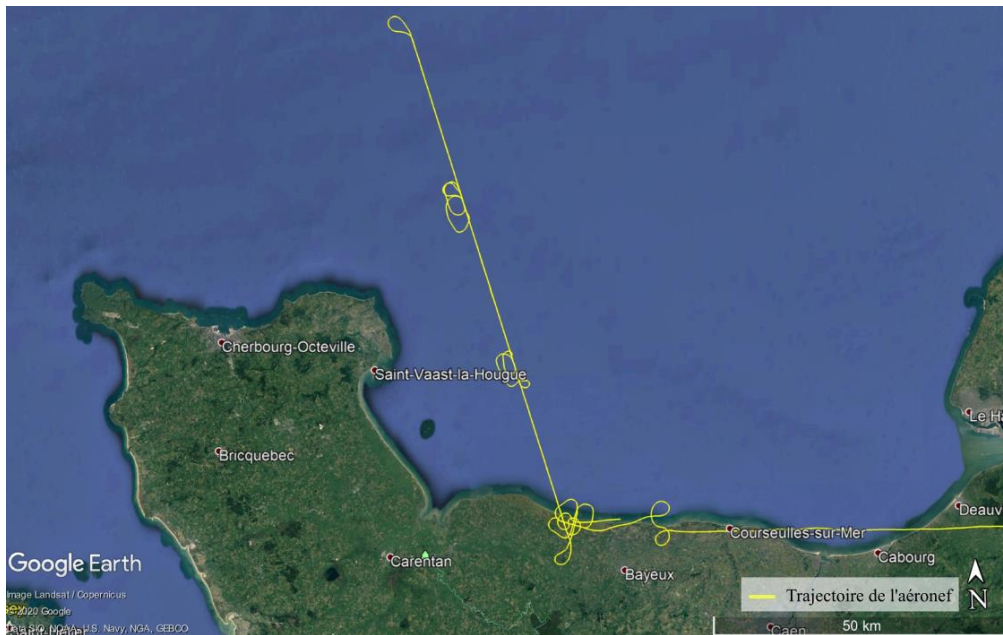


Figure 12 : Représentation de la trajectoire de l'aéronef lors du vol 191120 durant l'acquisition du LiDAR

II.2 Détermination de la trajectoire de l'aéronef

Les trajectoires de l'avion sont initialement traitées par méthode DGPS par le laboratoire M2C. À partir des acquisitions GNSS réalisées lors des vols présentés précédemment, les trajectoires de l'aéronef sont déterminées avec une nouvelle méthode afin de résoudre les problèmes liés au traitement DGPS.

II.2.1 Le positionnement GNSS

Afin de comprendre les problèmes liés au positionnement DGPS et les intérêts de la méthode PPP, il est important de reprendre le principe du positionnement GNSS. Celui-ci repose sur un principe géométrique appelé trilatération. Ce principe permet de déterminer la position en trois dimensions d'un objet à l'aide des distances entre ce dernier et trois autres objets connus en coordonnées.

Pour le positionnement GNSS, les satellites représentent les objets connus et l'antenne réceptrice l'objet à déterminer. Le récepteur capte les signaux radio émis par les satellites et réalise des mesures sur code (positionnement relatif) et/ou de phase (positionnement absolu). Ces mesures permettent de déterminer les distances séparant le récepteur des satellites.

Le traitement du laboratoire M2C réalisé à partir des acquisitions du LiDAR utilise le positionnement absolu. Ce positionnement est possible grâce aux différentes porteuses émises par les satellites. Le récepteur mesure seulement, de manière précise, la partie fractionnée du signal qu'il reçoit. Afin de mesurer cette partie, il émet une onde aux caractéristiques identiques à celle émise par le satellite et mesure le déphasage entre ces deux ondes. Le nombre entier de cycles, appelé ambiguïté entière, reste inconnu. Afin de déterminer l'ambiguïté, une étape appelée fixation des ambiguïtés est requise. Le positionnement absolu est utilisé par le LiDAR car les récepteurs actuels mesurent la partie décimale du signal avec une précision de l'ordre de 3 millièmes de cycle. Cette précision représente environ 1 mm. Cela rend cette méthode plus précise que la mesure sur code puisque cette dernière est de l'ordre du mètre. Cependant, la précision de la mesure n'est pas égale à la précision du positionnement. Afin de la connaître, il faut déterminer les erreurs engendrées par les mesures.

II.2.2 Les erreurs dues aux mesures GNSS

Le principe de positionnement GNSS induit des erreurs qui affectent la position calculée et influencent donc la précision du positionnement. Elles se produisent durant la transmission du signal et peuvent être séparées en trois catégories.

Les premières erreurs surviennent lors de l'émission du signal. Cette catégorie regroupe les erreurs liées à la précision des éphémérides. En effet, une détermination précise des coordonnées des satellites ainsi que des dates d'émission des signaux est essentielle au positionnement GNSS. De plus, les effets liés à la relativité restreinte et générale modifient les signaux émis et engendrent des erreurs. Ces modifications étant prises en compte lors de l'émission des signaux ou lors de la diffusion des orbites, aucune correction n'est à apporter. L'émetteur et l'antenne émettrice provoquent également des erreurs. En effet, le signal est émis au niveau du centre de phase tandis que les coordonnées utilisées pour calculer la position du récepteur correspondent au centre des masses du satellite. L'écart entre les centres crée une erreur dans la position du récepteur. Enfin, l'émetteur, du fait de sa conception, possède un biais hardware qui engendre une erreur sur la position du récepteur.

La deuxième catégorie d'erreur est liée à la propagation du signal dans l'atmosphère. En effet, les gaz ionisés présents dans la ionosphère altèrent les signaux émis par les satellites. La vitesse de ces signaux augmente ou diminue suivant leur longueur d'onde, ce qui entraîne un allongement ou un rétrécissement du temps de parcours de l'onde entre le

satellite et le récepteur. Ce phénomène est appelé retard ionosphérique. La pression partielle air sec, la pression partielle vapeur d'eau ainsi que la température de la troposphère modifie également les signaux. Cette modification entraîne un retard troposphérique similaire à celui de la ionosphère. Pour finir, le dernier phénomène altérant le signal lors de sa propagation est appelé phase wind up. Il correspond à une modification de la phase de l'onde due au mouvement de l'émetteur et/ou du récepteur.

La troisième catégorie d'erreurs est créée lors de la réception du signal. Tout d'abord, le phénomène de trajet multiple engendre des erreurs. Il est dû à la déviation des signaux par des éléments qui entourent le récepteur. En outre, une erreur provoquée par le centre de phase de l'antenne se produit lors de la réception du signal. Elle est due à l'écart entre la position où le signal est réellement perçu (varie pour chaque mesure) et un point fixe définie par le constructeur du récepteur comme position de réception du signal. L'horloge présente dans le récepteur provoque, elle aussi, une erreur dans le positionnement. Son imprécision se répercute directement sur la détermination de la date de réception du signal. Par conséquent, elle modifie la distance satellite-récepteur calculée. De plus, le temps perçu par l'horloge subit les effets relativistes énoncés plus tôt dus à la rotation de la Terre. Pour terminer, identiquement à l'émetteur du satellite, le récepteur crée un biais hardware dû à sa conception.

D'autres formes d'erreurs peuvent altérer le positionnement GNSS telles que les marées terrestres ou la surcharge océanique. Cependant, l'aéronef ne se trouvant pas à la surface de la Terre, ces erreurs n'affectent pas le positionnement PPP du LiDAR aéroporté. L'ensemble des erreurs GNSS énoncées sont détaillées dans l'annexe 1. La correction de ces erreurs par le logiciel GINS sont définies dans le document Traitement des données GPS avec GINS. L'ensemble des erreurs sur les mesures GNSS impacte le positionnement et détermine la précision des résultats obtenus. Pour autant, la méthode de traitement des mesures GNSS permettant de déterminer la distance satellite-récepteur joue un rôle important dans la qualité des résultats.

II.2.3 Les méthodes de traitement des mesures GNSS

II.2.3.1 Differential Global Positioning System

Pour calculer la position d'un récepteur à partir de mesures GNSS, plusieurs méthodes existent. Le DGPS est l'une des plus utilisées d'entre elles car elle permet d'éliminer ou de réduire un grand nombre d'erreurs liées aux mesures par le calcul. Afin de mettre en place cette méthode, deux stations observant simultanément les mêmes satellites sont nécessaires. Le positionnement différentiel est réalisé en temps réel ou en temps différé, par mesure de pseudo-distance (mesure de code) ou de déphasage (mesure de phase). La mesure de code permet un positionnement entre 5 et 10 m tandis que le positionnement par mesure de phase est centimétrique. Ainsi, afin de déterminer avec précision les trajectoires de l'avion, le laboratoire M2C utilise la méthode DGPS par mesure de déphasage.

Lorsqu'un deux récepteurs observe le même satellite même temps, il est alors possible de soustraire les observations de phases des récepteurs. Grâce à ce calcul appelé simple différence, l'erreur d'horloge du satellite est éliminée. De plus, les erreurs provoquées par les conditions atmosphériques (ionosphère et troposphère) sont réduites. En calcul différentiel, l'erreur atmosphérique est généralement considérée comme nulle lorsque les lignes de base sont inférieures à $20 \sim 30$ km. Pour finir, si les récepteurs sont assez proches, les marées terrestres, la surcharge océanique, les biais hardware des émetteurs satellites, les erreurs liées aux orbites des satellites, ainsi que les effets relativistes affectent de manière quasi similaire les mesures des deux récepteurs. Par conséquent, l'erreurs liées à ces phénomènes sur le positionnement est proche de 0.

Lorsque les deux récepteurs observent simultanément un second satellite, il est possible de réaliser un calcul de double différence. Ce calcul consiste à soustraire les simples différences entre elles. Cette double différence permet d'éliminer les erreurs d'horloge des récepteurs et de réduire le biais hardware du récepteur. De plus, si l'un des récepteurs est connu en coordonnées, la position du second peut être déterminée après inversion des équations d'observation grâce à la linéarisation de l'équation de double différence autour d'une position approchée du second récepteur.

Enfin, si deux récepteurs observent deux mêmes satellites sur deux époques successives, le calcul d'une triple différence peut être réalisé à partir des équations de double différence. Cela permet d'éliminer les ambiguïtés entières puisqu'elles sont constantes durant le passage d'un satellite (durée entre le lever et le coucher du satellite).

Cette méthode a été utilisée pour calculer la trajectoire de certains vols. Pour autant, elle ne peut pas servir à l'ensemble des vols puisqu'elle possède des limites. En effet, lors des calculs d'un positionnement DGPS, il faut que la distance entre la base et le mobile ne dépasse pas 20 à 30 km pour conserver une bonne précision. Cette limite est problématique pour la détermination de la SSH puisque, dans certains cas, l'avion s'éloigne fortement des côtes (plus de 80 km). Cette méthode ne pouvant pas être utilisée pour chaque vol, il est donc nécessaire de déterminer une nouvelle méthode de positionnement GNSS.

II.2.3.2 Integer Precise Point Positioning

La méthode Precise Point Positioning (PPP) semble être la plus adaptée pour la détermination de la trajectoire de l'avion. Cette dernière permet de calculer une distance satellite-récepteur à partir des mesures de pseudo-distance ou de phase afin de déterminer la position du récepteur. Par conséquent, les erreurs de positionnement PPP sont identiques à celles du DGPS. Par ailleurs, contrairement au DGPS, le PPP fonctionne avec un seul récepteur. Ainsi, les calculs de différences ne pouvant être effectués, aucune erreur liée à la mesure ne sera éliminée ou réduite par le calcul. Des corrections sont alors apportées aux mesures afin de rendre le positionnement plus précis. Chaque erreur liée à la mesure est corrigée grâce à l'approximation de sa valeur ou grâce à des modèles. Pour autant, ces corrections n'éliminent pas entièrement les erreurs, elles les réduisent. Par conséquent, plus les erreurs sont déterminées avec justesse, plus le positionnement est précis.

L'utilisation d'un seul récepteur offre plusieurs avantages. Tout d'abord, le temps de calcul diminue de manière significative par rapport à la méthode DGPS. Ainsi, les trajectoires de l'avion déterminées avec une fréquence de 1 Hz sur plusieurs heures sont calculées plus rapidement. De plus, le coût et le temps de préparation sont réduits avec la méthode PPP. En effet, le récepteur est installé définitivement sur l'avion et l'installation de bases au sol n'est plus nécessaire. Enfin, le principal avantage est l'absence de ligne de base et donc la possibilité de déterminer la position de l'avion à n'importe quel endroit lorsque suffisamment de satellites sont visibles.

Le positionnement par méthode PPP a déjà fait ses preuves et est utilisé dans différentes missions. En effet, Perosanz and al (2014) énoncent plusieurs campagnes comme par exemple la réalisation de profils hydrologiques dans le bassin amazonien ou encore la campagne océanographique DRAKE-2009. De plus, d'après les enseignements et des expériences réalisés à l'ESGT, la précision du PPP vaut 5 cm pour des mesures statiques de plus de 20-30 minutes.

Pour autant, le positionnement par méthode PPP est plus compliqué lorsque le récepteur est en mouvement. Ce constat est valable pour un positionnement cinématique en temps différé ou en temps réel. La difficulté provient principalement de la résolution de l'ambiguïté entière. En statique, la position du mobile sera connue précisément après 20 ou 30 minutes d'observation alors qu'en cinématique, la position doit être déterminée pour chaque déplacement, c'est-à-dire toutes les secondes dans le cas du LiDAR aéroporté.

Pour pallier cette difficulté, le CNES a développé une nouvelle méthode de positionnement PPP appelée IPPP ou PPPAR. D'après Morel and al. (2014), cette méthode permet de déterminer les ambiguïtés entières avec un temps de convergence très court. Ceci est possible grâce à la connaissance précise des erreurs affectant les mesures. Cette méthode repose principalement sur la connaissance des biais des satellites électroniques et l'utilisation d'horloges satellites cohérentes avec la nature entière des ambiguïtés, selon Perosanz and al. (2014). Ces produits sont calculés par le GRGS et disponibles périodiquement sur le site : www.igsac-cnes.cls.fr. Cette méthode permet donc de fixer les ambiguïtés en cinématique alors qu'en PPP cinématique, les solutions sont flottantes. Perosanz and al. (2014) affirment que la méthode IPPP en mode statique possède un temps de convergence plus court ainsi qu'une meilleure précision que la méthode PPP. Cette affirmation est aussi démontrée à travers des tests réalisés sur 20 stations de l'IGS selon Département des Sciences and al. (2015). Les résultats obtenus sont disponibles dans PPP-GNSS : Principe et Nouveautés. Pour finir, cette méthode a déjà été utilisée afin d'observer la déformation du glacier Mertz en antarctique d'après Perosanz and al. (2014).

Pour autant, les méthodes PPP et IPPP sont peu utilisées en cinématique et encore moins dans les conditions du LiDAR aéroporté. D'après Adam (2011), des recherches ont déjà été menées à ce sujet au sein du laboratoire M2C. Ces travaux ont permis de comparer les trajectoires calculées en PPK grâce au logiciel Grafnav avec les mêmes trajectoires calculées en IPPP et PPP respectivement à partir des logiciels GINS et GIPSY. Le résultat obtenu montre des écarts allant de 10 à 30 cm entre les trajectoires dans la plupart des cas. De plus, ils montrent que les variations des conditions de vol influencent fortement la qualité des résultats obtenus. Cependant, ces travaux datent de 2011 et les traitements IPPP ont été améliorés. Il est désormais possible d'utiliser la méthode IPPP sur les constellations GLONASS et Galileo alors que seule la constellation GPS était disponible auparavant. D'autres méthodes permettent aussi un positionnement PPP cinématique précis. Des sociétés commerciales telles que Starfire de Navcom, C-Nav (1 et 2) de C&C Technology ou encore

Trimble CenterPoint RTX proposent des solutions d'augmentation GPS basées sur la diffusion de corrections par satellites géostationnaires. Ces services utilisent les orbites et horloges précises calculées par des centres comme le Jet Propulsion Laboratory (JPL) ou à partir de réseaux mondiaux de stations permanentes. Ils calculent aussi, de la même manière, les corrections précises à apporter aux mesures et toutes ces données sont envoyées en temps réel par internet via le Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) ou grâce aux satellites géostationnaires. Les précisions annoncées sont de l'ordre du décimètre pour un temps de convergence variant entre 30 et 60 minutes.

L'IGS a lui aussi mis en place un système permettant un positionnement PPP temps réel. Il fonctionne à partir de huit centres d'analyse calculant des corrections à partir d'un réseau global de stations permanentes. Ces corrections sont ensuite envoyées au récepteur GNSS par système NTRIP.

La mise en place la plus aboutie du PPP temps réel est proposée par Trimble. D'après cette société, leur dispositif permet un positionnement centimétrique pour un temps de convergence de 1 min. Ce service repose sur le même principe que ceux énoncés précédemment, mais est possible grâce à un réseau dense de stations permanentes se trouvant aux États-Unis. Ce système n'est donc disponible qu'aux États-Unis mais pourrait voir le jour dans de nombreux autres pays. Cependant, ces augmentations en temps réel posent problème dans le cas de la détermination de la trajectoire car la communication avec un réseau internet n'est pas toujours possible.

Dans le cadre de ces travaux, la méthode IPPP est la plus avantageuse puisqu'elle résout le problème de ligne de base. De plus, elle ne nécessite pas de communication avec un système extérieur et est entièrement gratuite. Par conséquent, le logiciel GINS a servi au traitement des trajectoires.

II.2.4 Traitement des données GNSS réalisé

Pour les traitements GNSS réalisés lors de ces travaux, les mesures GNSS ont été rééchantillonnées à 1 Hz car GINS ne fonctionne pas avec des fréquences plus élevées pour des traitements cinématiques. Cet aspect de la méthode IPPP ne pose pas de problème puisque les mesures de la centrale inertielle permettent d'augmenter la fréquence de positionnement. Les traitements sur le logiciel GINS sont uniquement réalisés grâce à des lignes de commande à partir du terminal. Pour autant, GINS possède une interface, visible en annexe 2. Cette dernière est seulement utilisée pour mettre à jour le logiciel et rechercher de la documentation à propos du logiciel. Une fois le traitement PPP lancé, GINS crée un

fichier directeur, permettant de gérer les paramètres de calcul. Un extrait de ce fichier est disponible en annexe 3. D'autres paramètres sont modifiables à partir du terminal. Ensuite, le logiciel récupère les fichiers GRGS et ANTEX sur des serveurs dédiés. Il est également possible d'utiliser ses propres fichiers, ce qui a été fait pour cette étude car les corrections de phase de l'antenne utilisée à bord de l'avion ne sont pas disponibles dans le dernier fichier ANTEX.

Une fois le traitement terminé, le logiciel crée plusieurs fichiers dont : la solution, le listing et le statistique. Un extrait de chaque fichier est disponible respectivement en annexe 4, 5 et 6. Les solutions sont fournies en trois types de coordonnées : XYZ, LLH et ENU. De plus, le fichier solution contient, entre autres, les variances et les covariances de chaque coordonnée. Le fichier listing retrace et décrit l'ensemble des étapes du traitement réalisé afin d'obtenir les coordonnées. Il informe aussi des choix réalisés par GINS lorsque des problèmes sont rencontrés. Pour finir, le fichier statistique contient des informations sur les mesures et les calculs GNSS. Des outils de GINS permettent d'extraire ces données et de créer des graphiques. Des informations telles que les résidus sur les mesures de phase et de code peuvent être tracées en fonction de l'élévation ou du temps. Ces graphiques sont disponibles en annexe 7 à 9. À partir de ces informations, les paramètres de calcul et en particulier les angles de coupures ont été ajustés. En effet, le graphique en annexe 7 montre que le biais des mesures de phase est plus fort pour les satellites de basse élévation. Cette analyse est cohérente puisque plus le satellite est bas, plus la couche d'atmosphère traversée par le signal est grande. Par conséquent, le signal est plus bruité. Ces graphiques permettent de trouver un bon compromis afin de limiter les mesures trop biaisées, tout en gardant le plus de mesures possibles. Ces ajustements de paramètres ont permis de se rapprocher de quelques centimètres de la trajectoire calculée en DGPS dans ces travaux.

De plus, GINS fournit les résultats en temps GPS alors que Grafnav les fournit en temps UTC. Il est important de convertir les résultats dans le même système de temps pour les comparer. Pour finir, les résultats fournis par GINS sont dans le même système de coordonnées que les coordonnées des satellites calculées par le GRGS, soit en ITRF2014. Or, les résultats du DGPS sont dans le même système que les bases du RGP utilisées, c'est-à-dire en RGF93. Selon Harmel (2014), le RGF93 correspond aux coordonnées ETRF2000 calculées à partir des paramètres calculés en 2009. Afin de comparer les résultats, les coordonnées obtenues par méthode DGPS ont été converties en ITRF2014 à partir du site de l'EUREF Permanent GNSS Network : <https://www.epncb.oma.be/>. Les résultats obtenus sont

détaillés dans la partie II.3.1. Des échanges avec le GRGS, plus particulièrement avec le responsable des projets GNSS Monsieur F.Perosanz, permettront d'apporter des améliorations dans le traitement des vols. Ces améliorations concernent la mise en place de contraintes dans le calcul par moindre carré réalisé par GINS lors des traitements PPP. Ces contraintes sont induites par la méthode de levé LiDAR mise en place par le laboratoire M2C. En effet, les contraintes imposées au pilote lors de l'acquisition peuvent être traduites dans le calcul. Pour chaque vol, le pilote doit respecter une allure ainsi qu'une altitude constante avec une certaine marge d'erreur. Par conséquent, la distance entre deux points successifs de la trajectoire déterminée en PPP doit être égale à la formule suivante :

$$D_{p,p+1} = fr \times (v + v_m)$$

Où $D_{p,p+1}$ représente la distance 3D entre deux points et fr la fréquence d'acquisition GNSS, soit dans notre étude 1 seconde, v correspond à la vitesse de l'avion et v_m à la marge d'erreur.

De plus, la hauteur ellipsoïdale calculée sur l'ensemble des points de la trajectoire doit être égale à la somme de l'altitude et de l'ondulation du géoïde. Cela permet de rajouter une contrainte sur la hauteur ellipsoïdale des points de la trajectoire selon la formule suivante :

$$(H + N) - H_m \leq h_{calculée} \leq (H + N) + H_m$$

Où H représente l'altitude fournie au pilote, N l'ondulation du géoïde et H_m la marge d'erreur sur l'altitude. $h_{calculée}$ correspond à la hauteur ellipsoïdale des points de la trajectoire.

Les contraintes qui seront mises en place permettront principalement d'éviter des coordonnées aberrantes difficilement repérables sur de grandes trajectoires dans les résultats fournis par GINS.

II.2.5 Détermination de la SSH

Une fois les mesures GNSS traitées par méthode IPPP, les données sont couplées avec les mesures de la centrale inertielle grâce au logiciel IPAS Pro. La haute fréquence d'acquisition de la centrale permet de réduire le temps entre chaque détermination de la position. En effet, grâce à l'ajout des mesures de la centrale, la position de l'avion est calculée toutes les 0.002 sec (500 Hz) tandis que les mesures GNSS fournissent un positionnement toutes les secondes.

Par la suite, les nuages de points sont calculés avec le logiciel ALS PP à partir de la trajectoire et des mesures du LiDAR. Les traitements sont identiques aux précédents nuages de points calculés par le laboratoire M2C à partir de la trajectoire DGPS.

II.3 Analyse des résultats

II.3.1 Analyse de la trajectoire calculée à partir de mesures GNSS

Afin de tester la qualité du positionnement en mode IPPP à partir du logiciel Gins, plusieurs tests ont été réalisés. Le premier consiste à calculer la position d'une station du RGP en mode cinématique IPPP et PPP et de les comparer aux coordonnées fournies par le RGP. La station sélectionnée se nomme BRMF et se situe à Bron, dans la métropole lyonnaise. Cette station a été choisie puisque des premiers tests de positionnement PPP ont été réalisés sur cette station au sein de l'ESGT. De plus, elle se situe loin des côtes et subit donc très peu les effets de surcharge océanique. Par conséquent, cela permet d'éviter l'ajout d'erreur due à l'utilisation de modèle de correction. Les données ont été choisies afin de correspondre au mieux à celles acquises lors des vols LiDAR. Ainsi, les traitements PPP et IPPP sont effectués avec les mesures de phase réalisées sur les signaux des constellations GPS et GLONASS avec une fréquence de 1 Hz sur une durée de 3 heures afin d'étudier l'évolution des résultats en fonction de la durée d'acquisition. Le RGP ne fournit pas de valeur de précision concernant les coordonnées calculées. Cependant, des informations sur la stabilité des stations sont disponibles. Concernant la station BRMF, les coordonnées Est et Nord varient au maximum de 5 mm et la composante Up de 2 cm pour des calculs à partir de 24 heures d'observation. Afin de comparer les résultats, les coordonnées du RGP ont été converties en ITRF2014 grâce au site de l'EUREF. D'après la figure 13, l'expérience montre que la longitude et la latitude sont légèrement plus précises que la hauteur ellipsoïdale.

En effet, les écarts des deux premières composantes se situent entre 3 mm et 5.5 cm alors que les écarts de hauteur ellipsoïdale sont entre 1 mm et 8 cm. La comparaison des figures 13 et 14 prouve que la méthode IPPP fournit de meilleurs résultats que la méthode PPP. En effet, les écarts sont plus grands en PPP : les écarts en longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale sont compris entre 0 cm et 1.5 m environ. Après 2h30 de mesures, les résultats PPP convergent, les écarts des trois composantes sont alors inférieurs à 23 cm.

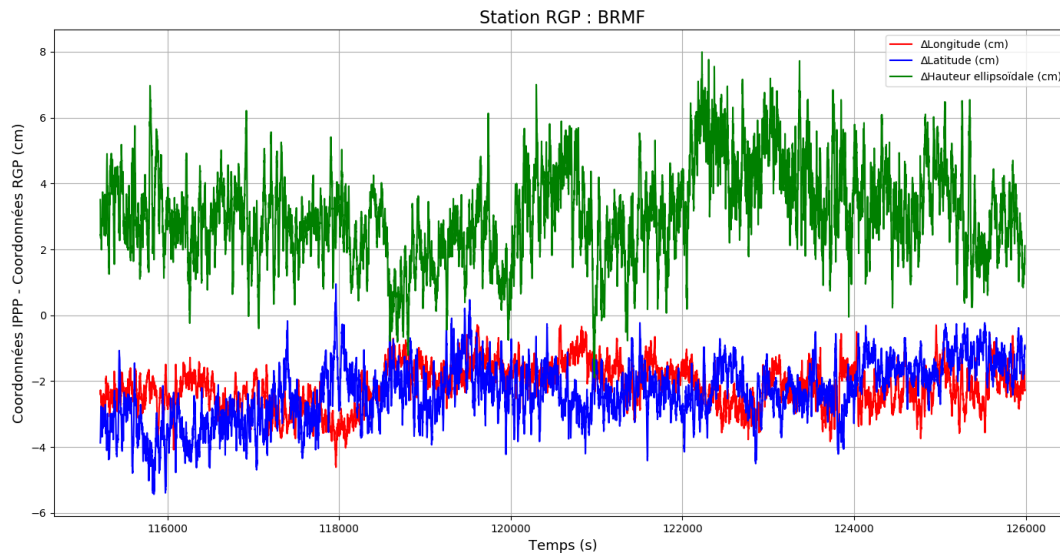


Figure 14 : Écarts entre les coordonnées de la station BRMF calculées avec le logiciel GINS et celles fournies par le RGP

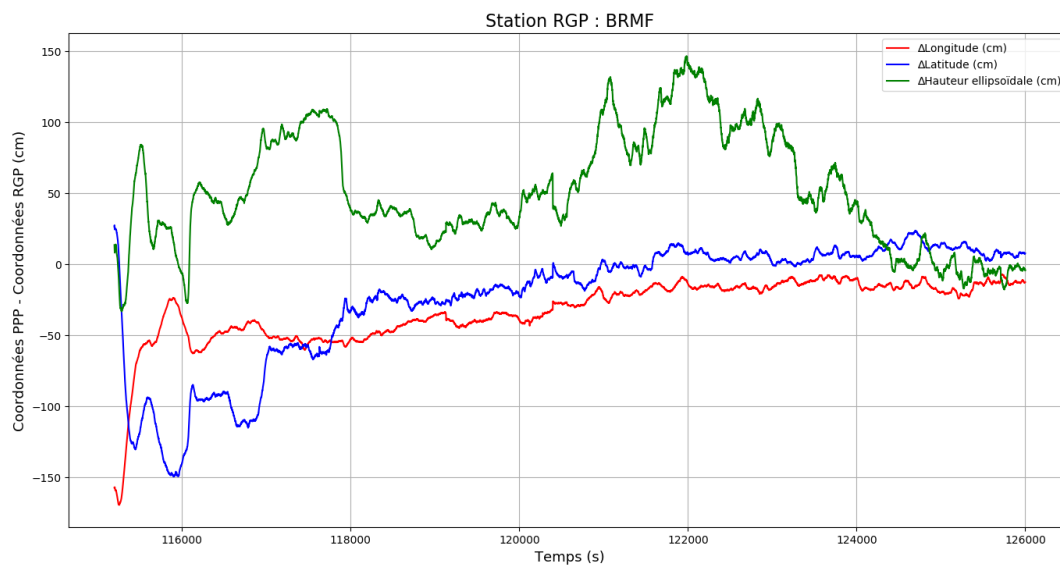


Figure 13 : Écarts entre les coordonnées de la station BRMF calculées en PPP et celles fournies par le RGP

La meilleure précision de résultats pour la méthode IPPP s'explique par la fixation des ambiguïtés. De plus, l'analyse du tableau 1 confirme la meilleure qualité de l'IPPP. Pour cette méthode, les valeurs sont peu dispersées puisque l'écart-types de chaque composante est proche du centimètre.

	BRMF GINS (IPPP)			BRMF RTKLIB (PPP)		
	Δ Long	Δ Lat	Δ H	Δ Long	Δ Lat	Δ H
Moyenne (cm)	-2,2	-2,3	3,1	-32,5	-24,5	51,2
RMS (cm)	2,3	2,5	3,4	39,6	49,1	65,2
Écart-type (cm)	0,7	0,9	1,4	22,7	42,6	40,4
Maximum (cm)	4,6	5,4	8,0	169,5	149,5	146,7

Tableau 1 : Indicateurs statistiques calculés sur les écarts obtenus avec la station BRMF

Les RMS montrent que les résultats sont très intéressants pour calculer un positionnement cinématique en IPPP car ils ne dépassent pas 3,4 cm. En complément de ces indicateurs statistiques, les histogrammes des écarts sont disponibles en annexe 10. Ces résultats sont encourageants pour utiliser la méthode IPPP afin de calculer la trajectoire de l'avion. Cependant, l'antenne réceptrice utilisée dans ce test est statique, contrairement à celle placée sur l'avion qui se déplace à environ 220 km/h. Des expériences supplémentaires ont donc été réalisées afin de se rapprocher au mieux des conditions lors des levés LiDAR.

Le second test consiste à comparer les trajectoires du vol 190830 calculées en IPPP et PPP durant l'acquisition du LiDAR avec la trajectoire calculée en DGPS. Pour ce vol, deux bases GNSS situées à Caen et à Merville-Franceville ont été utilisées pour calculer la position de l'avion. Ces deux antennes sont respectivement au maximum à 25 et 14 km de l'avion. Cela laisse supposer que la trajectoire calculée en DGPS est assez précise pour servir d'élément de comparaison. D'après les résultats du test visibles sur les figures 15 et 16, les écarts sur les composantes latitude, longitude et hauteur ellipsoïdale sont plus faibles avec la méthode IPPP. Ainsi, les coordonnées IPPP sont plus proches de celles obtenues avec la méthode DGPS. Par conséquent, ce second test montre, comme le premier, que la méthode IPPP fournit des résultats plus précis que la méthode PPP.

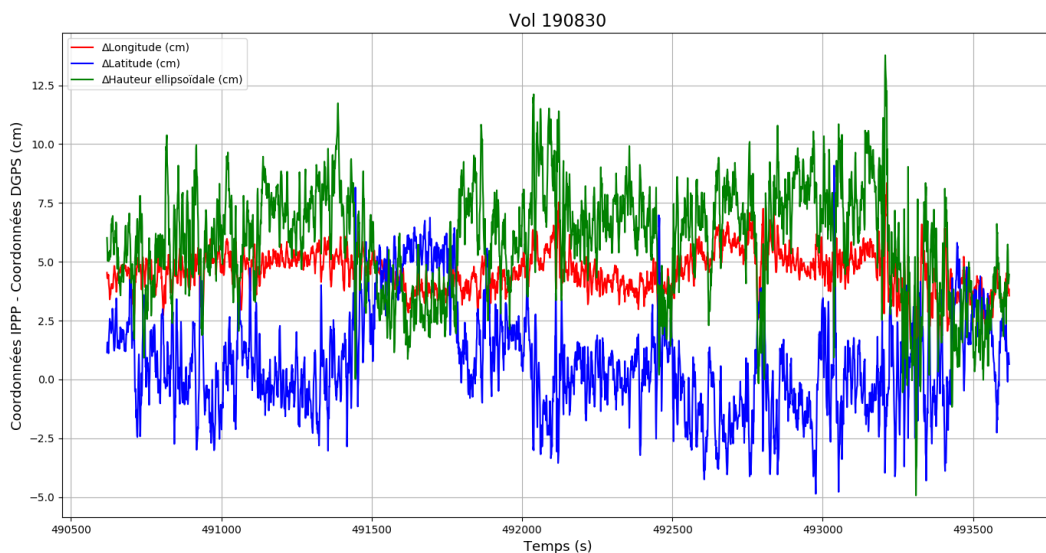


Figure 15 : Comparaison des coordonnées IPPP et DGPS pour le vol 190830

De plus, les résultats PPP convergent après environ 39 minutes de mesures pour finalement obtenir des écarts d'environ 20 cm en latitude et longitude et 40 cm en hauteur ellipsoïdale. Le temps de convergence du second test semble beaucoup plus court que celui du premier test. Ce phénomène s'explique par l'utilisation de mesures GNSS acquises durant 41 minutes avant la mise en route du LiDAR pour calculer la trajectoire. Par conséquent, le temps de

convergence vaut 1h 20 min. Ces mesures ne peuvent pas être utilisées pour évaluer la précision des calculs car le pilote ne respecte pas les contraintes de vol en dehors des acquisitions LiDAR et ajoute donc du biais aux mesures.

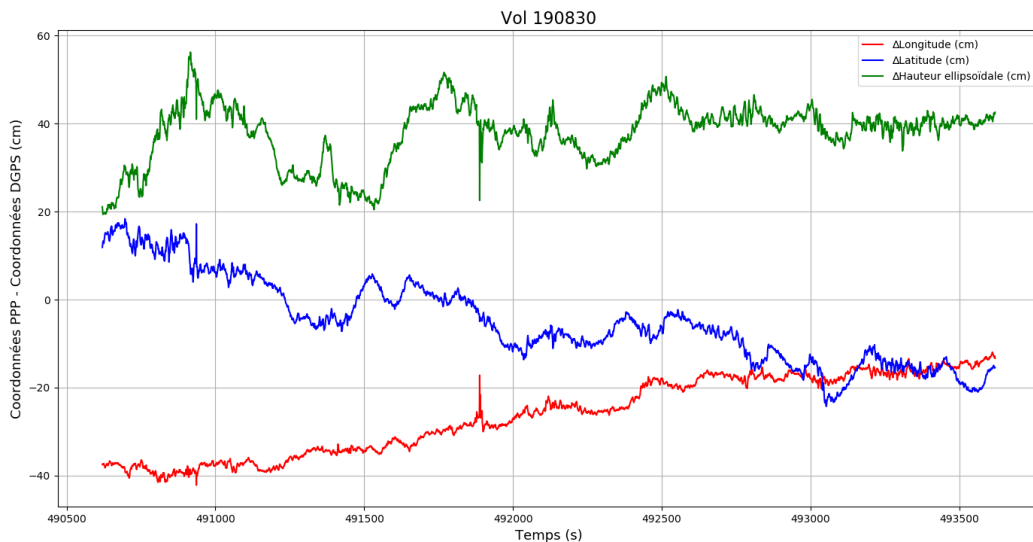


Figure 16 : Comparaison des coordonnées PPP et DGPS pour le vol 190830 pendant l'acquisition du LiDAR

Le tableau 2 représente des valeurs statistiques sur les écarts obtenus dans le second test. Ces valeurs sont plus élevées que dans l'expérience précédente, mais restent du même ordre de grandeur. Pour autant, il n'est pas possible d'affirmer que le déplacement de l'antenne dû à la vitesse de l'avion ajoute une erreur dans les calculs IPPP et PPP. En effet, la précision de la trajectoire DGPS n'est pas égale à la précision des coordonnées du RGP. En complément de ces indicateurs statistiques, les histogrammes des écarts sont disponibles en annexe 11.

	190830 (IPPP)			190830 (PPP)		
	Δ Long	Δ Lat	Δ H	Δ Long	Δ Lat	Δ H
Moyenne (cm)	4,5	0,8	5,9	-26,3	-5,0	37,8
RMS (cm)	4,6	2,4	6,4	27,7	10,9	38,4
Écart-type (cm)	0,9	2,2	2,3	8,7	9,6	6,7
Écart max (cm)	8,4	9,1	13,8	42,2	24,3	56,2

Tableau 2 : Indicateurs statistiques sur les écarts obtenus lors de l'expérience sur le vol 190830

D'après les indications du GRGS, la qualité de la trajectoire peut aussi être évaluée à partir d'indicateurs tels que la variance et covariance des résultats ou encore les résidus sur les mesures fournis par GINS. Ces informations sont présentes dans le fichier statistique et dans le fichier solution. Les annexes 6 et 7, fournies par GINS, représentent les valeurs des biais sur la phase en fonction de l'élévation des satellites ou du temps. D'après ces graphiques, le biais maximum est d'environ 6 cm et la grande majorité des biais vaut moins de 4 cm. De plus, à partir des variances sur la hauteur ellipsoïdale, les écarts-types ont été

calculés. L'ensemble des points de la trajectoire possède des écarts-types compris entre 0.9 et 1.1 mm. Ces deux indicateurs montrent des mesures et des résultats de très bonne qualité pour le vol 190830. En revanche, aucune information n'a été trouvée sur le calcul des indicateurs ainsi que sur l'interprétation de ces valeurs. Par conséquent, des recherches complémentaires mériteraient d'être menées afin de conclure sur la qualité et la précision de la trajectoire obtenue.

La dernière expérience vise à déterminer la précision de la méthode IPPP dans des conditions se rapprochant le plus d'un vol LiDAR, sans comparer les résultats à une autre méthode GNSS. Le but de cette expérience est de calculer la position de deux antennes afin de déterminer la distance les séparant pour ensuite la comparer à la distance mesurée. Le dispositif de cette expérience est visible sur la figure 17 : deux antennes réceptrices séparées d'une distance connue (1.504 m) sont placées sur le toit d'un véhicule.



Figure 17 : Dispositif mis en place pour le test de précision IPPP

Elles acquièrent des données pendant que ce véhicule parcourt plusieurs allers-retours sur une portion de route dégagée proche du laboratoire M2C. Le trajet est choisi afin d'éviter les masques et de durer suffisamment longtemps pour permettre la fixation des ambiguïtés (plus de 20-30 min). Les mesures réalisées servent à calculer, toutes les secondes, les coordonnées de chaque antenne par méthode IPPP avec le logiciel GINS. À partir de ces coordonnées, la distance séparant les deux antennes est déterminée et comparée à la distance mesurée précédemment. Ils obtenus sont fournis dans le premier graphique de la figure 18. Les résultats montrent que les coordonnées calculées en IPPP sont satisfaisantes puisque les des écarts sont centrés sur 0 et peu dispersés, d'après les valeurs du tableau 3.

	IPPP	DGPS
	Dcalc -Dmes (cm)	Dcalc -Dmes(cm)
Moyenne	0,1	-0,1
RMS	1,9	0,3
Écart-type	1,9	0,3
Écart max	5,2	0,9

Tableau 3 : Indicateurs statistiques sur les écarts obtenus lors de la dernière expérience

En effet, 95% des écarts sont inférieurs à 3.8 cm (2σ) et l'écart maximum est de 5.2 cm. De plus, ce test montre l'importance de la géométrie des satellites dans le traitement IPPP. En effet, la valeur des écarts est directement liée à la trajectoire du véhicule puisqu'ils représentent une fonction périodique induite par les huit allers-retours.

Les trajectoires, des antennes fixées au véhicule, ont également été calculées en DGPS grâce à 2 bases situées à moins de 20 km. Les écarts entre les distances calculées à partir des coordonnées DGPS et la distance connue sont visibles sur le second graphique de la figure 19. Ils sont proches de zéro, ce qui confirme l'hypothèse sur la bonne précision de la trajectoire du vol calculée en DGPS dans le test précédent.

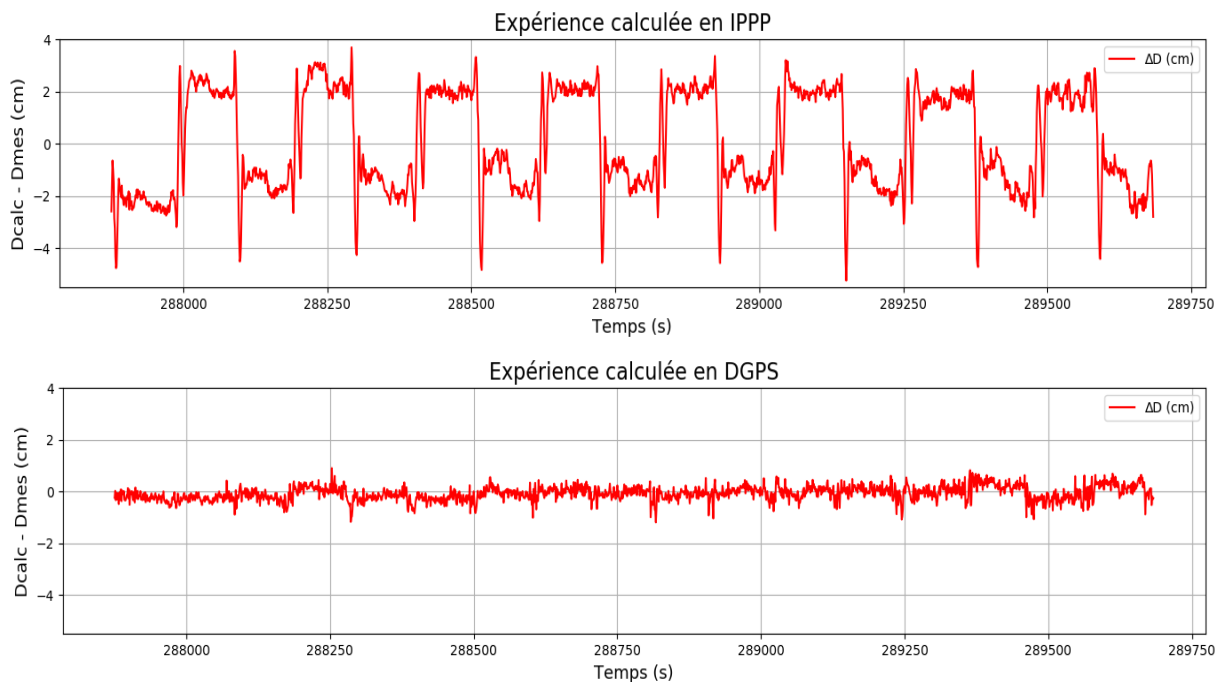


Figure 18 : Différence des distances calculées en IPPP et DGPS avec la distance mesurée

Cette dernière expérience apporte des indications intéressantes sur la précision des trajectoires calculées. Cependant, elle peut être améliorée. En effet, ce test permet de déterminer la qualité du calcul en trois dimensions, mais, dans le cadre de cette étude, il est particulièrement important d'étudier la précision de la composante verticale. Pour ce faire, les antennes doivent être placées à une hauteur différente sur le toit de la voiture. Cette différence doit être mesurée précisément et comparée à la différence de hauteur ellipsoïdale des antennes. De plus, la voiture ne se déplace pas à la même allure que l'aéronef. Ainsi, une nouvelle expérience avec deux antennes placées dans un avion pendant le prochain vol sera réalisée. Elle permettra de déterminer la précision du calcul IPPP dans les conditions d'acquisition du LiDAR aéroporté.

II.3.2 Analyse des nuages de points

Les tests réalisés laissent supposer une précision suffisante de la méthode IPPP pour déterminer la trajectoire de l'avion. Les données LiDAR du vol 191120 sont donc traitées à partir de la trajectoire calculée en IPPP. Pour rappel, ce vol a permis de lever une partie de la surface de l'océan se trouvant entre la France et l'Angleterre (figure 11). De plus, le début des acquisitions a été réalisé au-dessus des terres afin de mesurer des points de calage et de calibration ainsi que des points de contrôle. Les coordonnées de l'ensemble de ces points ont été déterminées grâce à des récepteurs GNSS par méthode DGPS.

Les nuages de points sont créés grâce au logiciel IPAS Pro puis exportés au format LiDAR standard-LAS sont visible figure 19. À partir de ces fichiers, des surfaces 3D sont réalisées sur le logiciel CloudCompare au niveau des points de contrôle.

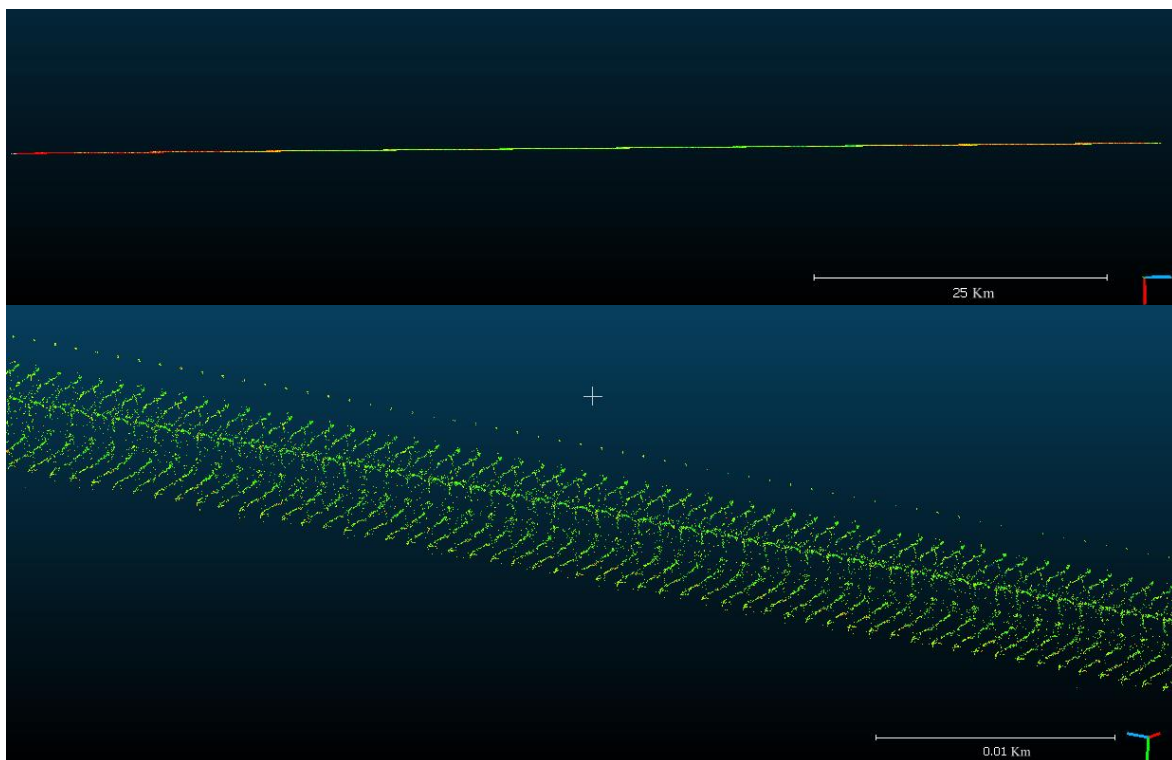


Figure 19 : Représentations de l'ensemble des nuages de points (en haut) et d'une portion des nuages de points (en bas) du vol 191120 à partir du logiciel CloudCompare

Afin de contrôler la qualité du nuage, les distances orthogonales entre les points de contrôle et les surfaces sont calculées. Les résultats obtenus ne sont pas significatifs de la précision du nuage dans son ensemble car des points de calage sont présents dans la même zone que les points de contrôle. Il serait intéressant de comparer la partie du nuage se situant en pleine mer, mais cela n'est pas réalisable.

De plus, des portions de route se situant à 5 km des zones de calage et de contrôle sont mesurées en début et en fin de vol, soit avec 2 heures de décalage. L'écart entre ces deux mesures est calculé afin de déterminer la qualité du nuage. Pour cela, des surfaces sont créées à partir des points du premier passage sur les portions de route. Les distances orthogonales entre ces surfaces et les points du second passage sont ensuite calculées. Les résultats des deux tests de qualité des nuages de points sont présents dans le tableau ci-dessous. En complément de ces indicateurs statistiques, les histogrammes des écarts sont disponibles en annexe 12.

	Dist (surface→pts de contrôle) (cm)	Dist (surface→nuage) (cm)
Moyenne	-0,51	2,82
RMS	3,28	4,55
Écart type	3,27	3,57
Maximum	7,57	11,86

Tableau 4 : Indicateurs statistiques sur les écarts calculés à partir des nuages de points

Les résultats obtenus sont satisfaisants compte tenu des précisions annoncées par le satellite SWOT. La moyenne des écarts par rapport aux points de contrôle est inférieure à 2 cm et les écarts sont peu dispersés. La comparaison de nuages montre leur bonne cohérence. Pour autant, les résultats de ces tests ne sont pas significatifs de la précision du nuage de points.

Grâce à l'ensemble de ces tests, la méthode de détermination de la SSH par le laboratoire M2C est supposée assez précise pour calibrer les instruments de mesure du satellite SWOT.

III Intégration des mesures LiDAR dans le projet SWOT

Les mesures LiDAR permettent de créer des nuages de points correspondant à la surface de la mer à un instant précis. Afin d'utiliser ces mesures pour la calibration et la validation des mesures du satellite SWOT, les produits créés par le laboratoire M2C doivent être similaires à ceux créés à partir des mesures du satellite. De plus, une méthode de comparaison de données SSH doit être déterminée. Le manque de temps durant cette étude a mené au choix d'un important travail de bibliographie et de recherche pour la calibration et la validation des mesures satellitaires plutôt que sur la mise en œuvre de cette comparaison. De plus, ces recherches permettront au laboratoire M2C de poursuivre ces travaux en ayant toutes les informations à leur disposition.

III.1 Les produits des missions Sentinel 3

Le satellite SWOT débutera sa mission d'observation en 2022. Par conséquent, les données SSH utilisées dans le cadre de ce travail sont celles de la mission Sentinel 3 produites par Copernicus. Les instruments de mesure de la SSH présents sur SWOT sont proches de ceux de la mission Sentinel 3. De plus, les données apportées par SWOT seront traitées par le même organisme. Ainsi, les produits fournis à partir de ces données seront proches de ceux étudiés dans ce travail.

III.1.1 Les différents types de produits

La technique utilisée par les satellites Sentinel 3 (A et B) pour topographier la surface de l'eau est identique à celle employée par le satellite SWOT. En effet, ils embarquent un radar altimétrique mode SAR (SRAL) qui leur permet de déterminer la distance les séparant de la surface de l'eau et la soustrait à leur hauteur ellipsoïdale. Ce radar altimétrique utilise une technologie à double fréquence, bandes ku et C. D'après European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (2018), cet appareil est utilisable selon deux modes. Le premier se nomme Low Resolution Mode (LRM) et n'a servi que durant le début de la mission, soit 27 jours. Le second est le même mode que celui qui sera utilisé par le satellite SWOT, c'est-à-dire le mode SAR. L'ensemble des traitements des données acquises par Sentinel est réalisé dans le cadre de la mission Copernicus. Ce programme a pour but d'examiner la Terre et son environnement afin d'apporter des informations et des données à l'ensemble des citoyens. Il est mis en œuvre en partenariat avec les états membres, l'European Space Agency, l'European Organisation for the Exploitation of METeorological SATellites (EUMETSAT), l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), les agences de l'Union européenne et Mercator Océan.

D'après European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (2018), durant la phase d'acquisition des radars altimétriques présents sur les satellites Sentinel 3 (A et B), les impulsions laser envoyées forment un disque d'environ 20 km de rayon à la surface de l'eau lors des acquisitions en mode LRM.

La figure 20 montre dans sa partie gauche le retour du signal lorsque la surface de l'océan est plane et dans sa partie droite le retour lorsque l'océan est agité. Pour une surface plane, les premiers retours proviennent du point situé au nadir du satellite. Les signaux ultérieurs correspondent à des anneaux de plus en plus grands autour du point central. Cependant, la surface de l'océan ne représente pas une surface plane, elle est composée de crêtes et de

creux. Par conséquent, le signal frappe dans un premier temps la crête d'une vague puis une série d'autres crêtes et par la suite des combinaisons de crêtes et de creux.

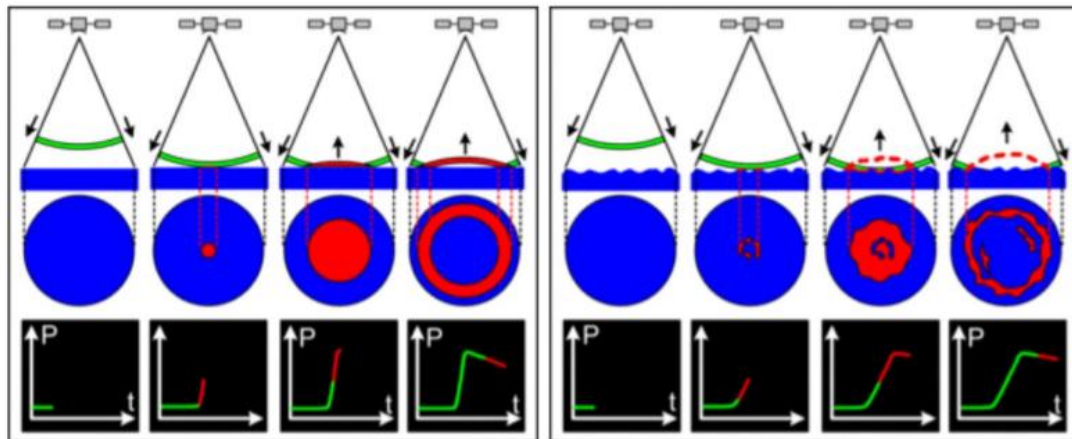


Figure 20 : Représentation de la perception du signal réfléchi par la surface de l'océan, d'après EUMETSAT (2018)

Lorsque les acquisitions sont traitées en mode SAR, la forme de l'empreinte est différente. Ce mode utilise l'effet Doppler pour discriminer les réflexions venant de l'arrière et de l'avant du faisceau émis. Le signal de la partie arrière du faisceau est détecté comme un élément s'éloignant du satellite (fréquence légèrement plus basse qu'au nadir) alors que la partie avant est détectée comme un élément se rapprochant du satellite (fréquence légèrement plus élevée qu'au nadir). Un découpage en tranche perpendiculaire à la trajectoire du satellite de la tache conventionnelle est alors obtenu. Il est visible sur la figure 21. Grâce à ce traitement, la résolution spatiale dans la direction du satellite est améliorée et vaut alors 300 m. De plus, la possibilité d'observer la même partie de la surface depuis plusieurs endroits permet d'améliorer le rapport signal/bruit et donc de détecter des signaux plus faibles qu'en mode LRM.

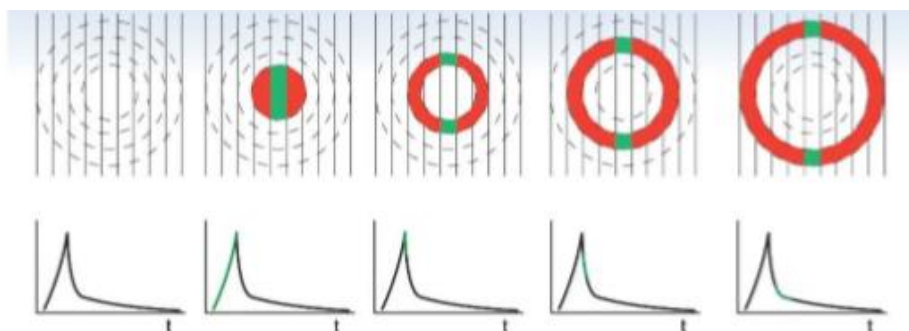


Figure 21 : Illustration du traitement SAR des mesure de l'altimètre, d'après CNES (2019)

D'après le Centre National d'Études Spatiales (2019), la distance satellite-surface est déduite de l'écho radar. Cette distance est calculée en multipliant la vitesse de l'onde par son temps de parcourt entre le satellite et la surface ciblée. Sur le signal perçu d'une onde radar typique, le moment où l'onde frappe la surface ciblée correspond à l'abscisse du point à mi-

hauteur de la partie en forte pente (le front de montée). Pour autant, lorsque l'écho est plus complexe, c'est-à-dire qu'il possède plusieurs « pics » (plusieurs fronts de montée), des algorithmes appelés retracking sont utilisés afin de déterminer le moment où l'onde frappe la surface. Ces algorithmes sont basés soit sur une méthode de seuillage, soit sur l'ajustement des formes d'onde réelles à des modèles théoriques de forme d'onde.

À partir des distances satellites-surface de l'océan, Copernicus calcule plusieurs types de données afin d'étudier différents phénomènes. Grâce à la formule ci-dessous, l'élévation de la surface de l'eau par rapport à l'ellipsoïde de référence peut être déterminée.

$$SSE = orbit\ height - (range + DTC + WTC + iono + SSB)$$

Orbit height correspond à la hauteur du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence lors de l'acquisition de la mesure. À ce terme est soustrait la distance entre le satellite et la surface de l'océan notée range. Les signaux envoyés par le radar subissent des perturbations lors de la traversée. Ainsi des corrections sont apportées à la mesure. Dry Tropospheric Correction (DTC) permet d'éliminer les erreurs produites par la troposphère. Wet Tropospheric Correction (WTC) représente le retard du signal dû à la vapeur d'eau ainsi qu'à l'eau liquide présente dans le milieu traversé. Ces deux termes sont calculés à partir de modèles et de mesures réalisées par ECMWF. Iono désigne les erreurs produites par la ionosphère qui sont déterminées à partir des deux fréquences utilisées par le radar altimétrique. Le dernier terme, Sea State Bias (SSB), est lié à l'état de la mer. Il inclut toutes asymétries de la surface de la mer, le biais électromagnétique qui décrit la réflectivité différentielle des crêtes et des creux des vagues ainsi que tout biais du tracker.

La seconde donnée calculée par Copernicus est la Total Water Level Envelope (TWLE). Elle est destinée à fournir une valeur significative de la surface des océans. Pour ce faire, l'ondulation du géoïde peut être soustraite à la SSE afin d'obtenir la hauteur de la surface de la mer par rapport au géoïde. Cependant, Copernicus soustrait la MSS à la SSE, comme le montre la formule suivante :

$$TWLE = orbit\ height - (range + DTC + WTC + iono + SSB) - MSS$$

La MSS désigne la différence entre l'ellipsoïde et le géoïde à laquelle est ajoutée la topographie dynamique absolue moyenne. La TWLE permet d'étudier certains phénomènes marins. Pour autant, lorsque ces derniers sont corrélés avec d'autres phénomènes ou bien se déroulent sur le long terme, il est difficile de les observer à l'aide de cette donnée. Cela peut être le cas lorsqu'un système de basse pression coïncide avec les marées. Afin d'étudier ces

phénomènes à long terme ou corrélés, Copernicus fournit un dernier terme : la SLA. Il correspond à la TWLE corrigée des effets de marées et d'élévation des océans dus à la pression atmosphérique et au vent. Ces deux corrections sont respectivement désignées par les termes tides et DAC (Dynamic Atmosphere Correction) dans la formule ci-dessous. La détermination des valeurs de correction est réalisée à partir de modèles ainsi que de données mesurées.

$$SLA = orbit\ height - (range + DTC + WTC + iono + SSB) - MSS - DAC - tides$$

Les hauteurs significatives des vagues ainsi que la vitesse des vents sont aussi calculées par Copernicus à partir de l'altimètre radar, mais ces données ne font pas l'objet de cette étude.

III.1.2 Les différents types de données

Les données calculées à partir des mesures des satellites Sentinel 3 (A et B) sont disponibles gratuitement dans plusieurs produits. Tout d'abord, les données topographiques sont divisées en deux catégories suivant leurs utilisations. Pour des analyses et des travaux des surfaces terrestres, un produit Land est disponible. Afin d'étudier le niveau des mers et océans, un second produit intitulé Marine est créé. Ce dernier est utilisé pour comparer les mesures LiDAR et satellitaires. D'après la page Altimetry Services du site de l'EUMSTAT (EUMSTAT, 2020), il est diffusé selon trois délais. Le premier, Near Real Time (NRT), est disponible 3 heures après les acquisitions des satellites. Le deuxième, Short Time Critical (STC), est mis en ligne après 48 heures et pour finir, le Non Time Critical (NTC) est téléchargeable au bout d'un mois. La différence entre ces trois produits provient des traitements. En effet, un délai plus long permet l'utilisation de données auxiliaires supplémentaires servant à calculer des corrections plus adaptées. De plus, cela permet aussi de calculer des orbites plus précises. Par conséquent, ce sont les produits NTC qui fournissent les données avec la meilleure précision.

Selon European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (2018), les produits NTC sont créés suivant 4 niveaux : level 0, level 1, level 2 et level 3. Les données d'entrées du level 0 sont les données brutes exprimées en unités techniques instrumentales (ISP). Le level 0 convertit ces données en unité internationale (SI). De plus, il corrige la date et l'heure des mesures et les localise sur Terre. Pour finir, il prépare les données pour les traitements du level 1.

Les données du level 0 subissent une chaîne de traitement afin de calculer les données du level 1. La principale fonction de cette chaîne de traitement est de déterminer la distance séparant la surface de l'eau du satellite, le facteur d'échelle σ_0 et les formes d'onde de niveau 1 en appliquant des corrections instrumentales à tous ces éléments. Ces traitements donnent lieu à 3 types de level 1 : 1A, 1B-S et 1B. Leurs différences proviennent des corrections appliquées et du traitement des échos du signal.

À partir des données 1B, les distances satellites-surface de l'eau finales, le coefficient de rétrodiffusion, la vitesse du vent et la hauteur de la mer sont calculés. L'ensemble de ces données sont présentes dans le level 2. De plus, le traitement level 2 calcule et applique des corrections géophysiques. Ces corrections peuvent par exemple correspondre aux marées ou à un changement de surface de référence (géoïde).

Le dernier produit réalisé à partir des mesures des satellites Sentinel 3 (A et B) est le level 2P. Ce produit contient le sea level anomaly avec l'ensemble des corrections nécessaires pour son calcul. De plus, des informations sur la validité des mesures et des corrections sont fournies.

Un level 3 est produit à partir de différentes missions satellitaires et n'utilise donc pas uniquement les mesures de la mission Sentinel 3. Par conséquent, ce produit ne peut pas être utilisé pour étudier l'usage des mesures LiDAR dans la calibration de satellites altimétriques.

Dans le cas des produits de la mission Sentinel 3, ce sont les données marine NTC de niveau 2 qui permettent de comparer la SSH produite par le satellite et la SSH déterminée à partir des mesures LiDAR. D'après European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (2017), les fichiers correspondant aux mesures NTC niveau 2 se nomment `SR_2_WAT__`. Ces données sont téléchargeables sur le site <https://coda.eumetsat.int/>. Elles sont composées de trois fichiers : Reduced, Standard et Enhanced. Le premier contient le traitement en mode basse résolution correspondant à 1 Hz sur la fréquence Ku. Le deuxième fournit les données en basse et haute fréquence (1 Hz et 20 Hz) sur les fréquences Ku et C. Le dernier fournit les mêmes données que le deuxième en incluant les formes d'ondes.

III.2 Méthodes de calibration et validation des mesures satellitaires

Afin de calibrer l'altimètre Radar présent sur SWOT, les données produites doivent être cohérentes avec les données créées à partir de mesures satellitaires. En effet, les mesures LiDAR fournissent un grand nombre de points de la surface de l'océan sur la zone levée alors que les données satellitaires fournissent la SSH sur la trace du satellite avec une résolution beaucoup plus faible.

III.2.1 Études de comparaisons de SSH déterminée à partir de données LiDAR et satellitaires

En supposant la précision des données LiDAR suffisante pour la calibration de l'altimètre radar, une méthode de comparaison des mesures LiDAR et satellitaires doit être mise en place. Des travaux similaires ont déjà été réalisés afin de développer des méthodes de calibration à partir de mesures LiDAR.

Zlinszky and al. (2017) comparent la mesure de la hauteur de la surface d'eau à partir de différentes méthodes. Pour cela, des mesures ont été faites sur le lac Balaton en Hongrie à partir de marégraphes, de bouées GPS et d'un LiDAR aéroporté. Les deux premiers types d'instruments sont couramment utilisés pour calibrer les satellites altimétriques alors que le LiDAR n'a fait l'objet que d'études pour le moment. De plus, le lac a été observé par les satellites Envisat et Jason 2 grâce à leur radar altimétrique. L'ensemble de ces acquisitions a servi à calculer la hauteur de la surface du lac afin de la comparer à la surface fournie par Hungarian National Water Directorate (OVF) considérée comme vraie. L'objectif de cette étude est de comparer le LiDAR avec les méthodes actuelles de calibration des satellites, puis de développer et de tester une méthodologie pour le traitement des données LiDAR aéroportées comme base de comparaison avec l'altimétrie radar par satellite. Il en convient que ces travaux ne sont pas réalisés dans les mêmes conditions que les acquisitions du laboratoire M2C. Cependant, ils apportent des informations intéressantes.

Pour comparer l'ensemble des données fournies par les trois types d'instruments entre eux, les résultats ont été calculés en WGS4 par rapport au géoïde. De plus, l'ensemble des acquisitions satellitaires et instrumentales n'a pas été réalisé en même temps. Par conséquent, des corrections de marées terrestres et polaires ont été appliquées aux données. Ces deux traitements ont pu rajouter du biais dans les résultats. Pour autant, lors des travaux

du laboratoire M2C, les mesures n'auront pas besoin d'être modifiées car elles seront réalisées dans le même système que les mesures satellitaires et au même moment.

Pour les acquisitions LiDAR sur le lac Balaton, la technique mise en place est proche de celle utilisée par le laboratoire M2C. Les acquisitions ont été réalisées avec un appareil Leica ALS50-II, comprenant un système de positionnement collectant des mesures GNSS toutes les secondes, couplé à une centrale inertielle d'une fréquence de 200 Hz. Les conditions de vol sont différentes puisque l'appareil se situe à 4500 m d'altitude et fournit une densité de points de 1/5 m² et une empreinte au sol de 1m.

Les mesures obtenues par les marégraphes et les bouées GPS sur le lac Balaton ont permis d'obtenir des résultats précis. En effet, ils sont centimétriques lorsque les eaux sont calmes sur le lac et peuvent donc être utilisés pour calibrer les satellites. Cependant, ces méthodes présentent des limites. Leur complexité de mise en œuvre dans des zones difficiles d'accès telles que la pleine mer pose problème pour la calibration de satellite. De plus, la comparaison d'une mesure ponctuelle avec une empreinte satellitaire pose question. Dans cette étude, des interpolations sont réalisées afin de comparer les mesures des balises et des marégraphes aux mesures satellitaires. Ce problème est d'autant plus important lorsque les mesures sont réalisées sur une mer agitée car l'interpolation des mesures risque d'être plus erronée. Les hauteurs obtenues par mesure LiDAR ont été moyennées sur l'emprise de chaque empreinte des deux satellites. La hauteur obtenue pour chaque empreinte se trouve en moyenne à 4.7 cm en dessous des mesures fournies par l'OVF. De plus, l'écart-type des moyennes est de 4 mm alors que l'écart-type des 2 millions de points présents dans l'ensemble des empreintes est de 14.4 cm. Ces résultats démontrent l'efficacité du LiDAR et l'intérêt de sa redondance de mesures. En effet, en moyennant les mesures, les biais importants ainsi que les variations de hauteur à l'intérieur des empreintes sont absorbés. De plus, les précisions des mesures LiDAR sont environ 10 fois supérieures à celles des mesures satellitaires. Pour autant, il faut prendre en compte la meilleure précision des mesures satellitaire en mer que sur les lacs. Cet aspect est dû à la proximité des terres affectant la qualité des mesures des satellites au niveau des lacs.

Les résultats de ces études démontrent l'efficacité du LiDAR pour la calibration des satellites. Il est ainsi possible de l'utiliser pour la mission SWOT, même si les mouvements d'eau en mer apporteront possiblement du biais sur les mesures.

Melville and al. (2016) ont réalisés des mesures avec le LiDAR Riegl Q680i au-dessus de l'océan dans le Golfe du Mexique dans des conditions similaires aux vols réalisés par le laboratoire M2C. Par ailleurs, le LiDAR utilisé est plus récent que celui du laboratoire M2C et permet une meilleure précision des mesures. Ces mesures ont permis de recueillir un grand nombre d'informations et notamment de comparer la SSH et la SSHA à celles calculées à partir de mesures de Jason 1. L'ensemble de ces mesures a été réalisé sur une portion de la trace du satellite avec un décalage de 0.5-0.75 heure.

Les résultats de SSH ont été moyennés sur une largeur de fauchée allant de 250 à 500 m selon l'altitude de l'avion et sur 500 m le long de la trace afin d'être comparés avec les mesures de Jason 1. Les résultats obtenus fournissent un RMS de quelques centimètres avec la majorité des écarts se trouvant en dessous de 10 cm. Cette étude démontre aussi la possibilité de comparer les SSHA en appliquant des modèles de corrections de marées aux données LiDAR. Les écarts obtenus sont du même ordre de grandeur que la comparaison de SSH. Dans cette étude, Melville and al démontre l'intérêt du LiDAR pour les mesures de la topographie des océans ainsi que la possibilité d'utiliser ces mesures afin de calibrer les satellites altimétriques.

III.2.2 Proposition de comparaison des données SSH du laboratoire M2C avec celles de la mission Sentinel 3

La dernière étape de ce projet consiste à comparer les mesures du laboratoire lors du vol 191120 avec les données NTC niveau 2 de la mission Sentinel 3. Dans un premier temps, les mesures LiDAR pourront être moyennées avec différentes échelles afin d'étudier les écarts entre les données. Selon le CNES (2019), les empreintes de l'interféromètre radar en mode SAR sont sous forme de tranche de 5 km² environ et celles de l'altimètre nadir sont circulaires et varient entre 5 et 10 km de rayon suivant les missions. Sachant que la fauchée du vol 191120 fait 400 m de largeur, les moyennes de SSH pourront alors être réalisées sur 70x70 m, 200x200 m et 400x400 m. Suivant les résultats obtenus, d'autres moyennes pourront être testées. Pour ce faire, il faudra réaliser une nouvelle trajectoire survolant la même partie de l'océan que l'un des satellites Sentinel 3 au même moment. La trajectoire devra être établie en privilégiant la taille de la fauchée. L'altitude et le FOV devront être choisis pour que la fauchée fasse plusieurs kilomètres de largeur afin d'obtenir une meilleure couverture des empreintes des mesures satellitaires. La densité de points sera réduite mais restera largement suffisante pour calculer la SSH moyennée. Des moyennes sur de plus grandes distances pourront alors être effectuées.

Afin d'affiner la méthode de calibration, une étude sur les formes d'empreintes des radars altimétriques nadir ainsi que celles de l'interféromètre radar en mode SAR devra être réalisée. La détermination de ces empreintes permettra de calculer la SSH moyennée à partir de l'ensemble des points présents dans l'empreinte. Cette valeur pourra être comparée à la SSH calculée à partir des mesures altimétriques. De plus, selon le CNES (2019), à partir des mesures SWOT, des nuages de points de la surface des océans seront réalisés. Ils contiendront évidemment la SSH, mais aussi la taille des empreintes pour chaque point. Ces données pourront permettre de sélectionner les données LiDAR qui serviront à la calibration du satellite SWOT.

Ainsi, suivant les résultats des comparaisons de SSH, la qualité des nuages de points obtenus par mesure LiDAR pourra être déterminée. De plus, une méthode de calibration des satellites altimétrique pourra être validée.

Conclusion

Les travaux réalisés ont permis de mettre en place une nouvelle méthode de positionnement GNSS afin d'éviter les contraintes liées aux lignes de base de la méthode DGPS initialement utilisée par le laboratoire M2C. Cette méthode est possible grâce au logiciel GINS développé par le GRGS. Elle est la seule méthode permettant un positionnement PPP en fixant les ambiguïtés. Les différents tests réalisés fournissent des résultats de bonne qualité et semblent suffisants pour déterminer la SSH. La détermination de la précision d'un positionnement GNSS reste très compliquée d'autant plus pour le positionnement cinématique de l'aéronef. Pour autant, ces travaux ont permis de mettre en place une expérience afin de déterminer la précision du calcul IPPP à partir de deux antennes situées à bord de l'aéronef. Cette dernière sera réalisée dans le prochain vol du laboratoire M2C. Des bases GNSS pourront aussi être installées au sol lors de cette expérience afin de déterminer à partir de quelle distance (ligne de base) la méthode IPPP devient plus précise que la méthode DGPS. De plus, cette expérience pourra permettre de mettre en place un protocole opérationnel en installant une seconde antenne définitive sur l'aéronef afin de déterminer la précision de la trajectoire pour chaque vol réalisé.

Le laboratoire envisage d'acquérir un nouveau système LiDAR. Ce nouvel instrument pourra permettre d'observer la constellation Galileo. Les observations seront alors plus nombreuses et les résultats pourront donc être améliorés.

À travers ces recherches, des liens ont pu se créer avec le groupe du GRGS et plus particulièrement avec Monsieur Perosanz. Des améliorations seront alors apportées dans le traitement des trajectoires de l'aéronef par méthode IPPP. Ces améliorations passeront par l'intégration de contraintes dans le calcul. Cette collaboration continuera afin d'aider les chercheurs du laboratoire M2C à utiliser au mieux le logiciel GINS.

L'utilisation du logiciel GINS a mis en évidence les avantages d'un logiciel de recherche par rapport à un logiciel commercial. Les logiciels de recherche peuvent offrir de meilleures performances et plus de liberté dans les traitements ainsi que la possibilité de les adapter aux travaux réalisés. Cependant, les problèmes rencontrés lors des traitements sont plus difficiles à résoudre. En outre, les aberrations et les erreurs dans les résultats sont compliquées à mettre en évidence. Par conséquent, la prise en main d'un tel logiciel peut s'avérer complexe en particulier pour des personnes non spécialistes des traitements GNSS. Par ailleurs, le groupe GRGS met en place des formations afin de se formaliser avec le

logiciel GINS. Malheureusement, avec la situation sanitaire actuelle liée au COVID-19, aucune formation n'a pu être suivie lors de ce travail de fin d'études. Ces formations permettront, entre autres, d'améliorer la gestion des paramètres de calcul ainsi qu'une meilleure utilisation des outils d'analyse des résultats fournis par GINS.

Les résultats du traitement du vol 191120 a permis de mettre en évidence la possibilité d'utiliser les mesures LiDAR afin de calibrer le satellite. Les prochaines comparaisons réalisées avec les mesures des satellites Sentinel 3 A et B pourront confirmer la bonne qualité des traitements effectués par le laboratoire.

La poursuite de ces travaux permettra de confirmer l'intérêt du LiDAR démontré dans les recherches de Zlinszky and al ainsi que Melville and al. Cette méthode présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes actuelles de calibration des satellites altimétriques. Elle permet de couvrir de grandes zones alors que les autres méthodes réalisent des mesures ponctuelles. La redondance des mesures de la méthode LiDAR permet d'améliorer la précision de la SSH à l'intérieur des empreintes des mesures satellitaires. De plus, l'utilisation de la méthode IPPP permettra de topographier des zones éloignées des terres où d'autres méthodes sont difficiles à mettre en place.

Pour finir, les différentes comparaisons envisagées dans ce mémoire permettront de trouver la méthode la plus adaptée pour calibrer les instruments de mesure du satellite SWOT.

Bibliographie

- Adam M. Traitement d'acquisitions LiDAR aéroporté : optimisation de trajectoires (PPK/PPP), intercomparaison d'outils de calcul PPP. Travail de fin d'études, Le MANS : École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2011, 82 p.
- Bonnefond P, Haines B.J, Watson C. In situ absolute calibration and validation : a link from coastal to open-ocean altimetry. *Coastal Altimetry*. Springer, 2011, 259–296.
- Bosser P. (2013), GNSS : Système globaux de positionnement par satellite, cours de l'École Nationale des Sciences Géographiques, Champs-sur-Marne.
- Centre National d'Études Spatiales. Altimétrie pour l'hydrologie, [en ligne], 2019, Disponible sur : <https://www.aviso.altimetry.fr>. (consulté le 03/06/2020)
- Copernicus. PRODUCT USER MANUAL, [en ligne], 2017, Disponible sur : <https://resources.marine.copernicus.eu/>. (consulté le 26/05/2020)
- Département des Sciences, Géomatiques Centre de Recherche en Géomatique, Université Laval. PPP-GNSS: Principe et Nouveautés. Colloque CIDCO, juin 2015, Rimouski, 16.
- European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. Sentinel 3 Marine Copernicus Data Access User Manual, [en ligne], 2017, Disponible sur : <https://www.eumetsat.int>. (consulté le 26/05/2020)
- European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. Sentinel-3 SRAL Marine User Handbook, [en ligne], 2018, Disponible sur : <https://sentinel.esa.int/>. (consulté le 26/05/2020)
- Harmel A. (3^e trimestre 2014). Rénovation du RGF93. *Revue XYZ*, n°124, 36-40.
- Leica Geosystems. Leica ALS60 Airborne Laser Scanner. Product Specifications, 2008, 12 p.
- Lenain L, N.M Melville. *Measurement of the Directional Spectrum across the Equilibrium Saturation Ranges of Wind-Generated Surface Waves*. *Journal of Physical Oceanography*. 2017, 47(8), p. 2123-2138
- Lenain L, Statom N.M, Melville W.K. *Airborne Measurements of Surface Wind and Slope Statistics over the Ocean*. *Journal of Physical Oceanography*, 2019, 49 (11), 2799-2814
- Loyer S, (2007), Traitement des données GPS avec GINS Cours données à l'occasion de l'école d'été du GRGS. GRGS.
- Mekonnen M, Hoekstra A. *Four billion people facing severe water scarcity*. *Science Advances*, [en ligne], 2016, n°2, Disponible sur : <https://advances.sciencemag.org/content/2/2/e1500323>. (consulté le 27/03/2020)

- Melville W.K, Lenain L, Cayan D.R, Kahru M, Kleissl J.P, Linden P.F, Statom N.M. *The modular aerial sensing system*. J. Atmos Ocean Technol, 2016 33, 1169– 1184
- Morel L. (2019 a), Géodésie, GNSS et Géoréférencement, cours de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes, ESGT/CNAM.
- Morel L. (2019 b), Géodésie, Partie 1, Cours de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes, ESGT/CNAM.
- Morel L, Fund F, Legros R, Durand S, Flacelière B. (1^{er} trimestre 2014). PPP, la maturité ?. *Revue XYZ*, n°138, 42-50.
- National Aeronautics and Space Administration. Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT§). Project Science Requirements Document Rev B, 2018, 29p
- Pellerin Le BAS X. Morphodynamique des deltas de jusant et des flèches sableuses en domaine macrotidal : les embouchures de l'Orne et de la Dives. Thèse, Caen : Université de Caen Normandie, 2018, 382 p.
- Perosanz F, Loyer S, Mercier F, Capdeville H, Mezerette A. Contribution du GRGS à la campagne REPRO2 de l'IGS: Intérêts pour les traitements GPS statiques et dynamiques en mode IPPP, 2014, 50 p.
- Perosanz F. 2019, INTRODUCTION TO SPACE GEODESY: GNSS DATA MODEL PPP AND DIFFERENTIAL. Cours Université Toulouse III, CNES,GET,OMP,GRGS.
- Ternon P. Spectre de vagues par LiDAR aéroporté comparé aux mesures satellitaires. Travail de fin d'études, Le MANS : École Supérieure des Géomètres et Topographes, 2019,53 p.
- Teunissen P, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer International Publishing, 2017, 1327 p.
- Vaze P, Kaki S, Limonadi D, Esteban-Fernandez D, Zohar G. The Surface Water and Ocean Topography Mission. IEEE Aerospace Conférence, Mars 2018, Montana, 10.
- Zlinszky A, Boergens E, Glirac P, Pfeifer N. *Airborne Laser Scanning for calibration and validation of inshore satellite altimetry: A proof of concept*. Remote Sensing of Environment, 2017, 197, 35-42

Sites web

Centre National d'Études Spatiales. Missions, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.aviso.altimetry.fr>>. (consulté le 02/04/2020)

EUREF Permanent Network. EUREF Permanent GNSS Network, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.epncb.oma.be/>>. (consulté le 02/06/2020)

European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. MONITORING WEATHER AND CLIMATE FROM SPACE, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.eumetsat.int>>. (consulté le 18/05/2020)

Institut national de l'information géographique et forestière. L'information grandeur nature, [en ligne]. Disponible sur : <<https://geodesie.ign.fr>>. (consulté le 18/05/2020)

Jet Propulsion Laboratory. SWOT, [en ligne]. Disponible sur : <<https://swot.jpl.nasa.gov/>>. (consulté le 28/03/2020)

National Aeronautics and Space Administration. NASA SCIENCE, [en ligne]. Disponible sur : <<https://science.nasa.gov/>>. (consulté le 28/03/2020)

Table des annexes

Annexe 1 Les erreurs du positionnement GNSS	60
Annexe 2 Interface du logiciel GINS	67
Annexe 3 Fichier directeur du traitement IPPP du vol 190830.....	68
Annexe 4 Extrait du fichier Solution du traitement IPPP du vol 190830.....	69
Annexe 5 Extrait du fichier Listing du traitement IPPP du vol 190830.....	70
Annexe 6 Extrait du fichier Statistiques du traitement IPPP du vol 190830.....	71
Annexe 7 Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase en fonction de l'élévation des satellites	72
Annexe 8 Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase en fonction du temps	73
Annexe 9 Graphique représentant les résidus sur la mesure de code en fonction de l'élévation des satellites	74
Annexe 10 Histogrammes des écarts obtenus lors de l'expérience utilisant une station du RGP	75
Annexe 11 Histogrammes des écarts obtenus lors de l'expérience du vol 190830	76
Annexe 12 Histogrammes des écarts obtenus lors de l'expérience du vol 191120	77

Annexe 1

Les erreurs du positionnement GNSS

Les erreurs dues aux mesures GNSS

Erreurs induites par l'émission du signal

La méthode employée pour le positionnement GNSS induit des erreurs. Ces erreurs affectent la position calculée et influencent donc la précision du positionnement. Les premières erreurs se produisent lors de l'émission du signal.

La plus grande source d'erreur provient de la détermination des coordonnées des satellites utilisés. En effet, la position du récepteur étant calculée à partir de la position des satellites, l'erreur sur leur position influence directement la précision des coordonnées du récepteur GNSS. Afin de limiter ces erreurs, les orbites sont calculées avec de grandes précisions par des stations au sol. Pour autant, suivant la méthode de positionnement utilisée (DGPS ou PPP), les erreurs d'orbites n'affectent pas la position du récepteur de la même manière. Pour un positionnement PPP, l'erreur du satellite est directement reportée sur l'erreur du récepteur. Cet effet est à nuancer puisque le récepteur utilise plusieurs satellites pour se positionner. Ainsi, l'erreur sur sa position sera réduite. En ce qui concerne le positionnement DGPS, une erreur radiale δr sur la position du satellite entraîne une erreur δb sur la ligne de base b mesurée. Cette erreur est calculée avec la formule suivante :

$$\frac{\delta b}{b} = \frac{\delta r}{r}$$

Avec r la distance entre le satellite et le récepteur (mobile).

Afin de calculer la distance séparant le satellite du récepteur, il faut connaître la date d'émission du signal. Celle-ci est donnée par les horloges atomiques des satellites. La justesse de ces horloges est très grande car elle induit une nouvelle imprécision sur la position du récepteur. En effet, l'erreur sur la mesure du temps engendre une erreur sur la distance satellite-récepteur proportionnelle à la vitesse de l'onde émise. Cependant, cette vitesse n'étant pas connue, l'erreur sur la distance est calculée à partir de la vitesse de la lumière notée c . L'erreur sur la distance vaut alors $c \times \Delta t$, avec Δt l'erreur de l'horloge.

Les éphémérides, composées de l'orbite et de l'erreur d'horloge du satellite, sont fournies en temps réel grâce aux messages de navigation ou calculées par des stations au sol. L'International GNSS Service (IGS) fournit plusieurs types d'éphémérides gratuitement

selon différents délais. Ces derniers varient en fonction de la précision des éphémérides. Le choix des éphémérides dépend du positionnement réalisé. Dans le cas du positionnement de l'avion en PPP, il est nécessaire de prendre des éphémérides précises. Afin de limiter au maximum les erreurs liées aux positions ainsi qu'aux horloges des satellites et pouvoir fixer les ambiguïtés, le logiciel GINS utilise les éphémérides calculées par le GRGS. Elles permettent de connaître la position du satellite à moins de 2 cm et sont disponibles deux semaines après le passage du satellite selon Perosanz (2019).

Une troisième erreur est générée par les effets relativistes subis par les orbites et les horloges. Dans le cas des mesures GNSS, la relativité générale (l'écoulement du temps dépend de l'intensité de gravitation) et la relativité restreinte (ni l'espace ni le temps ne sont absolus séparément) impactent les mesures. Pour les orbites des satellites, les effets peuvent être négligés. Cependant, pour les horloges, la relativité restreinte doit être prise en compte. En effet, la modification du temps perçu par l'horloge du satellite peut engendrer une erreur de plusieurs mètres sur le positionnement du récepteur. Pour autant, les effets relativistes sont pris en compte lors de la diffusion des orbites. Ainsi, aucune correction n'est à apporter lors du calcul de la position du récepteur. La relativité générale modifie les signaux. Ils doivent être corrigés pour garder leur caractère euclidien. Cette modification est faite lors de l'émission du signal, ce qui signifie qu'aucune correction n'est à apporter. De plus, la fréquence du signal est altérée par la relativité générale. Cependant, la modification étant prise en compte lors de la définition du signal, aucune correction n'est à apporter.

Les dernières erreurs produites lors de l'émission du signal sont liées à l'émetteur ainsi qu'à l'antenne émettrice. Une première erreur est provoquée par la variation du centre de phase de l'antenne. En effet, lors du calcul, les coordonnées utilisées correspondent au centre des masses du satellite. Pour autant, le signal émis par le satellite démarre du centre de phase. Par conséquent, la distance calculée correspond à l'écart entre le récepteur et le centre de phase du satellite et non à la distance entre le centre des masses du satellite et le récepteur. L'écart entre ces deux centres engendre une erreur dans le positionnement du récepteur. Afin de quantifier cette erreur, il est nécessaire de déterminer la position du centre de phase du satellite. Cette dernière n'est pas fixe, elle varie au cours du temps. Par ailleurs, il est possible de décomposer cet écart en deux vecteurs. Un premier fixe, appelé Phase Center Offset Vector (PCO), qui correspond au vecteur allant du centre des masses du satellite à la position moyenne du centre de phase. Le second vecteur est variable et va du centre de phase moyen jusqu'au centre de phase du signal émis. Il dépend de l'angle entre

le nadir au niveau du centre de phase du satellite et le récepteur GNSS. L'ensemble de ces éléments est représenté sur la figure ci-dessous. Afin d'éliminer l'erreur liée à l'écart entre le centre de phase du signal et le centre des masses du satellite, l'IGS fournit des fichiers ANTEX. Ils permettant de quantifier cet écart en fonction de l'azimut du satellite pour un grand nombre d'antennes. Ces fichiers contiennent l'ensemble des antennes présentes sur les satellites des constellations utilisées pour le positionnement GNSS.

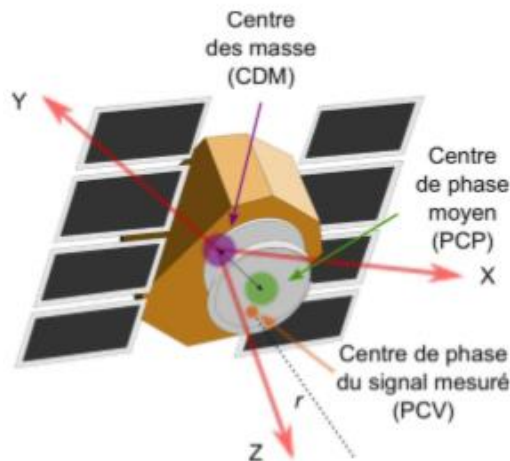


Schéma de l'écart entre le centre de phase et le centre des masses, d'après Bosser (2013)

La seconde erreur est due à la conception de l'émetteur ainsi qu'à ses différents composants. En effet, les émetteurs produisent un biais hardware propre à chacun. Ce biais fausse la mesure et provoque donc des erreurs dans le positionnement GNSS.

Erreurs liées à la propagation du signal

Une fois le signal émis par le satellite, il traverse l'atmosphère jusqu'à atteindre le récepteur. Lors de cette traversée, des éléments perturbent le signal et modifient notamment sa vitesse. Cependant, la détermination de la distance entre le récepteur et le satellite repose sur l'hypothèse que la vitesse de propagation de l'onde émise par le satellite est constante et égale à la célérité de la lumière. Par conséquent, des erreurs apparaissent lors de ce calcul. Les deux couches perturbant le plus le signal sont la ionosphère et la troposphère.

La ionosphère est la partie haute de l'atmosphère, située entre 50 et 1000 km. Elle est constituée de gaz ionisé rendant le milieu dispersif. La modification de la propagation du signal dans ce milieu dépend de sa longueur d'onde. Cette variation est appelée retard ionosphérique et correspond à l'allongement ou au rétrécissement du temps de parcours de l'onde entre le satellite et le récepteur. Le retard ionosphérique dépend de l'agitation ionosphérique, de la fréquence de l'onde et de l'élévation du satellite. De plus, l'agitation

ionosphérique varie en fonction de la latitude du point (plus agitée à l'équateur), de l'activité solaire, de la période de l'année et du moment auquel sont acquises les données (jour/nuit). La ionosphère altère différemment la phase et le code des signaux émis par le satellite. En effet, lors de la réception, un retard est observé sur le code tandis que la phase présente une accélération. Les valeurs de ces écarts sont très variables et se situent, dans la plupart des cas, entre 1 et 50 mètres sur la distance satellite-récepteur calculée. Il est donc important de corriger cette erreur afin de réaliser un positionnement précis. Le logiciel GINS utilise la combinaison iono-free à partir des mesures sur code et sur phase pour corriger cette erreur.

La seconde partie de l'atmosphère qui altère le signal est la troposphère. D'après Teunissen and al. (2017), elle correspond à la partie basse de l'atmosphère comprise entre la surface du globe et 10-20 km selon les régions du monde. La troposphère altère la vitesse du signal lors de sa traversée, cet effet est appelé retard troposphérique. Il est défini comme la différence entre le trajet optique suivi par l'onde lors de sa propagation et la distance géométrique séparant l'émetteur du récepteur. Contrairement au retard ionosphérique, la valeur du retard troposphérique est de même signe pour le code et la phase. En effet, tous deux sont retardés lors de propagation du signal. Ce retard est dû à la pression partielle air sec, à la pression partielle vapeur d'eau, à la température et l'élévation du satellite. Cependant, pour une élévation fixée, la valeur du retard varie peu. Elle vaut environ 2.40 m au zénith du récepteur, une vingtaine de mètres pour une élévation de 5° et plus d'une centaine de mètres à l'horizon. Ce retard modifie principalement la composante verticale de la position du récepteur. Si le satellite se trouve entre le zénith et 15° d'élévation, la verticale est impactée à hauteur de 3 à 4 m. Pour des satellites de plus faible élévation, l'erreur sur la verticale se situe entre 6 et 7 m. Selon Loyer (2017), GINS utilise différents modèles pour corriger l'erreur troposphérique dont certains utilisant des observations météorologiques.

Enfin, un dernier phénomène nommé phase wind up influence la propagation du signal. Il dépend de l'orientation relative de l'émetteur (satellite) et du récepteur. En effet, un changement de l'orientation relative, dû au mouvement de l'émetteur et/ou du récepteur, engendre un changement dans l'observation de la phase. Cela est causé par la polarisation circulaire de l'onde portant les signaux qui correspond à la direction électromagnétique de l'onde et dépend de la phase. Les ondes GNSS ont une polarisation circulaire droite provenant du sens de rotation des vecteurs électromagnétiques lors de la propagation de l'onde. Le changement dans l'observation de la phase dû à cet effet est très peu significatif pour un traitement différentiel et peut être négligé. Par ailleurs, pour le positionnement non

différentiel, ce phénomène est à prendre en compte puisqu'il peut induire une erreur décimétrique sur le positionnement. Selon Loyer (2017), GINS utilise l'algorithme décrit dans l'article de Jan Kouba : A guide to using International GPS Service (IGS) Products.

Erreurs produites lors de la réception du signal

Pour finir, le signal est perçu par le récepteur GNSS. Lorsque les ondes émises sont proches du récepteur, les surfaces des éléments à proximité peuvent modifier leur trajectoire. Le récepteur capte des signaux en provenance directe du satellite, mais également des signaux déviés par les éléments qui l'entourent. Ce phénomène de trajet multiple provoque une erreur difficilement quantifiable. D'après Bosser (2013), un certain nombre de précautions sont à prendre en compte afin de limiter cette erreur.

La deuxième erreur produite lors de la réception du signal provient du centre de phase de l'antenne. Cette erreur est similaire à l'erreur de phase de l'antenne émettrice du satellite. En effet, dans le calcul du positionnement GNSS, le point déterminé est appelé Antenna Reference Point (ARP) et correspond à un élément fixe de l'antenne.

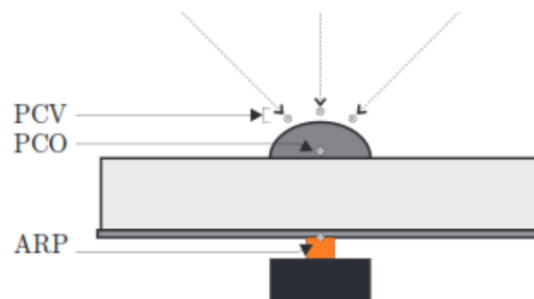


Schéma d'une antenne réceptrice, d'après Bosser (2013)

Ainsi, la distance mesurée est l'écart entre l'antenne émettrice et l'ARP visible sur la figure ci-dessous. Or, le signal est perçu par l'antenne au niveau du Phase Center Variation (PCV). Identiquement à l'antenne du satellite, ce point varie dans l'espace, notamment en fonction de l'élévation du satellite. Cette variation crée une erreur de centre de phase sur la mesure GNSS. Cet écart est composé d'un vecteur fixe allant de l'ARP jusqu'au PCO et d'un vecteur variable formé par le PCO et le PCV. Pour éliminer cette erreur, les fichiers ANTEX fournissent le décalage du centre de phase pour un grand nombre d'antennes du commerce. Il est aussi possible de calibrer les antennes afin de connaître les corrections à apporter. GINS utilise les fichiers de l'IGS pour corriger les erreurs de phase du satellite et du récepteur.

L'horloge du récepteur provoque également une erreur dans le positionnement. Cette horloge permet de mesurer la date de réception du signal. La date d'émission étant connue, il est alors possible de calculer le temps de trajet du signal qui sert ensuite à déterminer la distance satellite-récepteur. Cependant, la valeur fournie par l'horloge est entachée d'une erreur variant en fonction du récepteur qui engendre une modification de la distance satellite-récepteur proportionnelle à la vitesse du signal. Cette modification crée une erreur sur le positionnement, identique à l'erreur provoquée par l'horloge du satellite. Par ailleurs, la précision de l'horloge du récepteur est beaucoup plus faible que celle de l'horloge du satellite, l'erreur engendrée est alors plus importante. Cette erreur étant trop importante pour un positionnement centimétrique, la variable correspondant au temps de trajet du signal est intégrée au calcul du positionnement grâce à une quatrième inconnue. Cette particularité impose l'utilisation d'au moins quatre satellites pour réaliser le positionnement GNSS.

De plus, les mesures de l'horloge du récepteur subissent les effets relativistes énoncés dans la partie II.2.2.1. Ils sont dus au mouvement du récepteur provoqué par la rotation de la Terre durant la propagation du signal. Cette modification de la mesure du temps est appelée effet de Sagnac d'après Bossert (2013). Elle engendre une erreur sur la distance satellite-récepteur d'environ 30 m. Par ailleurs, la plupart des logiciels, y compris GINS, réalisant les traitements de positionnement GNSS prennent en compte la rotation de la Terre afin d'éliminer cette erreur.

Pour finir, les récepteurs créent un biais hardware venant perturber les mesures GNSS. Ce biais est provoqué par les mêmes phénomènes que le biais hardware de l'émetteur.

Autres formes d'erreurs

Les derniers éléments pouvant altérer les mesures sont liés à la déformation de la Terre. La croûte terrestre se déforme et se déplace sous l'effet de certains phénomènes. Lors des acquisitions GNSS, deux déformations sont susceptibles de perturber les mesures.

L'attraction gravitationnelle créée par les astres, plus particulièrement par la lune et le soleil, provoque une déformation de la croûte terrestre. Cette déformation crée des marées terrestres comparables aux marées océaniques. En effet, le déplacement de la croûte terrestre est composé d'une partie permanente et d'une partie périodique se déroulant sur 24 heures. Selon Morel (2019 b), ce déplacement est de 12 cm en moyenne sur la composante verticale et peut atteindre 30 cm. Sur la composante horizontale, le déplacement vaut en moyenne 5

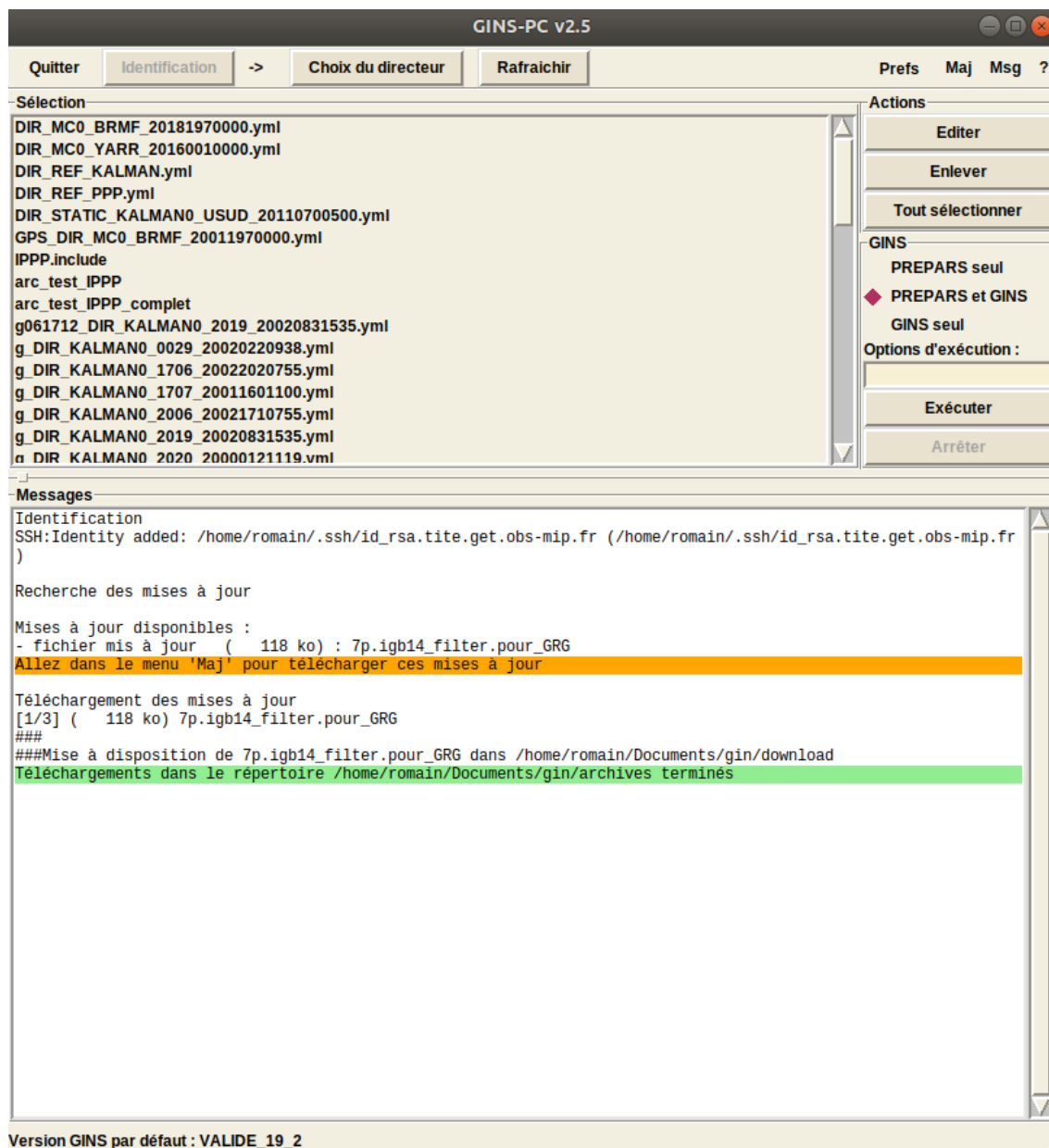
cm. Dans le but de le quantifier, des stations GNSS au sol mesurent leur déplacement en fonction du temps. L'ensemble de ces mesures servent à créer des modèles afin d'éliminer les erreurs de positionnement liées à la déformation de la croûte terrestre.

La seconde déformation de la croûte terrestre est liée aux marées océaniques. Les mouvements d'eau causés par ces marées déplacent la croûte terrestre. Ce phénomène est appelé surcharge océanique. Il est de plus faible ampleur que la marée terrestre, mais présente une variabilité spatio-temporelle plus importante. En effet, la valeur du déplacement dépend de la proximité des terres avec les océans et du coefficient de marée. Le déplacement provoqué par la surcharge océanique possède un caractère périodique lié aux marées océaniques. Des observations ont été réalisées afin de définir des modèles permettant de réduire les erreurs de positionnement GNSS.

Ces deux phénomènes n'impactent pas les mesures réalisées pour calculer la trajectoire de l'avion en PPP puisque ce dernier ne se trouve pas sur la croûte terrestre mais dans les airs. Dans le cas d'un positionnement DGPS de l'avion, ces erreurs impactent les bases au sol et doivent alors être corrigées.

Annexe 2

Interface du logiciel GINS



Annexe 3

Fichier directeur du traitement IPPP du vol 190830

```

|include      : DIR_REF_KALMAN.yml
date         :
arc_start   : [25443, 56150.0000000]
arc_stop    : [25443, 61649.0000000]
model       :
environment :
  earth_orientation_parameters : pole/nominal_NRO
  gnss_antenna                 : ANTEX/igs14.atx
  gnss_clock                   : horloges/GRG/default
  ionex_files                  : ionosphere/default
  apriori_parameters           : EXE_PPP/valap_cinem
  gnss_preprocessing_options   : EXE_PPP/options_prairie_cinem
  macromodel                   : macromod/nominal
object      :
  station :
    station_coordinates : .temp.gin/data/stations/XYZ_2019_25443_RINEX_0
    ocean_tide_loading  : unused
    atmosphere_loading  : unused
  observation :
    removal :
      minimum_gnss_data_per_pass : 0
      nsigma_threshold           : 5
      first_iteration_residual_threshold : 0
      minimum_elevation_threshold : 0
      simulation_stepsize        : 1
    interobject_data :
      - file : orbites/GRG
        name : GNSS_ephemeris
        objects : [GNSS_GPS, unknown]
        type : fixed_ephemeris
        use_earth_ephemerides : yes
      - file : .temp.gin/TP/TP_EXE_PPP/20190830.190
        name : GNSS_measurement
        objects : [GNSS_GPS, station]
        type : undifferentiated_gnss
        tropospheric_correction : [wet, vmf1, gpt2]
        nb_adjusted_biases_per_day_per_station : 12
        min_elevation_phase : 10
        min_elevation_range : 10
        apriori_obs_stddev : 0.05
        apriori_model_stddev : 5.0
        gps_phase_ponderation_law : [0.0030, 0.15, 1.0]
        gps_code_ponderation_law : [0.3000, 0.15, 1.0]
        glo_phase_ponderation_law : [0.0060, 0.15, 1.0]
        glo_code_ponderation_law : [0.6000, 0.15, 1.0]
        gal_phase_ponderation_law : [0.0020, 0.15, 1.0]
        gal_code_ponderation_law : [0.2000, 0.15, 1.0]
        gnss_options :
          phase_observations_process : yes
          clock_parameters_globally_solved : yes
        observation_options : [initialize_from_clock_file, constellation_as_time_reference]
        phase_nsigma_threshold : 0
        code_nsigma_threshold : 0
        max_iter_gps_removal : 2
        phase_rms_threshold_after_iter_max : 0
        code_rms_threshold_after_iter_max : 0
        minimum_number_observations_per_pass : 0
  parameter :
    algorithm :
      type : kalman_qr
      kalman_options :
        state_reduction : yes
        forward_backward : yes
      allow_elim_at_convergence : yes
    adjustment_parameters :
      stations :
        adjustment_type : [phase_center, all_stations]
        coordinates : cartesian_xyz
        adjustment_frequency : [0, 0, 0, 1]
  user_extension :
    userext_addition :
      - "GPS_HAUTE_FREQ_2019"
      - "PRINT_SOLUTION_FILE"
      - "GPS_POSITION_INCONNUE"
      - "GPS_HOR_INTERP00030"

```

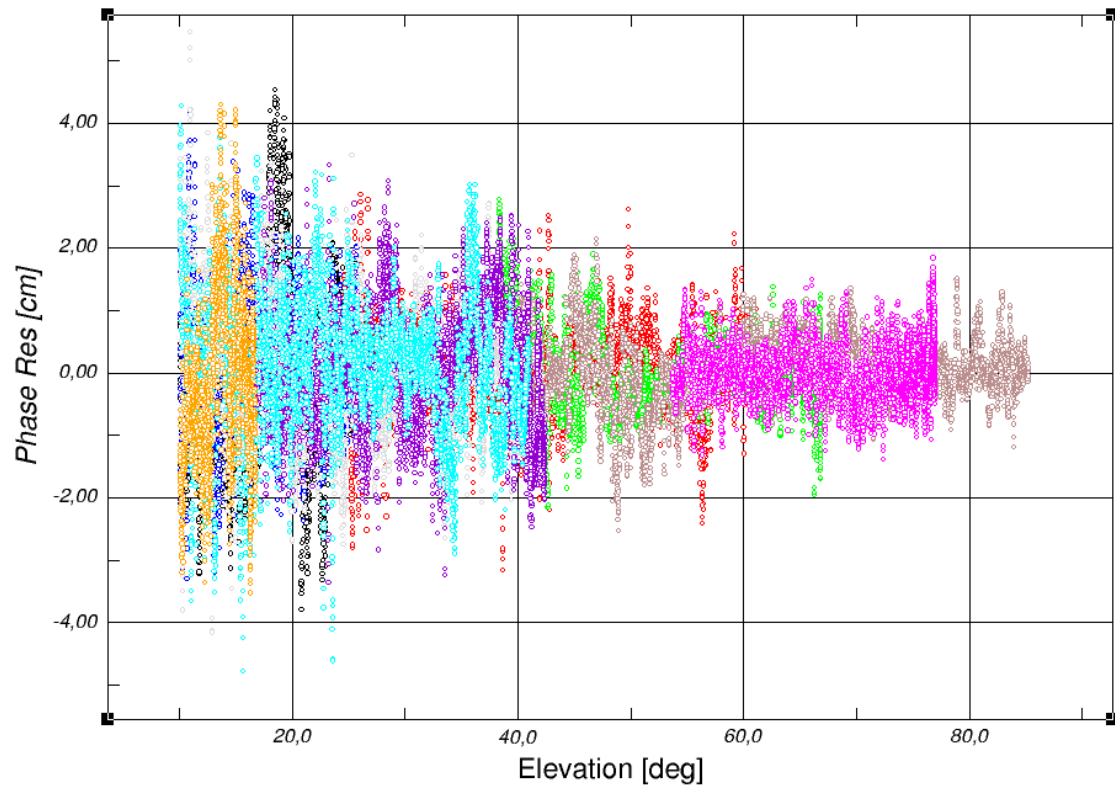

Annexe 6

Extrait du fichier Statistiques du traitement IPPP du vol 190830

11 2.5443650220E+04 3.162E+04 0.02892 2019	0.004769750	GP01	5.794	32.399	9999999	138.336	26.815	1.000	0.645	5.149	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 2.009E+04 0.03389 2019	-0.009387124	GL02	64.546	42.356	9999999	39.596	55.501	2.000	0.041	2.830	1	25443	56160.000	RLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 8.925E+04 0.03320 2019	-0.000302125	GP03	51.379	35.856	9999999	71.483	61.391	3.000	0.398	2.657	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 5.085E+04 0.04215 2019	0.020442009	GP06	55.196	292.161	9999999	305.443	38.276	4.000	0.377	3.760	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 5.430E+04 0.02453 2019	0.006655995	GP09	12.700	344.338	9999999	206.576	40.241	5.000	0.049	3.606	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356159
11 2.5443650220E+04 0.000E+00 0.02522 2019	0.743579756	GP11	-14.899	22.040	9999999	158.004	9.465	6.000	0.000	13.631	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 5.398E+04 0.03303 2019	-0.010389268	GP17	25.214	320.892	9999999	247.178	40.056	7.000	1.015	3.620	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 5.806E+04 0.03937 2019	-0.009039003	GP19	36.385	312.324	9999999	268.514	42.376	8.000	0.697	3.457	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 5.553E+04 0.03272 2019	0.004633531	GP22	39.022	54.404	9999999	84.773	40.937	9.000	0.943	3.556	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 1.025E+05 0.03113 2019	0.001474157	GP23	36.757	7.506	9999999	157.658	72.481	10.000	0.921	2.447	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 1.729E+04 0.03358 2019	-0.018280204	GP31	53.204	107.108	9999999	41.720	16.716	11.000	1.560	8.007	1	25443	56160.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650220E+04 3.162E+00 0.00000 2019	0.585517038	GP01	5.794	32.399	9999999	138.336	26.815	0.000	0.000	5.149	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 2.009E+00 0.00000 2019	1.704935301	GL02	64.546	42.356	9999999	39.596	55.501	0.000	0.000	2.830	2	25443	56160.000	RPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 8.925E+00 0.00000 2019	-1.095947076	GP03	51.379	35.856	9999999	71.483	61.391	0.000	0.000	2.657	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 5.085E+00 0.00000 2019	0.323861461	GP06	55.196	292.161	9999999	305.443	38.276	0.000	0.000	3.760	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 5.430E+00 0.00000 2019	-0.487817589	GP09	12.700	344.338	9999999	206.576	40.241	0.000	0.000	3.606	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 0.000E+00 0.00000 2019	-1.017922845	GP11	-14.899	22.040	9999999	158.004	9.465	0.000	0.000	13.631	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 5.398E+00 0.00000 2019	0.866760984	GP17	25.214	320.892	9999999	247.178	40.056	0.000	0.000	3.620	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 5.806E+00 0.00000 2019	-0.556979615	GP19	36.385	312.324	9999999	268.514	42.376	0.000	0.000	3.457	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 5.553E+00 0.00000 2019	0.392148297	GP22	39.022	54.404	9999999	84.773	40.937	0.000	0.000	3.556	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 1.025E+01 0.00000 2019	-0.490622431	GP23	36.757	7.506	9999999	157.658	72.481	0.000	0.000	2.447	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650220E+04 1.729E+00 0.00000 2019	0.679290101	GP31	53.204	107.108	9999999	41.720	16.716	0.000	0.000	8.007	2	25443	56160.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 3.161E+04 0.02892 2019	0.005729973	GP01	5.787	32.399	9999999	138.340	26.808	1.000	0.645	5.150	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 2.009E+04 0.03389 2019	-0.015629061	GL02	64.545	42.373	9999999	39.603	55.493	2.000	0.041	2.830	1	25443	56161.000	RLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 8.924E+04 0.03319 2019	0.004511964	GP03	51.376	35.864	9999999	71.490	61.384	3.000	0.398	2.657	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 5.087E+04 0.04214 2019	0.021338563	GP06	55.198	292.171	9999999	305.442	38.283	4.000	0.377	3.759	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 5.432E+04 0.02454 2019	0.008818723	GP09	12.707	344.339	9999999	206.578	40.249	5.000	0.049	3.606	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356159
11 2.5443650231E+04 0.000E+00 0.02522 2019	0.753998987	GP11	-14.905	22.042	9999999	158.004	9.458	6.000	0.000	13.640	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 5.397E+04 0.03302 2019	-0.010460924	GP17	25.207	320.893	9999999	247.170	40.051	7.000	1.015	3.621	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 5.806E+04 0.03937 2019	-0.010848261	GP19	36.379	312.327	9999999	268.504	42.374	8.000	0.697	3.458	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 5.552E+04 0.03272 2019	0.000537779	GP22	39.017	54.408	9999999	84.778	40.931	9.000	0.943	3.556	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 1.025E+05 0.03113 2019	-0.000308178	GP23	36.763	7.510	9999999	157.640	72.487	10.000	0.921	2.447	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 1.729E+04 0.03358 2019	-0.016428303	GP31	53.206	107.117	9999999	41.714	16.714	11.000	1.560	8.008	1	25443	56161.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650231E+04 3.161E+00 0.00000 2019	0.591807257	GP01	5.787	32.399	9999999	138.340	26.808	0.000	0.000	5.150	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 2.009E+00 0.00000 2019	1.771891627	GL02	64.545	42.373	9999999	39.603	55.493	0.000	0.000	2.830	2	25443	56161.000	RPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 8.924E+00 0.00000 2019	-1.073435705	GP03	51.376	35.864	9999999	71.490	61.384	0.000	0.000	2.657	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 5.087E+00 0.00000 2019	0.333453603	GP06	55.198	292.171	9999999	305.442	38.283	0.000	0.000	3.759	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 5.432E+00 0.00000 2019	-0.404054996	GP09	12.707	344.339	9999999	206.578	40.249	0.000	0.000	3.606	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 0.000E+00 0.00000 2019	-1.090903610	GP11	-14.905	22.042	9999999	158.004	9.458	0.000	0.000	13.640	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 5.397E+00 0.00000 2019	0.882886101	GP17	25.207	320.893	9999999	247.170	40.051	0.000	0.000	3.621	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 5.806E+00 0.00000 2019	-0.591891699	GP19	36.379	312.327	9999999	268.504	42.374	0.000	0.000	3.458	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 5.552E+00 0.00000 2019	0.347054988	GP22	39.017	54.408	9999999	84.778	40.931	0.000	0.000	3.556	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 1.025E+01 0.00000 2019	-0.479098961	GP23	36.763	7.510	9999999	157.640	72.487	0.000	0.000	2.447	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650231E+04 1.729E+00 0.00000 2019	0.724841703	GP31	53.206	107.117	9999999	41.714	16.714	0.000	0.000	8.008	2	25443	56161.000	GPI12	P0000000000
11 2.5443650243E+04 3.160E+04 0.02892 2019	0.002436582	GP01	5.780	32.400	9999999	138.343	26.801	1.000	0.645	5.151	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650243E+04 2.009E+04 0.03388 2019	-0.014672350	GL02	64.544	42.389	9999999	39.609	55.485	2.000	0.041	2.831	1	25443	56162.000	RLI12	P2544356131
11 2.5443650243E+04 8.923E+04 0.03319 2019	0.000981629	GP03	51.372	35.873	9999999	71.497	61.377	3.000	0.398	2.658	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650243E+04 5.088E+04 0.04214 2019	0.020170987	GP06	55.200	292.181	9999999	305.441	38.290	4.000	0.377	3.759	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650243E+04 5.433E+04 0.02454 2019	0.008073099	GP09	12.714	344.340	9999999	206.580	40.257	5.000	0.049	3.605	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356159
11 2.5443650243E+04 0.000E+00 0.02522 2019	0.749011833	GP11	-14.912	22.043	9999999	158.005	9.451	6.000	0.000	13.649	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650243E+04 5.396E+04 0.03301 2019	-0.009487089	GP17	25.201	320.895	9999999	247.162	40.046	7.000	1.015	3.621	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356131
11 2.5443650243E+04 5.806E+04 0.03358 2019	-0.010446217	GP19	36.373	312.330	9999999	268.493	42.372	8.000	0.697	3.458	1	25443	56162.000	GLI12	P2544356131

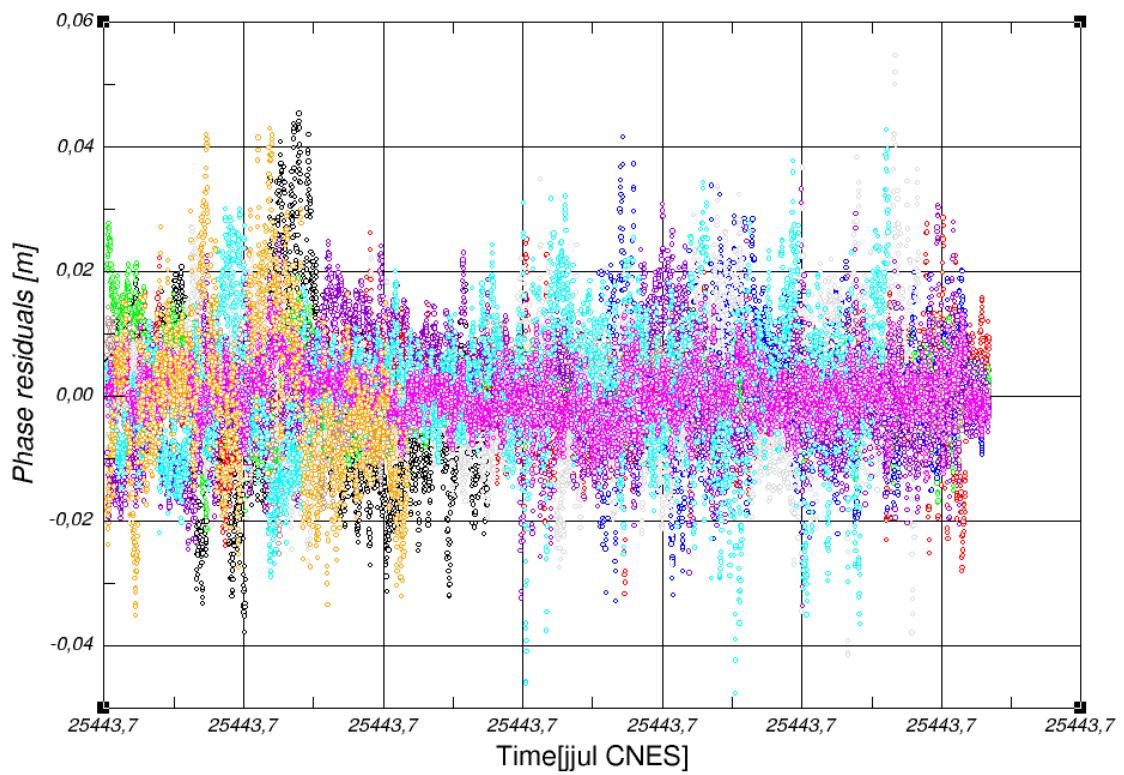
Annexe 7

Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase en fonction de l'élévation des satellites



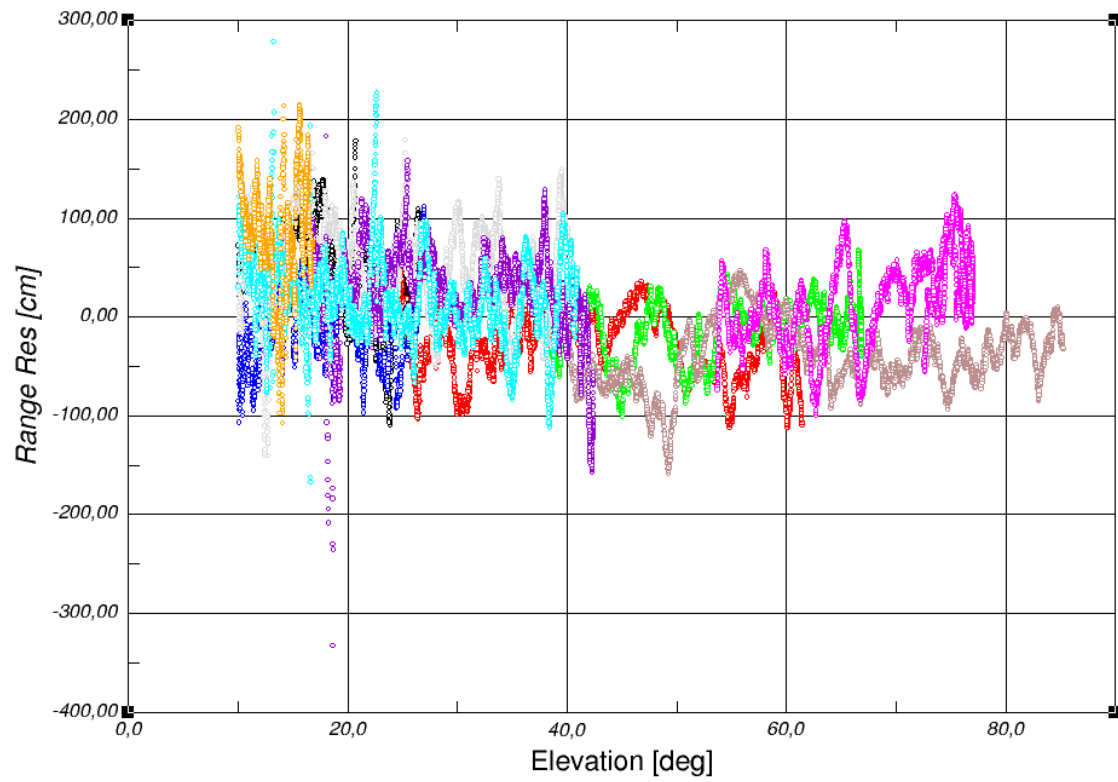
Annexe 8

Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase en fonction du temps



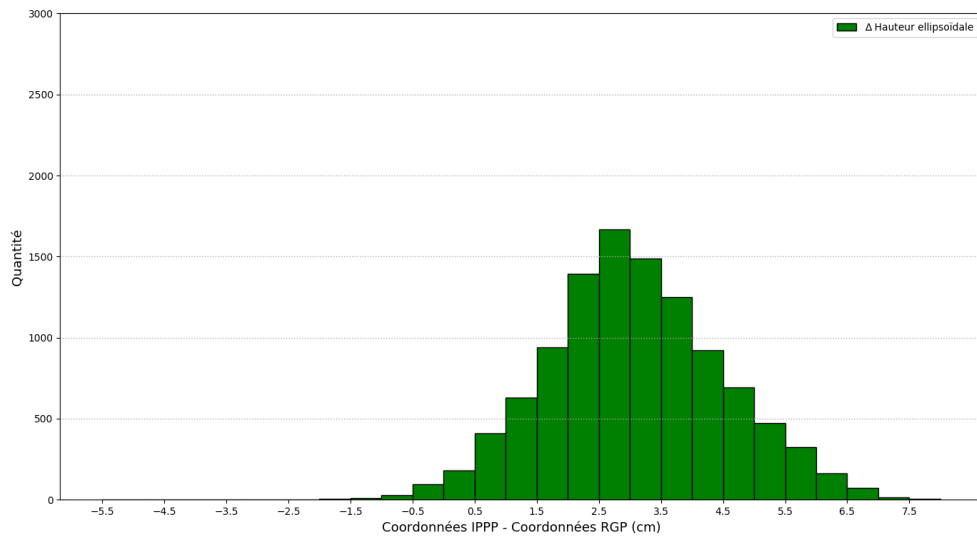
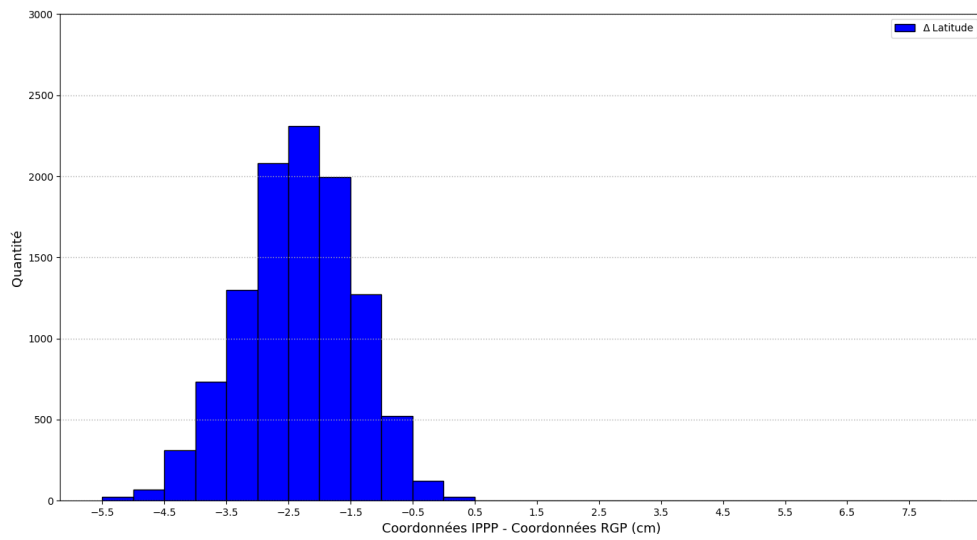
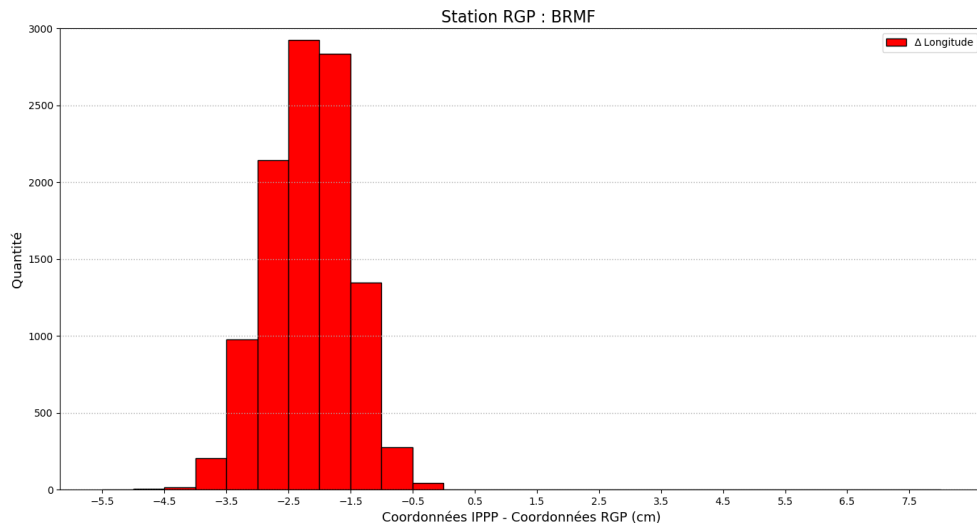
Annexe 9

Graphique représentant les résidus sur la mesure de code en fonction de l'élévation des satellites



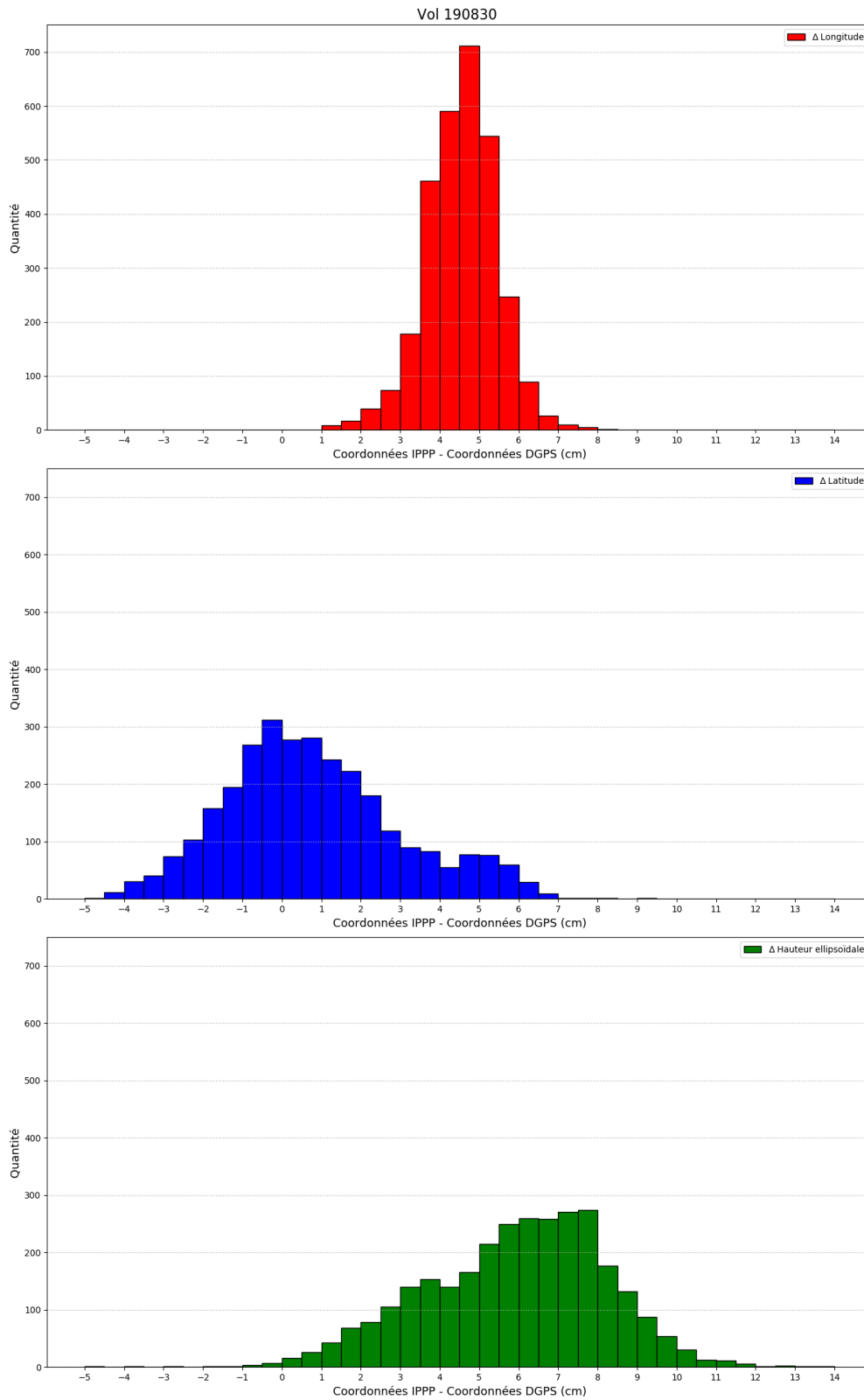
Annexe 10

Histogrammes des écarts obtenus lors de l'expérience utilisant une station du RGP



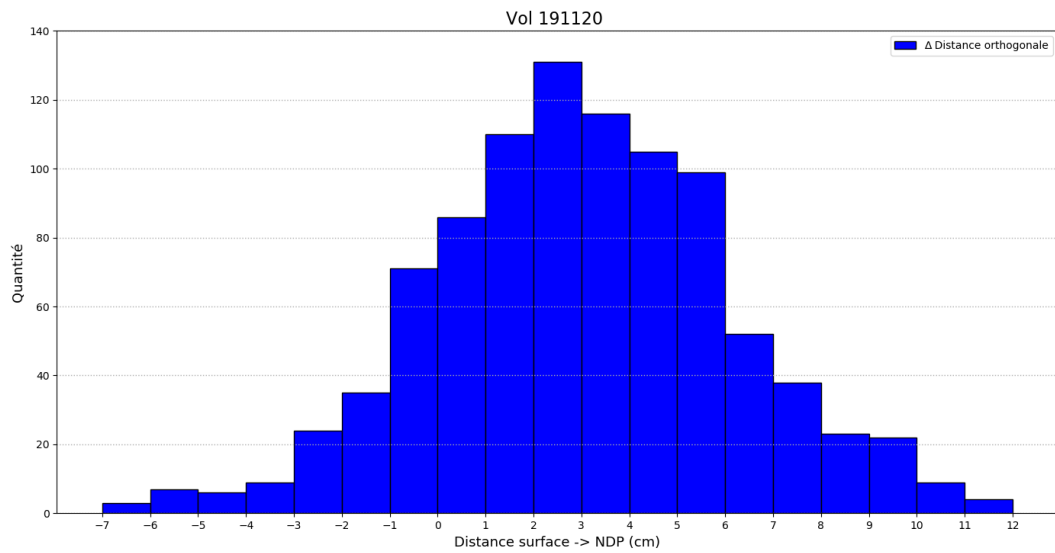
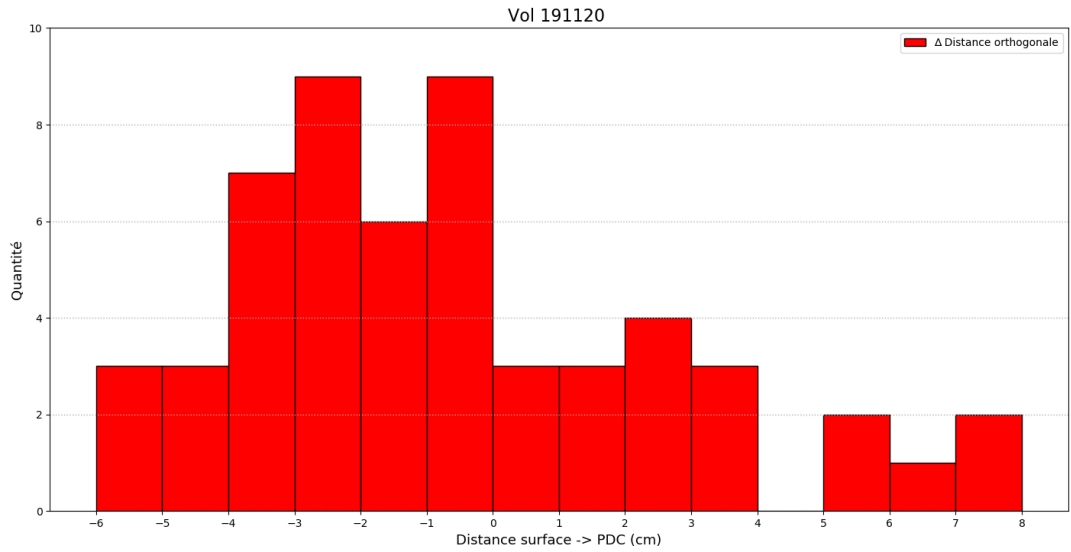
Annexe 11

Histogrammes des écarts obtenus lors de l'expérience du vol 190830



Annexe 12

Histogrammes des écarts obtenus lors de l'expérience du vol 191120



Liste des figures

Figure 1 : Extrait des missions satellitaires (JPL, 2020).....	6
Figure 2 : Dispositif LRA, (CNES, 2020)	14
Figure 3 : Schématisation d'une mesure de l'interféromètre radar, (CNES, 2020).....	16
Figure 4 : Système KaRIn embarqué par le satellite SWOT, (JPL.NASA, 2020)	16
Figure 5 : Schéma des fauchées d'observation de l'interféromètre radar KaRIn, (CNES, 2020).....	17
Figure 6: Composantes de la Sea Surface Height.....	20
Figure 7 : Schéma du fonctionnement du système LiDAR aéroporté, d'après Ternon (2019)	22
Figure 8 : LiDAR Leica ALS60, d'après Leica Geosystems (2008)	22
Figure 9 : Fréquence de balayage en fonction du champ de vision, d'après Leica Geosystems (2008).....	23
Figure 10 : Précision des points obtenus à partir des mesures du LiDAR Leica ALS60 en fonction de la hauteur de vol, d'après Leica Geosystems (2008).....	24
Figure 11 : Représentation de la trajectoire de l'avion lors du vol 190830	27
Figure 12 : Représentation de la trajectoire de l'aéronef lors du vol 191120 durant l'acquisition du LiDAR.....	28
Figure 13 : Écarts entre les coordonnées de la station BRMF calculées avec le logiciel GINS et celles fournies par le RGP	38
Figure 14 : Écarts entre les coordonnées de la station BRMF calculées en PPP et celles fournies par le RGP	38
Figure 15 : Comparaison des coordonnées IPPP et DGPS pour le vol 190830	39
Figure 16 : Comparaison des coordonnées PPP et DGPS pour le vol 190830 pendant l'acquisition du LiDAR.....	40
Figure 17 : Dispositif mis en place pour le test de précision IPPP	41
Figure 18 : Différence des distances calculées en IPPP et DGPS avec la distance mesurée	42
Figure 19 : Représentations de l'ensemble des nuages de points (en haut) et d'une portion des nuages de points (en bas) du vol 191120 à partir du logiciel CloudCompare	43
Figure 20 : Représentation de la perception du signal réfléchi par la surface de l'océan, d'après EUMETSAT (2018)	46
Figure 21 : Illustration du traitement SAR des mesure de l'altimètre, d'après CNES (2019)	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Indicateurs statistiques calculés sur les écarts obtenus avec la station BRMF	38
Tableau 2 : Indicateurs statistiques sur les écarts obtenus lors de l'expérience sur le vol 190830...	40
Tableau 3 : Indicateurs statistiques sur les écarts obtenus lors de la dernière expérience	41
Tableau 4 : Indicateurs statistiques sur les écarts calculés à partir des nuages de points	44

Détermination de la hauteur d'eau des océans à partir d'un capteur LiDAR aéroporté dans le cadre de la calibration / validation de l'altimètre SWOT.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2020

RESUME

Dans la cadre de la mission SWOT, l'un des objectifs du satellite sera de déterminer la sea surface height (SSH) à partir de mesures. Ce terme représente la hauteur de la surface des océans par rapport à un ellipsoïde de référence. Durant la première phase de l'orbite, une phase de calibration et de validation des mesures du satellite SWOT aura lieu à partir de campagnes aéroportées et terrains (LIDAR, nappe GPS, ...).

L'utilisation de la méthode de positionnement GNSS IPPP, dans le traitement de données LiDAR aéroporté, a permis de s'affranchir des contraintes imposées par la méthode DGPS initialement utilisée. Les résultats de SSH obtenus lors de ces travaux permettent d'envisager l'utilisation des mesures LiDAR dans la calibration et la validation des mesures du satellite SWOT. La poursuite de cette étude et surtout la réalisation des comparaisons de SSH proposées dans ce mémoire permettront de confirmer l'intérêt des mesures LiDAR. En outre, elles serviront à valider une méthode de comparaison des données LiDAR et satellitaire de la surface des océans.

Mots clés : SWOT, LiDAR aéroporté, Sea Surface Height, IPPP (PPPAR).

SUMMARY

As part of the SWOT mission, one of the aims of the satellite will be to determine the sea surface height (SSH) from measurements. This term represents the height of the ocean surface relative to an ellipsoid of reference. During the first phase of the orbit, a calibration and validation phase of measurements of the SWOT satellite will be make using airborne and ground campaigns (LIDAR, GPS slick, etc.).

The IPPP GNSS positioning method used to process airborne LiDAR data has allowed to overcome the constraints imposed by the DGPS method initially used. The SSH results obtained during this work make it possible to envisage the use of LiDAR measurements in the calibration and validation of SWOT satellite. The continuation of this study and especially the SSH comparisons proposed in this paper will confirm the interest of LiDAR measurements. In addition, they will benefit to validate a method for comparing LiDAR and satellite data of the ocean surface.

Key words : SWOT, airborne LiDAR, sea surface height, IPPP (PPPAR).