



HAL
open science

Etalonnage du futur altimètre spatial NASA/CNES SWOT LiDAR aéroporté : trajectographie iPPP et analyse du champs de vagues

Laëtitia Roguet

► **To cite this version:**

Laëtitia Roguet. Etalonnage du futur altimètre spatial NASA/CNES SWOT LiDAR aéroporté : trajectographie iPPP et analyse du champs de vagues. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2022. dumas-04053918

HAL Id: dumas-04053918

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04053918>

Submitted on 31 Mar 2023

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

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

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

Laëtitia ROGUET

**Etalonnage du futur altimètre spatial NASA/CNES SWOT LiDAR aéroporté :
trajectographie iPPP et analyse du champs de vagues**

Soutenu le 8 Septembre 2022

JURY

Monsieur Stéphane DURAND
Monsieur Laurent FROIDEVAL
Madame Joëlle NICOLAS-DUROY

Président du jury
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

Au cours de mon travail de fin d'études, j'ai été amenée à échanger avec différentes personnes pour répondre à mon sujet, lesquelles je tiens à remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier Laurent Froideval pour m'avoir permis d'intégrer le laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) de Caen ; m'avoir accompagnée, conseillée et suivie tout au long de mon TFE. Je le remercie aussi, car j'ai pu grâce à lui découvrir le domaine de l'altimétrie spatiale.

Ensuite, je souhaite remercier Joëlle Nicolas-Duroy pour m'avoir suivie sur ce TFE, su se rendre disponible, et pour ses précieux conseils.

Merci à Edward Salameh qui m'a beaucoup aidée sur la comparaison des mesures LiDAR avec les mesures de Sentinel-3A et a pris le temps de répondre à mes interrogations.

Je souhaite remercier Felix Perosanz et Hugo Meunier pour m'avoir aidé sur les traitements iPPP du vol au-dessus de Rouen et sur la compréhension des différents paramètres de GINS-PC.

Je tiens aussi à remercier Matthias Raynal pour avoir pris le temps de nous expliquer, à Edward et moi, l'utilisation du JupyterHub du CNES et l'accès aux différentes données de Sentinel-3A par le JupyterHub.

Je remercie Olivier Monfort, qui m'a répondu sur mes questions et mes demandes au sujet des traitements DGPS et des traitements des données LiDAR, pour le temps qu'il a pris afin de répondre à mes différentes requêtes.

Je souhaite aussi remercier Nicolas Picot et Pascal Bonnefond pour leur implication que ce soit sur le traitement iPPP ou sur la comparaison des mesures LiDAR avec celles de Sentinel-3A.

Je tiens à remercier Christophe Conessa pour l'aide qu'il a pu m'apporter tout au long de mon TFE, ainsi que Mohamed Oudda et Xavier Pellerin-Lebas pour l'ambiance de travail. Merci aux stagiaires et doctorants du laboratoire M2C pour les repas que nous avons partagés ensemble et les pauses du midi bien distrayantes.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour m'avoir encouragée et accompagnée tout au long de mes études.

Liste des abréviations

CalVal : Calibration and Validation

CNES : Centre national d'études spatiales

CTOH : Centre d'études topographiques de l'océan et de l'hydrosphère

DGPS : Differential Global Positioning System

DORIS : Doppler Orbit determination and Radio-positioning Integrated on Satellite

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ESA : Agence Spatiale Européenne

EUMETSAT : European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites

GNSS : Global Navigation Satellite Systems

GPS : Global Positioning System

GRGS : Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale

IGS : International GNSS Service

IMU : Inertial Measurement unit

IPPP : Integer Precise Point Positioning

KaRIn : Ka-band Radar INterferometer

LiDAR : Light detection and ranging

LRA : Laser Retro-Reflector Array

MASS : Modular aerial Sensing System

PPP : Precise Point Positioning

RGP : Réseau GNSS Permanent

RSG : Remote Sensing Group

SAR : Synthetic-aperture radar

SSH : Sea Surface Height

SWH : Significant Wave Height

SWOT : Surface Water Ocean Topography

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Table des matières	4
Introduction	6
I Les missions altimétriques spatiales jusqu'à SWOT	8
I.1 LES PRECEDENTES MISSIONS ALTIMETRIQUES	8
I.2 LE PRINCIPE DES ALTIMETRES CLASSIQUES VISANT AU NADIR	9
I.2.1 DEFINITION DES HAUTEURS UTILISEES EN ALTIMETRIE SPATIALE.....	9
I.2.2 PRINCIPES DE LA MESURE DES ALTIMETRES NADIR CLASSIQUES.....	10
I.2.3 LES CORRECTIONS A APPLIQUER SUR LES MESURES ALTIMETRIQUES.....	11
I.2.3.1 LES CORRECTIONS DES DELAIS ATMOSPHERIQUES.....	11
I.2.3.2 LES CORRECTIONS GEOPHYSIQUES	12
I.2.3.3 LES CORRECTIONS INSTRUMENTALES.....	12
I.2.3.4 LES CORRECTIONS LIEES A L'ETAT DE MER.....	12
I.2.3.5 LE TRACKING ET LE RETRACKING	13
I.3 LA TECHNOLOGIE DE SWOT	14
I.3.1 L'INNOVATION DU RADAR KARIN	14
I.3.2 LE SYSTEME DE POSITIONNEMENT ET LE RADIOMETRE.....	16
II L'étalonnage de SWOT par LiDAR aéroporté	17
II.1 L'ETALONNAGE DES ALTIMETRES SPATIAUX	17
II.1.1 LES METHODES UTILISEES LORS DES ETALONNAGES	17
II.1.2 L'UTILISATION DU LiDAR AEROPORTE POUR L'ETALONNAGE DE SWOT	18
II.2 LA DETERMINATION DE LA HAUTEUR D'EAU A L'AIDE D'UN LiDAR AEROPORTE	19
II.2.1 PRESENTATION DU LiDAR.....	19
II.2.2 LA REALISATION DES VOLS.....	21
II.3 LES VOLS EFFECTUES DANS LE CADRE DE L'ETALONNAGE DE SWOT	23
II.3.1 VOL AU-DESSUS DE ROUEN	23
II.3.2 VOL AU LARGE DU COTENTIN.....	25
III La trajectographie de l'aéronef	26
III.1 PRINCIPE DU POSITIONNEMENT GNSS	26
III.1.1 PRINCIPE GENERAL	26
III.1.2 LES ERREURS DE POSITIONNEMENT	27
III.2 LES METHODES DE POSITIONNEMENT RELATIF ET ABSOLU UTILISEES	30
III.2.1 LE DIFFERENTIAL GLOBAL POSITIONING SYSTEM.....	30
III.2.2 L'INTEGER PRECISE POINT POSITIONING.....	31
III.3 ANALYSE DES TRAJECTOIRES CALCULEES PAR TRAITEMENT IPPP	32
III.3.1 LE TRAITEMENT DES TRAJECTOIRES	32
III.3.2 ANALYSE DE LA TRAJECTOIRE A PARTIR DE L'EXPERIENCE DES DEUX ANTENNES	35
III.3.3 COMPARAISON DES TRAJECTOIRES IPPP ET DGPS	36
IV Méthode d'étalonnage d'un altimètre spatial à partir de données LiDAR	39
IV.1 LES PRODUITS DE SENTINEL-3A	39

IV.1.1	LES METHODES D'ACQUISITION DE SENTINEL-3A.....	39
IV.1.2	LE TRAITEMENT DES DONNEES DE SENTINEL-3A.....	41
IV.1.3	LES DONNEES DE SENTINEL-3A UTILISEES POUR L'ETALONNAGE.....	43
IV.2	COMPARAISON DES DONNEES LiDAR AVEC LES DONNEES DE SENTINEL-3A	45
IV.2.1	LA FORMATION DES SSH.....	46
IV.2.1.1	LA FORMATION DES SSH MESUREES PAR SENTINEL-3A.....	46
IV.2.1.2	LA FORMATION DE LA SSH A PARTIR DES MESURES LiDAR.....	48
IV.2.2	COMPARAISON DES MESURES SAR AVEC LES MESURES LiDAR.....	50
IV.3	ETALONNAGE A PARTIR DES SPECTRES DIRECTIONNELS DE VAGUES.....	53
Conclusion		54
Bibliographie.....		56
Table des annexes		59
Liste des figures		70
Liste des tableaux		70

Introduction

Les océans recouvrent aujourd'hui 70% de la surface de la terre et contiennent 97% de l'eau présente sur terre. De plus, ils ont un rôle essentiel sur notre vie, puisqu'ils sont une réserve de biodiversité. Ensuite, à travers la circulation de ses eaux, l'océan joue le rôle de régulateur du climat. Cependant, le changement climatique et les activités humaines constituent aujourd'hui une menace sur l'équilibre de ce fonctionnement, entraînant une hausse du niveau des mers et des océans. Le rapport du GIEC de 2021 (Arias et al., 2021) estime que le niveau moyen de la mer pourrait augmenter de 0.77 m d'ici 2100, ce qui aurait de fortes implications pour de nombreuses villes du littoral. Aujourd'hui, il reste beaucoup d'inconnues sur le fonctionnement des océans, et le réchauffement climatique nous impose de les comprendre en suivant et mesurant les phénomènes océaniques et la montée du niveau moyen d'eau. Ce suivi peut être possible grâce à des mesures précises de hauteur de l'océan à grande échelle.

Il existe de nombreuses techniques de mesures de l'océan à petite échelle, telles que : les marégraphes, drones, nappe GPS, etc. Pour connaître l'état de surface de l'eau à grande échelle, l'altimétrie spatiale a été développée ces dernières décennies (International Altimetry Team, 2021). Cette technique consiste en la mesure de la hauteur d'eau significative à l'aide d'un radar embarqué par satellite. Elle permet actuellement de surveiller le niveau moyen des mers, de cartographier les courants marins, mais aussi d'étudier les mouvements océaniques. Ainsi le plus important phénomène El Niño avait pu être observé en 1997 grâce à l'altimètre spatial Topex-Poséidon.

Le prochain satellite d'altimétrie qui sera lancé fin 2022 est issu de la mission Surface Water Ocean Topography (SWOT). Celle-ci est née de la coopération du centre national d'études spatiales (CNES) avec la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Grâce à son orbite répétitive à 21 jours et son radar interférométrique à large fauchée, SWOT sera en mesure d'obtenir une information en 2D des hauteurs d'eau sur la quasi-totalité des océans et de suivre l'évolution spatio-temporelle de l'état de mer, mais pas seulement. En effet, il permettra aussi de couvrir les zones estuariennes et côtières, ce qui constitue un progrès dans l'altimétrie spatiale. Cette spécificité sera un atout dans l'élaboration des futurs plans de prévention des risques naturels prévisibles, puisque le niveau d'eau pourra être suivi dans les zones à risque, telles que les zones inondables et les lieux où l'érosion côtière est importante. De plus, SWOT sera un bon outil pour modéliser et comprendre les différents

phénomènes intervenant au niveau des océans et leurs conséquences sur la hauteur des océans. L'altimètre SWOT permettra d'obtenir la hauteur d'eau des océans à une résolution de 1 km avec une précision de 2 cm. Son excellente résolution lui permettra d'obtenir des mesures d'hauteur d'eau sur les lacs dont la superficie excède les 250 m² et sur les cours d'eau ayant une largeur supérieure à 100 m.

A l'issue de son lancement prévu fin 2022, le satellite SWOT observera une première phase de trois mois durant laquelle ses instruments seront testés. Les 3 mois suivants constitueront une seconde phase servant à l'étalonnage et la validation des instruments ou Calibration and Validation (CalVal). Lors de ces 6 premier mois SWOT suivra une orbite d'échantillonnage rapide, répétitive à 1 jour, qui passera notamment au-dessus de la Normandie (Morrow et al., 2019). Cette configuration permettra l'utilisation de mesures in-situ effectuées en France pour réaliser l'étalonnage de l'altimètre. Le CNES souhaiterait utiliser lors de la CalVal de SWOT des mesures par Light detection and ranging (LiDAR) aéroporté. Les mesures LiDAR peuvent être comparées aux mesures altimétriques de deux manières : soit en utilisant la hauteur d'eau significative (ou Sea Surface Height (SSH)), ou en utilisant les spectres directionnels de vagues.

Le LiDAR pouvant être utilisé lors de la CalVal est celui du Remote Sensing Group (RSG), qui est un groupe de télédétection du laboratoire M2C de Caen. Des travaux sur ce LiDAR ont déjà été réalisés les années précédentes concernant la réalisation de champs directionnels de vagues à partir de mesures LiDAR (Ternon, 2019) et la détermination de la hauteur d'eau à partir d'un LiDAR aéroporté (Serthelon, 2020). Cependant des questions demeurent sur la mise en pratique du LiDAR dans le cadre d'une CalVal. Dans ce contexte, il est possible de se demander :

“ Dans quelle mesure l'utilisation d'un LiDAR aéroporté pourrait permettre d'étalonner l'altimètre spatial SWOT ? Quelle précision attendre du LiDAR aéroporté ? ”

Ce mémoire présentera dans un premier temps les différentes missions altimétriques jusqu'à aujourd'hui et leurs techniques de mesures. Ensuite, différentes méthodes de mesure in-situ pour les CalVal seront expliquées dont celle utilisant le LiDAR aéroporté. Dans un troisième temps, l'étude d'un vol effectué au-dessus de Rouen (Normandie) en septembre 2021, servira d'appui pour évaluer la précision des trajectoires obtenues grâce au traitement integer Precise Point Positioning (iPPP). Enfin, une comparaison des mesures LiDAR avec des mesures de l'altimètre Sentinel-3A faites au large du Cotentin sera réalisée.

I Les missions altimétriques spatiales jusqu'à SWOT

La mission SWOT constitue une grande évolution dans l'altimétrie spatiale, puisqu'elle lancera fin 2022 le premier altimètre pouvant couvrir la quasi-totalité des océans et permettant d'obtenir des mesures d'hauteur d'eau sur les rivières, fleuves, lacs, en zone côtière, etc. Cette nouveauté est due à la technologie innovante, plus particulièrement au radar interférométrique qui compose une partie de la charge utile du satellite SWOT. Il est le résultat de plusieurs décennies de recherche en altimétrie spatiale.

I.1 Les précédentes missions altimétriques

L'altimétrie spatiale de haute précision a commencé réellement il y a trente ans avec le satellite Topex-Poséidon. Cette première mission altimétrique fut le fruit d'une collaboration entre l'agence spatiale américaine (la NASA) et l'agence spatiale française (le CNES), tout comme l'est aujourd'hui la mission SWOT. L'altimètre Topex-Poséidon, ainsi que ses successeurs, avait pour mission d'observer le niveau de la mer, mais aussi les phénomènes de marée et les courants océaniques.

Dans les débuts, les satellites disposaient d'un altimètre conventionnel visant au nadir qui s'est amélioré au fur et à mesure des missions. Cependant, l'altimétrie spatiale ayant connu de nombreuses avancées, l'utilisation d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR) a ensuite été envisagée à la place de l'altimètre classique. Les premiers altimètres qui utilisèrent le SAR sont les satellites Cryosat-2 (lancé en 2010) et Sentinel-3A/B (lancé en 2016/2018).

Aujourd'hui, une nouvelle évolution de l'altimétrie spatiale apparaît avec la mission SWOT, qui grâce à son altimètre interférométrique s'inspirant de la technique SAR, permettra de réaliser des observations bidimensionnelles avec une meilleure résolution et une plus grande empreinte (CNES, 2022a).

I.2 Le principe des altimètres classiques visant au nadir

I.2.1 Définition des hauteurs utilisées en altimétrie spatiale

La hauteur d'eau significative (SSH) sera utilisée dans la suite de cette étude pour envisager l'étalonnage et la validation des données altimétriques par LiDAR aéroporté. Cette hauteur correspond à l'élévation instantanée de la surface de la mer par rapport à une ellipsoïde de référence. Cependant, les océanographes ne vont pas s'intéresser à cette mesure. En effet, cette hauteur englobe plusieurs effets qui ne seront pas forcément liés à l'état de l'océan (Roge, 2018). Les composantes de la SSH sont représentées dans la figure 1. Les principales sont :

- La distance géoid, qui sur la figure 1 correspond à la hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence. Le géoïde étant par définition "la surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre proche du niveau moyen des mers." (Dufour, 2001).
- La topographie dynamique ou Dynamic Topography (DT), correspond à la distance instantanée séparant le géoïde à la surface de la mer.
- La topographie dynamique moyenne ou Mean Dynamic Topography (MDT) représente la hauteur moyenne de l'eau par rapport au géoïde. Elle est égale au moyennage de la valeur de la DT sur une période assez grande pour s'affranchir des fluctuations interannuelles. Ces fluctuations sont liées aux marées ou bien aux vagues à la surface de l'eau (ODATIS, 2022).
- La hauteur d'eau significative moyenne ou Mean Sea Surface Height (MSSH) est quant à elle obtenue en réalisant un moyennage de la SSH sur une période assez grande, pour les mêmes raisons que la MDT. Elle correspond donc à l'élévation moyenne de la surface de la mer par rapport à l'ellipsoïde de référence.
- L'anomalie de hauteur de mer ou Sea Level Anomaly (SLA) correspond à la SSH à laquelle il faut soustraire la valeur de la MSSH.

La principale mission des altimètres spatiaux est de mesurer le range R. Cette variable correspond à la distance séparant le satellite de la surface de l'océan dans notre cas.

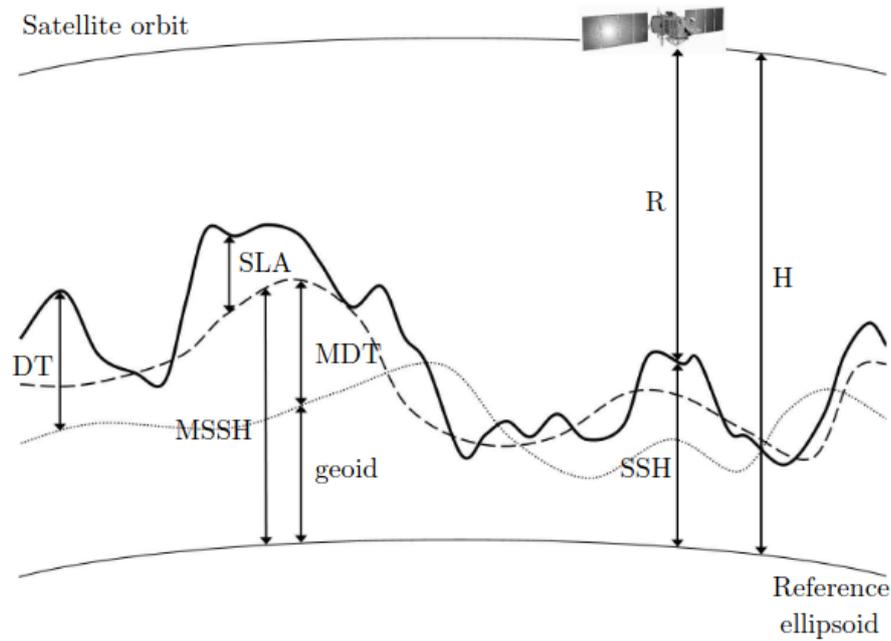


Figure 1 : Représentation des différentes hauteurs utilisées en altimétrie (Castruccio, 2006)

I.2.2 Principes de la mesure des altimètres nadir classiques

Afin d'obtenir la valeur du range, le radar de l'altimètre spatial classique va transmettre un signal de haute fréquence à sa verticale. L'onde va interagir avec le sol et une partie du rayon incident va venir se refléter dans l'altimètre, un écho de la surface est donc obtenu. Il va être alors possible de déterminer la distance séparant le satellite de la surface de l'eau en se servant du temps t que met l'onde à effectuer le trajet aller-retour entre le satellite et la surface de l'eau. Par conséquent :

$$R = \dot{R} - \sum_j^{\Delta} R_j$$

Où $\dot{R} = c \times \frac{t}{2}$ correspond au range en négligeant les effets de l'atmosphère sur l'onde électromagnétique, avec c la vitesse de la lumière. Enfin, $\sum_j^{\Delta} R_j$ correspond aux différentes corrections à apporter à la mesure du range (Chelton et al., 2001). En effet, plusieurs types d'erreurs vont pouvoir impacter la mesure de R . Il faut donc les corriger afin d'obtenir une mesure précise (voir infra §I.2.3).

Ensuite, la position du satellite va être déterminée de manière très précise (précision centimétrique) grâce à un ensemble d'appareils de mesure. Par exemple, dans le cas du satellite Sentinel-3A ces instruments sont : un récepteur Global Navigation Satellite Systems (GNSS), un Laser Retro-Reflector Array (LRA) et un instrument Doppler Orbit

determination and Radio-positioning Integrated on Satellite (DORIS). L'instrument DORIS va recevoir les rayonnements bifréquences émis par les stations DORIS au sol, puis va déterminer à partir des fréquences de l'onde reçue la vitesse du satellite. Il permet de connaître le positionnement du satellite à 1 cm. Ensuite, le récepteur GNSS complétera DORIS, captant les signaux de poursuite issus de la constellation de satellites Global Positioning System (GPS). Enfin, Le LRA est un réflecteur passif constitué d'une série de coins de cube en quartz. Il permettra d'obtenir des mesures de distances précises entre le satellite et les stations au sol effectuant des mesures laser. Ceci permettra de fournir des points d'appui pour les mesures effectuées par le récepteur DORIS et le récepteur GNSS.

Enfin, la SSH pourra être calculée en effectuant la différence entre la hauteur du satellite H et le range corrigé R , donc $SSH = H - R$. La valeur de H peut être comprise entre environ 500 km et 1336 km suivant les missions altimétriques. Dans le cas de SWOT, l'altitude du satellite sera de 890 km (CNES, 2022a).

I.2.3 Les corrections à appliquer sur les mesures altimétriques

I.2.3.1 Les corrections des délais atmosphériques

Lors de sa traversée de l'atmosphère, le signal est ralenti par trois principales causes.

Dans un premier temps, l'onde est ralentie dans l'ionosphère par la présence d'électrons, ils sont le résultat d'une ionisation des gaz contenus dans cette partie de l'atmosphère due au rayonnement solaire. Ce retard est corrigé par la combinaison de mesures effectuées sur deux fréquences différentes pour les radars bifréquence, ou par l'utilisation d'un modèle statistique d'ionosphère dans le cas d'un radar monofréquence. Cette correction vaut en moyenne 8 cm (Carret, 2019).

Ensuite, la réfraction par la partie sèche de la troposphère (retard lié à la présence d'azote et d'oxygène) correspond à 90% de la réfraction dans cette partie de l'atmosphère. Il s'agit de la correction avec la plus grande amplitude puisqu'elle va être autour de 2.3 m (Duquenne et al., 2005). Sa détermination se fait à l'aide de modèles.

Enfin, la composante humide de la troposphère ralentit aussi l'onde. La correction de ce retard est calculée via les mesures sur deux fréquences du radiomètre embarqué sur le satellite et grâce à des modèles météorologiques. Le radiomètre s'avère performant pour les

corrections au niveau des océans, cependant sur les eaux côtières, ses mesures seront contaminées par les signaux provenant de la terre avoisinante. Par conséquent, la correction est obtenue sur ces zones grâce à des modèles. Le modèle à privilégier est celui du centre européen pour les prévisions météorologiques (ECMWF), il fournit sous forme de grille de $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ des valeurs de pression, d'humidité et de température. Cette correction a une grande variabilité spatio-temporelle. Par conséquent, les corrections issues des mesures du radiomètre vont être utilisées en zone océanique, puisque les modèles manquent d'informations sur les plus petites échelles de variabilité. Cette correction est comprise entre 0 et 50 cm (Fernandes et al., 2021).

I.2.3.2 Les corrections géophysiques

Une partie des corrections à apporter au range va être liée au phénomène des marées. Tout d'abord, parmi les marées il y a la marée terrestre, qui est due à l'attraction qu'exercent les astres sur la Terre, entraînant une déformation du sol suivant un mouvement vertical. Ce phénomène, dont l'amplitude est comprise entre 0 et 50 cm, est corrigeable grâce à l'application de modèles. Par le même processus d'attraction avec les océans, la hauteur des océans varie à cause des marées océaniques. Là aussi, des modèles existent afin de corriger ce phénomène qui a une amplitude de 1 m au milieu des océans et allant de 15 à 20 m au niveau des rivages. Enfin, il faut corriger le range de la marée polaire. Ce phénomène est dû au déplacement de la Terre par rapport à son axe de rotation. Ses effets, de l'ordre de 2 cm, sont corrigés grâce à des modèles (ESA, 2022).

I.2.3.3 Les corrections instrumentales

Parmi les corrections instrumentales à apporter à la mesure du range, sont comprises celles concernant la calibration des instruments, les erreurs d'angle, l'effet doppler, etc. (Carret, 2019).

I.2.3.4 Les corrections liées à l'état de mer

Le quatrième type de correction à réaliser concerne l'état de mer. La réflectivité de la surface de la mer varie suivant que l'on se situe sur une crête ou dans un creux d'une vague, ce dernier étant plus réfléchissant. Cela a pour conséquence une sous-estimation de la SSH. Ce phénomène peut être corrigé grâce à des modèles empiriques qui vont s'appuyer sur la hauteur significative des vagues ou Significant Wave Height (SWH). L'ordre de magnitude de ce biais peut aller de 0 à 50 cm (ESA, 2022).

I.2.3.5 Le tracking et le retracking

Les impulsions transmises à la surface de la terre après réflexion sont reçues à bord puis mixées avec une impulsion similaire à celle transmise de base. L'impulsion mixée fournit une mesure échantillonnée de la puissance en fonction du temps (distance ou fréquence). Afin de réduire les variations statistiques (speckle) affectant l'écho mixé et de réaliser du tracking en temps réel, l'écho est moyenné à bord du satellite sur une période qui correspond au cycle de l'altimètre (typiquement 50 ms). Le résultat final est un écho moyenné ou une "forme d'onde" dont l'allure générale au niveau des océans est observable grâce à la figure 2.

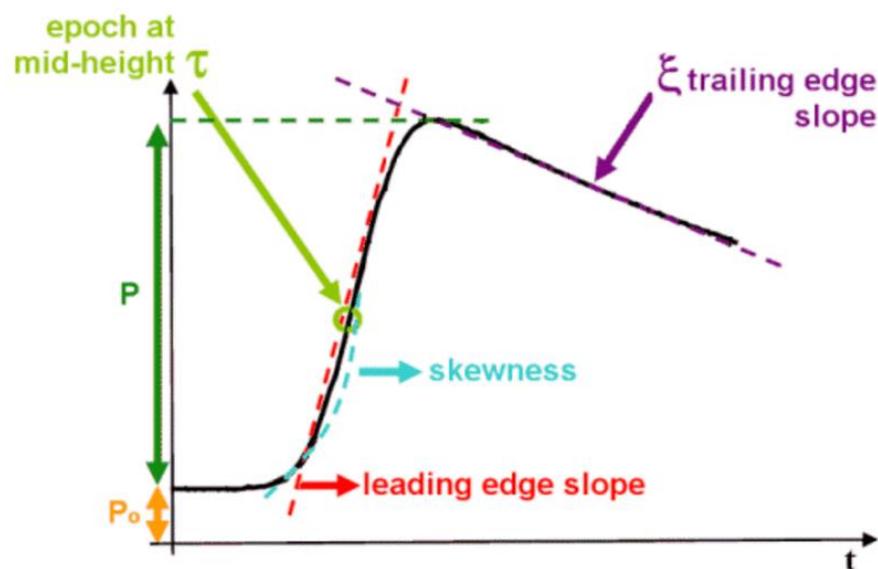


Figure 2 : Schéma d'une forme d'onde typique au niveau de l'océan illustrant la correction opérée par un retracker (ESA,2022)

La forme d'onde basique va être caractérisée par un front de montée (leading edge), dont la largeur va dépendre de la pénétration de l'onde dans le milieu ainsi que de la rugosité de la surface mesurée. Le temps associé au milieu de ce front de montée (epoch at mid-height) permet d'obtenir le retard de l'écho et donc la valeur du range (CNES, 2022a).

Un système de tracking à bord du satellite réalise une estimation de la position du milieu de front de montée afin de déterminer une fenêtre de réception de l'écho centrée sur la date probable de réception de celui-ci et de sa puissance associée. Cependant, cette estimation peut s'avérer peu précise notamment pour les surfaces hétérogènes (où plusieurs pics peuvent être présents sur la forme d'onde). Afin de corriger cette erreur, des algorithmes de réanalyse de formes d'onde appelés retracker vont être appliqués au sol afin d'obtenir une meilleure estimation de ce milieu du front d'onde. Chaque retracker est associé à un certain type de surface (Chelton et al., 2001).

I.3 La technologie de SWOT

I.3.1 L'innovation du radar Karin

La spécificité du futur altimètre spatial SWOT réside dans son radar altimétrique. En plus d'embarquer un altimètre nadir à double fréquence (bandes Ku et C) qui lui permettra de couvrir une zone de 5 à 10 km le long de sa trace, le satellite disposera d'un radar interférométrique à large fauchée : "Ka-band Radar INterferometer" (KaRIn).

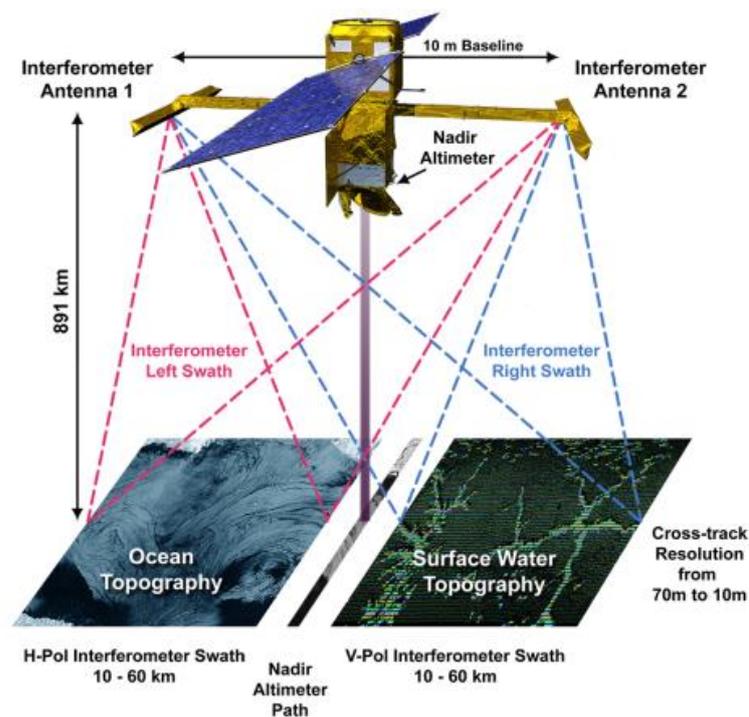


Figure 3 : Radar interférométrique à large fauchée KaRIn (CNES, 2022b)

Ce radar développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) est constitué de deux antennes émettrice/réceptrice, de 5 m de long et de 0.25 m de large, fonctionnant simultanément et situées chacune à l'extrémité d'un mât de 10 m de long (voir figure 3). Elles permettront de couvrir deux fauchées de 50 km séparées de 20 km au nadir, alors que précédemment les altimètres nadir couvraient uniquement une bande de quelques kilomètres au nadir de l'altimètre. KaRIn s'appuie sur le principe d'un SAR et effectuera des mesures en bande Ka (fréquence d'onde à 35.75 GHz, longueur d'onde de 8.6 mm).

Plusieurs fréquences possibles peuvent être utilisées pour les radars altimétriques. Le choix de cette fréquence va entre autres dépendre des objectifs ou contraintes de la mission, puisque chaque fréquence possède ses atouts et faiblesses. Par exemple, pour les missions Topex-Poséidon, Jason-1, Envisat, etc., l'utilisation de la bande Ku (13,6 GHz) a été

privilegiée. Cette fréquence représente un bon compromis entre la sensibilité aux effets de l'atmosphère, les bandes utilisables et les capacités technologiques de l'époque. De plus, l'utilisation en plus de la bande Ku de la bande C (5.3 GHz) va permettre de corriger les effets de l'ionosphère en combinant les mesures sur les deux bandes. Ces deux bandes sont notamment utilisées pour l'altimètre nadir de SWOT. De son côté, le radar interférométrique à large fauchée de SWOT fonctionne en bande Ka (35 GHz). Celle-ci permet d'obtenir une meilleure résolution spatiale, de meilleures observations au niveau des glaciers, zones côtières, forêts ou de la hauteur d'eau. En raison des régulations internationales, une plus grande bande passante est disponible pour cette fréquence, permettant ainsi d'obtenir une meilleure résolution au niveau des côtes (ESA, 2022). Cependant, la bande Ka est fortement sensible aux conditions atmosphériques, ce qui peut conduire à d'importantes atténuations du signal pour cause de gaz (humidité), nuage ou encore pluie. Par conséquent l'écho du radar sera inutilisable si les précipitations sont supérieures à 1.5 mm/h. Mais cela n'empêchera pas SWOT d'atteindre ses objectifs de couverture, car des études ont montré que 90% du temps la pluie a une précipitation inférieure à cette valeur (Vincent et al., 2006).

Le radar KaRIn fonctionnera en mode bistatique, i.e. que sur les deux antennes une seule émettra une onde radar mais les deux antennes recevront l'écho de cette onde.

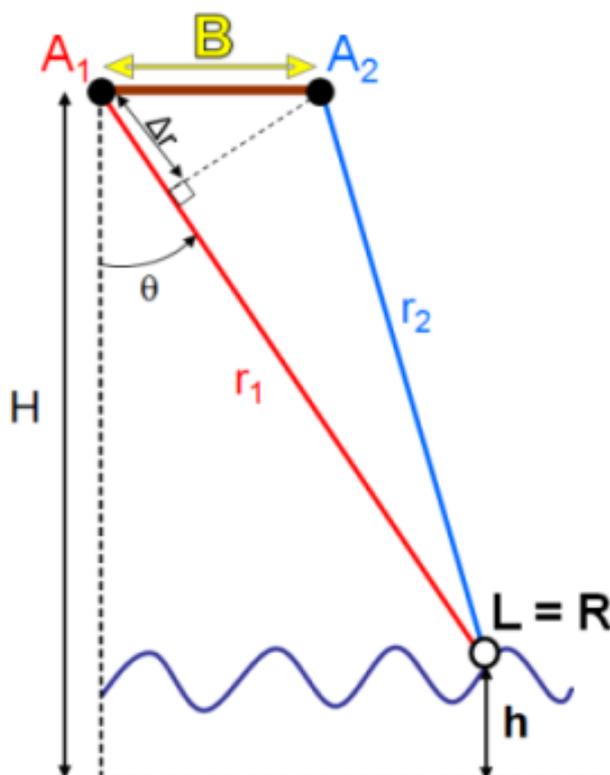


Figure 4 : Schéma du principe de fonctionnement du radar interférométrique à large fauchée KaRIn (CNES, 2022a)

Ainsi, suivant la figure 4, si l'antenne 1 émet une onde, les antennes 1 et 2 recevront un écho de cette onde. Ensuite, si nous posons r_1 et r_2 les distances entre les antennes et le point au sol, et le bras B la distance entre les deux antennes (10 m pour SWOT), la différence de phase entre les signaux reçus par A_1 et A_2 se détermine grâce à la formule suivante : $\Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$.

La différence de phase va permettre ensuite de calculer un angle de visée qui doit être compris entre 1° et 4° , ce grâce à l'équation $\Delta\varphi = kB \sin(\theta)$, k étant le nombre d'onde. Enfin, la hauteur d'eau pourra être obtenue en soustrayant de la hauteur du satellite H le range R , i.e. en calculant $h = H - r_1 \cos(\theta)$.

SWOT aura une résolution de 5 m le long de la trace et de 10 m à 70 m en travers de la trace. À ces résolutions, la précision sur l'élévation est de 50 cm. Afin d'améliorer cette précision à 2 cm, l'élévation moyenne sera calculée sur des zones de 1 km (CNES, 2022a).

Deux types de produits seront fournis par SWOT. Les produits issus du mode High Resolution (HR) seront utilisés pour l'hydrologie continentale. Ce mode ne sera donc pas activé au niveau des océans. La résolution sera de 250 m au niveau des océans et de 5 m le long de la trace par 10-70 m au niveau des continents. Les seconds types de produits seront issus du mode Low Resolution (LR), ces produits auront une résolution de 250 m.

L'altimètre nadir Poseidon-3C est un composant de la charge utile de SWOT qui complètera les mesures altimétriques de KaRIn pour des grandes longueurs d'onde (>1000 km). Il permettra aussi d'apporter des mesures dans le trou central de 20 km au nadir, non couvert par KaRIn, et servira d'appui pour l'étalonnage de KaRIn (CNES, 2022b).

I.3.2 Le système de positionnement et le radiomètre

La charge utile de l'altimètre SWOT sera complétée par une suite d'instruments de détermination d'orbite précise : un Global Positioning System Payload (GPSP), un LRA et un récepteur DORIS.

En plus des altimètres et des instruments de positionnement, le satellite SWOT embarquera un radiomètre micro-onde ou Advanced Microwave Radiometer (AMR). Sa fonction est de mesurer la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Cette donnée permettra ensuite de corriger les mesures altimétriques des perturbations provoquées par l'eau (CNES, 2022b).

La mission SWOT représente donc une grande évolution dans l'altimétrie spatiale. Elle s'inspire mais diffère des précédentes missions spatiales. Alors que les altimètres en mission aujourd'hui n'effectuent que des mesures à leur nadir, l'altimètre de SWOT proposera en plus des mesures sur une bande de 120 km le long de sa trace. À l'issue de son lancement prévu fin 2022, une première étape de cette mission consistera à réaliser la CalVal de l'altimètre, soit l'ajustement et la calibration des paramètres de l'instrument.

II L'étalonnage de SWOT par LiDAR aéroporté

Des méthodes d'étalonnage d'altimètres avec des mesures in-situ ont déjà été développées pour les précédentes missions altimétriques. Ces techniques seront réutilisées lors de la CalVal de SWOT, ainsi que des nouvelles développées à cette occasion. L'innovation dans l'étalonnage de SWOT est l'utilisation d'un LiDAR aéroporté aux États-Unis (Lenain et al., 2019). Avant d'envisager l'utilisation de ce système également en France, il faut vérifier ses capacités.

II.1 L'étalonnage des altimètres spatiaux

II.1.1 Les méthodes utilisées lors des étalonnages

Lors de leur mise en orbite, les altimètres spatiaux doivent observer une phase d'étalonnage et de validation de leurs instruments. En l'occurrence, pour SWOT, cela se traduit par le suivi d'une orbite rapide "d'étalonnage" par le satellite durant les 6 premiers mois après son lancement. Pendant cette durée, le satellite passera au-dessus des mêmes points tous les jours et notamment au-dessus de la Normandie. Les 3 premiers mois servent à tester les instruments et les 3 mois suivants sont dédiés à la CalVal, soit l'étalonnage des appareils. Ces trois derniers mois ont aussi le but scientifique de suivre, entre autres, l'évolution rapide des dynamiques dans l'océan à petite échelle (Morrow et al., 2019). A l'issue de cette phase, le satellite retrouvera son orbite scientifique d'une période de 21 jours.

L'étalonnage consiste à comparer des mesures effectuées in-situ avec les mesures de l'altimètre, afin d'estimer le biais de ce dernier. Les mesures in-situ pour la CalVal sont en général faites à la verticale de sites de CalVal. Il existe de nombreux sites de calibration dans le monde servant au suivi des satellites des missions altimétriques, dont le site de la plateforme pétrolière Harvest (Haines et al., 2003), les sites de Senetosa et Ajaccio en Corse, le site du lac d'Issyk-kul, ou encore le site d'Ibiza (Frappart et al., 2015). Chacun de ces sites va utiliser une technique particulière pour obtenir la mesure de la SSH.

Les sites du lac d'Issyk-kul et de Corse ont tous les deux servi à étalonner Sentinel-3A. Pour le premier site, un bateau muni d'une antenne GPS et d'un radar a traversé le lac en suivant la trace du satellite lors de son passage au-dessus du plan d'eau. La trajectoire du bateau a été obtenue en Precise Point Positioning (PPP) grâce au logiciel GINS (Loyer et al.,

2012). Cette technique a été privilégiée à la méthode différentielle à cause de la trop grande distance séparant le bateau des plus proches bases. Le biais de Sentinel-3A a été calculé en moyennant les différences de SSH le long du passage de l'altimètre. Pour cette étude plusieurs retracker ont été testés. Ainsi avec le tracker *Ocean* un biais de - 14 +/- 20 mm avait été trouvé, il était de 285 +/-20 mm avec celui de *OCOG* (Créaux et al., 2018). Ce résultat démontre l'importance de l'utilisation d'un tracker adapté à la surface étudiée. En Corse, le passage du satellite ne s'effectuant juste au-dessus des deux marégraphes, des campagnes ont été réalisées (Senetosa en 1999 et Ajaccio en 2005) afin de déterminer précisément le géoïde dans le secteur. A l'issue les mesures permirent de calculer un biais de 22 +/- 7 mm pour Sentinel-3A en mode SAR, une partie du biais (22 mm) étant attribuable à la correction troposphérique du radiomètre (Bonfond et al., 2018).

Ces deux étalonnages de Sentinel-3A illustrent l'importance d'un positionnement précis et de modélisations fiables. Cependant cela ne suffit pas. Le défi d'aujourd'hui est d'augmenter le nombre de sites pour obtenir un étalonnage correct. En effet, le vol en formation de Jason-1 et Topex-Poséidon a révélé l'existence d'erreurs géographiquement corrélées au niveau régional (état de mer, orbite) et local (e.g. contamination du radiomètre par la terre). Par conséquent, de nombreux sites en zones côtières ont été développés en France (île d'Aix, estuaire de la Gironde, baie d'Arcachon) (Créaux et al., 2018), mais aussi de nouveaux équipements et techniques ont été développés spécialement pour la CalVal de SWOT, comme la nappe de calibration Géodésique CalNaGéo (Bonfond et al., 2021).

II.1.2 L'utilisation du LiDAR aéroporté pour l'étalonnage de SWOT

L'utilisation du LiDAR est aussi envisagée pour réaliser la CalVal de SWOT. Cette technique récente et encore peu utilisée pour réaliser des mesures au niveau des océans, n'a encore jamais été utilisée pour l'étalonnage d'un altimètre. L'avantage du LiDAR est qu'il permet, en plus de mesurer la SSH, d'obtenir des spectres directionnels de vagues. Ainsi, tandis que l'altimètre nadir et d'autres altimètres spatiaux (e.g. Sentinel-3 ou Jason-CS) serviront de base pour l'étalonnage des grandes longueurs d'onde (supérieures à 120 km), le LiDAR permettra l'étalonnage des longueurs d'onde allant de 15 à 120 km (Morrow et al., 2019).

Le système LiDAR, Modular Aerial Sensing System (MASS), qui interviendra lors de la CalVal de SWOT a été développé par Ken Melville du Scripps Institution of

Oceanography (SIO). Il est constitué d'un LiDAR Riegl Q680i aéroporté ayant une précision de 2-3 cm, la précision de leur positionnement différentiel est de 1 cm en horizontal et 1.5 cm en vertical sur le continent. Afin de valider l'utilisation de cet appareil dans la CalVal, une première comparaison entre les mesures de SSH du MASS et celles de Jason-1 fut réalisée en 2011. Cela permit à la fois de valider les mesures de SSH du LiDAR et de démontrer un bon accord entre les mesures de longueur d'onde supérieures à 150 km de Jason-1 et du LiDAR. Cependant, une expérience au niveau de dunes avait ensuite révélé un problème de performance pour les longueurs d'onde comprises entre 15 et 150 km. Les résultats étaient non concluants en raison d'une non-indépendance des données (Chen, 2018). Ceci à amener le Scripps à utiliser un avion plus rapide avec deux systèmes MASS à son bord (Lenain et al., 2019). Les pré-campagnes menées ensuite au large de la Californie et dans le golfe du Mexique, ont permis une comparaison des mesures du MASS avec des mesures de Sentinel-3A, donnant des résultats prometteurs pour l'avenir (Kendall Melville et al., 2016).

En France, l'utilisation du LiDAR dans la CalVal de SWOT est envisagée, mais pour cela le laboratoire M2C possédant le LiDAR utilisable dans l'étalonnage doit vérifier ses performances et la méthode d'acquisition, tout comme l'on fait le Scripps. Les principaux acteurs pour ce projet sont Nicolas Picot (CNES), Pascal Bonnefond (Chercheur à l'Observatoire de la Cote d'Azur), Benoît Laignel et Laurent Froideval du Laboratoire M2C, les trois premiers se concentrant sur l'application au niveau du littoral tandis que le laboratoire M2C s'intéresse plus à l'utilisation du LiDAR aéroporté au niveau de l'océan.

II.2 La détermination de la hauteur d'eau à l'aide d'un LiDAR aéroporté

Le LiDAR est une technologie récente utilisée par le groupe RSG depuis plusieurs années sur des thématiques côtière, des sites archéologiques, etc. Tout comme le fait le Scripps, le laboratoire M2C souhaiterait utiliser son LiDAR dans l'étalonnage d'altimètre. C'est dans ce sens que plusieurs campagnes ont déjà été réalisées.

II.2.1 Présentation du LiDAR

Le LiDAR a connu sa première application télémétrique dans les années 90 grâce aux premiers LiDAR aéroportés avec balayage. Cette technique a connu de grands progrès depuis en multipliant les plateformes utilisées : satellite, bateau, sol, avion et plus récemment

des drones. L'avantage de l'utilisation d'un avion comme plateforme, est la possibilité de couvrir une surface plus grande que les autres plateformes (hors satellite) et plus rapidement.

Le LiDAR est un capteur actif qui opère dans le domaine d'onde optique, il est constitué d'un ou plusieurs lasers, d'un télescope, d'un ensemble de détection, d'un système informatique permettant de gérer le fonctionnement de l'instrument, etc. Son principe se base sur la mesure de temps d'aller-retour des signaux lumineux et sur le processus d'interaction lumière-matière. Le temps d'aller-retour permet de déterminer la distance r séparant le LiDAR de l'objet visé grâce à la formule $r = c \times \frac{t}{2}$, avec c est la vitesse de l'onde et t le temps d'aller-retour source-cible (Flamant, 2019). La détermination de la position de la plateforme du LiDAR, avec l'aide d'un récepteur GNSS et d'une centrale inertielle par exemple, couplée à cette mesure de distance, permet de déterminer la position précise des points mesurés par le LiDAR.

Le LiDAR utilisé par le groupe RSG est un Leica ALS60 opérant à une longueur d'onde de 1064 nm, ce qui permet une bonne réflexion sur les surfaces d'eau. Il est composé d'un système Inertial Position and Attitude System (IPAS) qui permet le contrôle de l'Inertial Navigation System (INS), soit un récepteur GNSS et une centrale inertielle (IMU) permettant d'obtenir un positionnement direct de l'appareil. Le GNSS permet d'obtenir un positionnement différentiel avec une fréquence de 2 Hz. Cette trajectoire est ensuite combinée à l'attitude de l'aéronef fournie par l'IMU pour obtenir une trajectoire de 500Hz.

Selon sa notice, le LiDAR ALS60 opère pour des hauteurs de vol comprises entre 200 m et 6302 m. Le choix de cette distance va dépendre de la densité du nuage de points souhaitée, ainsi que de l'importance de la zone à couvrir, puisque la hauteur aura un impact sur la taille de l'empreinte ; et de la précision des mesures voulue. Plus la hauteur de vol sera élevée, moins la précision sera bonne. Par conséquent, en considérant la précision globale de l'appareil, le laboratoire M2C ne dépasse pas les 1500 m de hauteur afin de conserver une bonne qualité de mesure. Dans cette précision globale sont compris les 5 cm de précision d'un positionnement différentiel (DGPS) et les quelques centimètres de précision du laser du LiDAR. Lors de vols permettant de déterminer des SSH, cette hauteur est comprise entre 400 et 600 m, car le but est d'obtenir la meilleure précision. Les principales erreurs du LiDAR sont donc sur son positionnement et sur le laser. Ainsi, pour une hauteur de vol d'environ 500 m, en considérant une FOV de 40° et une précision de 5 cm sur le

positionnement, selon la notice du constructeur, l'appareil a une précision de 8 cm en vertical et de 7 cm en horizontal (voir figure 5).

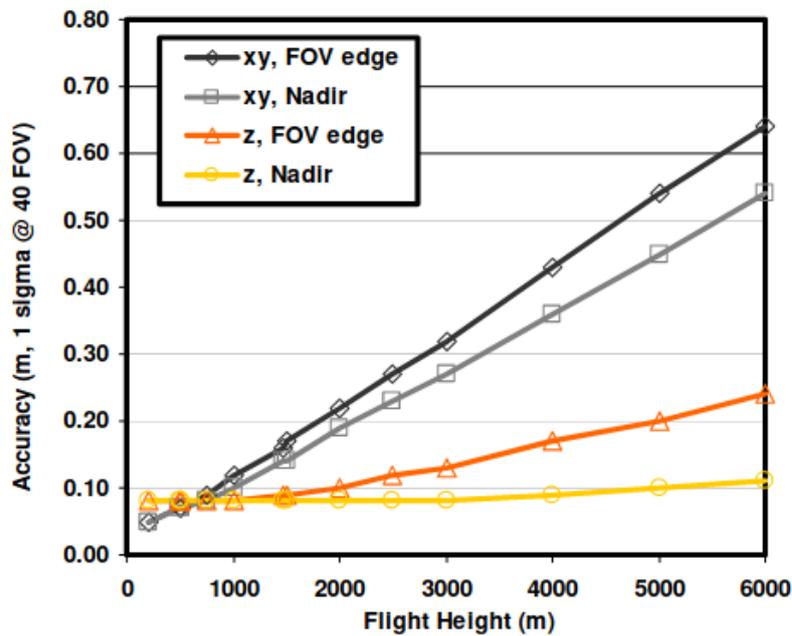


Figure 5 : La précision du LiDAR suivant la hauteur de vol indiquée dans la notice du LiDAR ALS60

En 2019, une comparaison de mesures LiDAR de la Gironde avec les données de 7 marégraphes sur place avait montré un écart de 9.4 cm avec un écart-type de 1.5 cm entre les deux données (Ternon, 2019). Cela couplé à des résultats similaires au niveau de la Seine avait permis de conclure l'opérationnalité du LiDAR pour la détection de vagues.

II.2.2 La réalisation des vols

La réalisation d'un vol pour effectuer des mesures de SSH avec le LiDAR va comporter plusieurs contraintes. Tout d'abord, le groupe RSG utilise un aéronef de la société PixAir Survey, donc le choix du jour de vol dépend des disponibilités de la société, mais pas uniquement. En effet, les mesures LiDAR peuvent être rendues impossibles en cas de nuage épais à basse altitude. Par conséquent, avant d'effectuer un vol, plusieurs plans de vol doivent être réalisés à l'aide du logiciel Leica MissionPro Flight Planning Software. Au minimum 2 plans sont faits pour anticiper une impossibilité de réaliser un levé LiDAR à la plus haute altitude de vol. Ces plans vont fixer, en plus de la trajectoire, la puissance et la vitesse du laser. La vitesse de l'aéronef y est aussi mentionnée. Celle-ci joue un rôle sur la densité de points et ne doit pas dépasser les 110 nœuds pour limiter les risques de déviation vis-à-vis de la trajectoire. Ensuite, une autre contrainte est sur la fenêtre de vol. Dans le cas de

l'étalonnage d'un altimètre spatial, le passage de l'avion doit être synchronisé avec le passage de l'altimètre, ce qui n'est pas évident étant donné que la réalisation du vol dépend des conditions météorologiques. Dans le cas de l'étalonnage de SWOT, l'altimètre passera quotidiennement au-dessus de la Normandie et dans le Sud de la France (voir figure 6), cette configuration permettra donc d'envisager plusieurs vols avec le LiDAR.

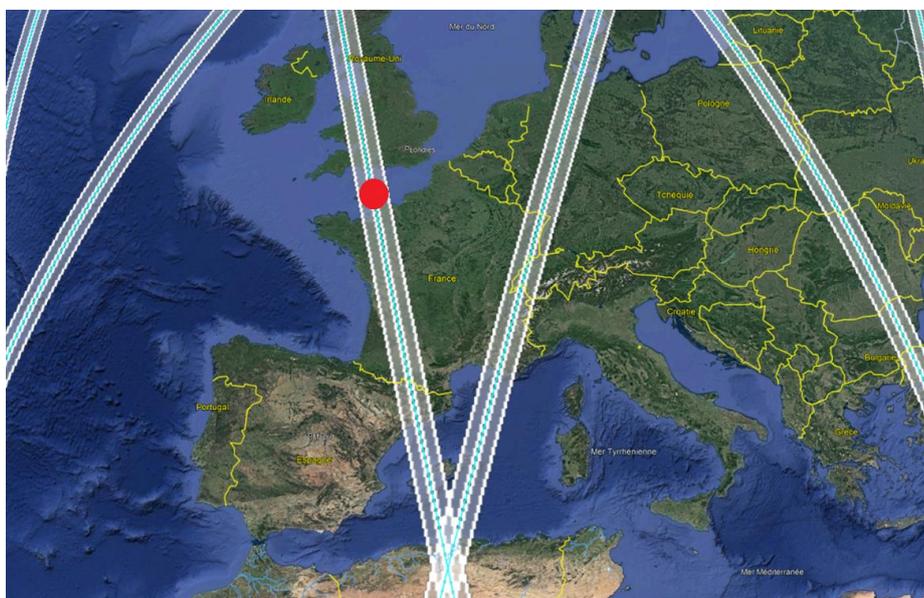


Figure 6 : Orbite d'étalonnage de SWOT au niveau de la France (CNES,2022a)

Une fois réalisés, les plans sont envoyés à PixAir. Lors du vol, un membre du groupe RSG est présent. L'opérateur doit veiller à la bonne acquisition du système en plus de vérifier la couverture des données. Il doit notamment vérifier que l'angle de roulis reste compris entre -30° et 30° , sinon les ailes de l'avion pourraient créer un masque.

A l'atterrissage, les données brutes sont générées. Le groupe RSG utilise le logiciel Grafnav GNSS Post-Processing Software pour traiter en DGPS la trajectoire du LiDAR. L'intégration des données de la centrale inertielle avec le logiciel IPAS Pro permet d'obtenir ensuite une trajectoire de 500 Hz à la place de 2 Hz. Les nuages de points sont créés après grâce au logiciel ASL PP, ils sont stockés au format ASPRS LASer (.las), qui est un format ouvert qui permet à la fois de stocker les coordonnées des points mais aussi des informations qui vont être propre à la mesure LiDAR tel que l'angle de scan.

Le calcul de la trajectoire avec la méthode DGPS crée une contrainte en plus, puisque cela exige la présence d'une station du Réseau GNSS Permanent (RGP) à proximité du vol, ou l'installation d'une base pour obtenir une bonne précision. Les vols réalisés pour l'étalonnage des altimètres impliquent donc une ligne de base trop grande, puisque les mesures de SSH peuvent être réalisées jusqu'à 80 km des côtes et donc loin de la terre où il

serait possible d'installer une base. Par conséquent, l'utilisation d'une nouvelle technique de positionnement sera nécessaire lors de la CalVal de SWOT. Le groupe RSG souhaite réaliser son positionnement lors de ces vols par un traitement PPP. L'utilisation du logiciel GINS créé par le Groupe de Recherche et de Géodésie Spatiale (GRGS) est envisagée pour réaliser ces traitements. Ce logiciel propose un nouveau traitement plus précis que le PPP : Integer Precise Point Positioning (IPPP) (voir infra §III.2). Le groupe RSG cherche donc à déterminer si cette technique de positionnement pour le LiDAR aéroporté a une précision suffisante pour l'étalonnage d'altimètre et souhaite déterminer aussi la précision globale du LiDAR en comparant des mesures LiDAR avec des mesures altimétriques SAR.

II.3 Les vols effectués dans le cadre de l'étalonnage de SWOT

Afin d'évaluer les capacités du LiDAR aéroporté dans le cadre de l'étalonnage de SWOT, plusieurs campagnes ont été réalisées avec un objectif différent. Les deux traitées dans cette étude avaient pour but d'évaluer la qualité de la trajectographie en iPPP et de comparer des mesures du LiDAR avec celles d'un altimètre SAR.

II.3.1 Vol au-dessus de Rouen

Le premier vol a été effectué au-dessus de Rouen en Normandie, le 2 Septembre 2021. L'objectif de cette première campagne est d'analyser la qualité de la trajectoire calculée avec la méthode iPPP grâce au logiciel GINS.



Figure 7 : Installation pour le vol au-dessus de Rouen

Pour cela, deux récepteurs GNSS ont été disposés sur le toit de l'aéronef (voir figure 7), séparées par 31.6 cm. Cette distance a été mesurée à l'aide d'un tachéomètre. Une première antenne (Aeroantenna Technology AT1675_180) était directement branchée au LiDAR. Le fichier RINEX contenant les observations de cette première antenne réceptrice a été renommé AVIO0245.21o afin de respecter le format RINEX. La seconde antenne (Aeroantenna Technology AT1675_180), elle, n'était pas branchée au LiDAR et son fichier RINEX d'observation a été renommé BASE0245.21o. Ces deux antennes ont effectué des mesures sur les constellations GPS et GLONASS avec une fréquence de 2 Hz, et ce pendant 85 minutes pour l'antenne AVIO contre 94 min pour l'antenne BASE.

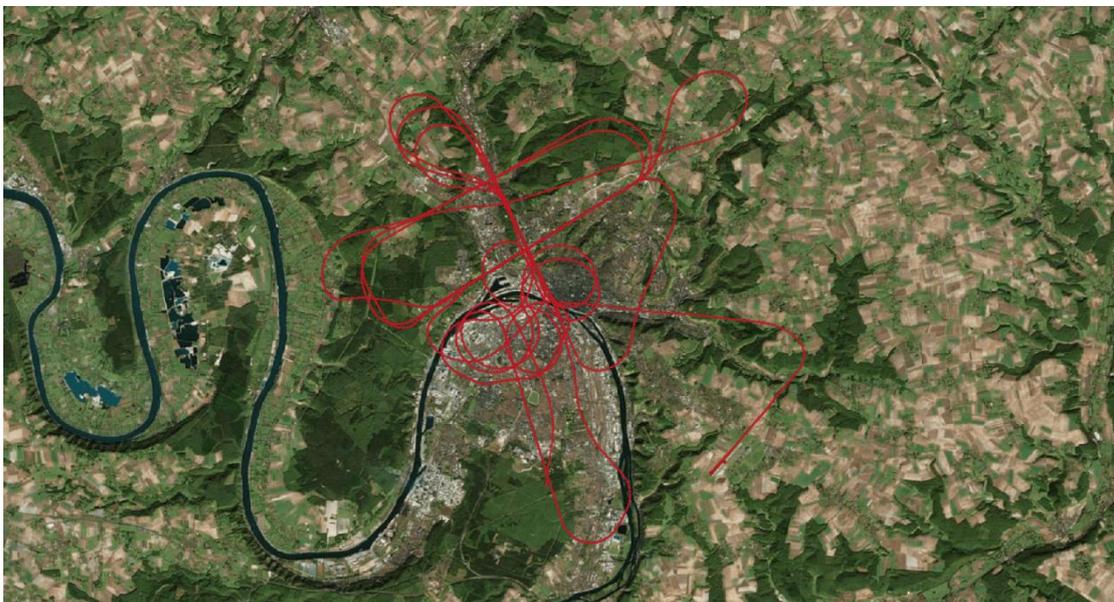


Figure 8 : Trajectoire du vol au-dessus de Rouen effectué le 2 Septembre 2021.

Lors des vols avec LiDAR aéroporté, le LiDAR ne réalise pas d'acquisition lorsque l'aéronef effectue un virage. Par conséquent, dix passages de l'aéronef répartis sur 3 lignes, où le LiDAR était en acquisition, sont discernables sur la trajectoire de ce vol (voir figure 8). Afin d'observer l'influence de la hauteur sur la qualité de la trajectoire, l'aéronef s'est stabilisé à 1000 m puis à 1500 m et à nouveau à 1000 m.

Grâce à cette première campagne, l'évaluation de la qualité de la trajectoire iPPP va être vérifiée de deux manières. Premièrement, la distance calculée en iPPP séparant les deux antennes sera comparée à celle réelle, i.e. 31.6 cm. Dans un second temps, les trajectoires iPPP des deux antennes seront comparées avec les trajectoires DGPS.

II.3.2 Vol au large du Cotentin

L'objectif du second vol est d'évaluer la précision du LiDAR en comparant ses mesures de SSH à des mesures SAR réalisées par Sentinel-3A. Pour cela, le vol a été réalisé au large du Cotentin le 20 novembre 2019. Il fut programmé afin de suivre la trace du satellite Sentinel-3A de façon synchrone.

L'aéronef a maintenu une altitude comprise entre 500 et 600 m durant les 2 heures 25 min de temps d'acquisition. Le fichier RINEX contenant les observations de l'unique antenne GNSS lors de ce vol a été traité en iPPP avec le logiciel GINS-PC du CNES/GRGS. A l'issue du vol les 10 fichiers .las correspondants aux différents passages effectués ont été générés.

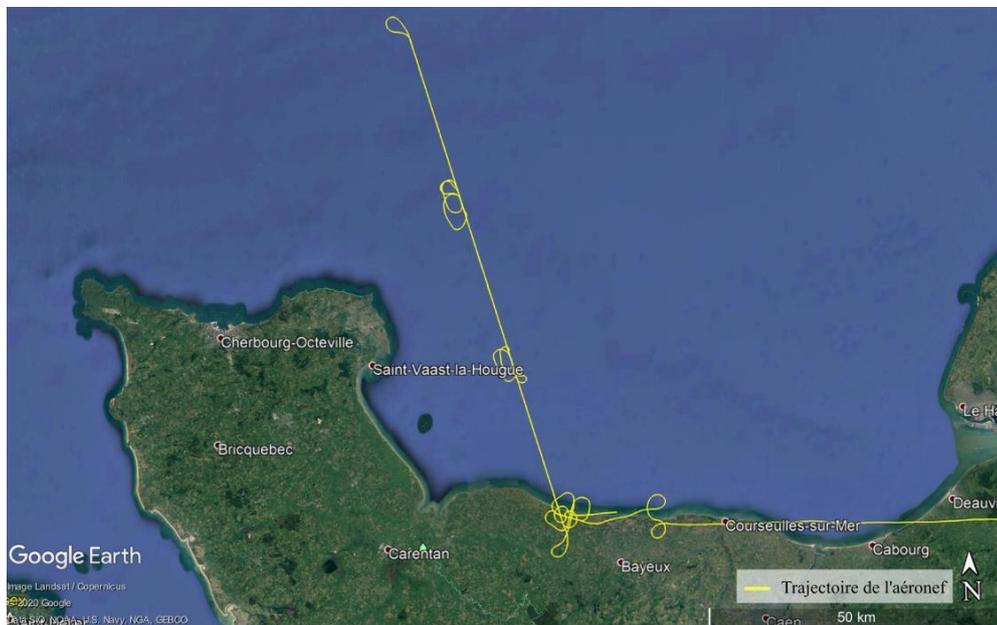


Figure 9 : Trajectoire de l'aéronef lors du vol au large du Cotentin effectué le 20 Novembre 2019.

Sur la trajectoire du vol (Figure 9) sont distinguables 3 lignes. Sur la première ligne, la plus au sud, l'aéronef est passé deux fois. Sur la seconde ligne, 4 acquisitions ont été réalisées. Enfin sur la troisième ligne, la plus au nord, deux fichiers .las ont pu être générés. L'un de ces deux derniers passages est le plus synchronisé avec le passage de Sentinel-3A.

L'étalonnage implique donc un nombre important de sites. Pour la CalVal de SWOT certains d'entre eux comprendront des mesures de LiDAR aéroporté. Pour que ce soit le cas en France, il faut d'abord évaluer la précision globale du LiDAR du M2C avec un positionnement iPPP grâce à une comparaison avec Sentinel-3A. Mais dans un premier temps, il est nécessaire de déterminer la qualité de sa trajectoire.

III La trajectographie de l'aéronef

Jusqu'à présent le groupe de travail RSG a obtenu le géoréférencement de ses nuages de points grâce à la détermination des positions de son antenne GNSS par un traitement DGPS. Cependant, pour la mesure de SSH effectuée au large des côtes, le DGPS s'avère insuffisamment précis, c'est pourquoi l'utilisation de l'iPPP est envisagée. Néanmoins la précision de cette technique de positionnement doit être déterminée avant d'envisager son application lors de la CalVal de SWOT.

III.1 Principe du positionnement GNSS

III.1.1 Principe Général

Un GNSS est un système de Navigation par Satellites qui permet d'obtenir à tout instant sa position et le temps. Chaque récepteur GNSS va permettre d'obtenir la position de l'utilisateur en déterminant la distance le séparant des satellites émetteurs. Pour obtenir la position d'un récepteur, au moins 4 satellites vont être nécessaires afin de résoudre la non-synchronisation des horloges du récepteur et des satellites. Ces satellites peuvent être issus de différentes constellations telles que NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo et Beidou.

Le groupe RSG réalise son positionnement à partir des mesures de phase. Il est alors possible de déterminer la distance satellite/récepteur grâce à l'équation suivante :

$$\phi_r^s = \rho_r^s + c(dt^s - dt_r) + T_r^s - I_r^s - \lambda N_r^s$$

Avec

ϕ_r^s :	Mesure de phase (m)
ρ_r^s :	Distance Géométrique satellite/récepteur (m)
c :	La vitesse de l'onde (m/s)
$(dt^s - dt_r)$:	Ecart de synchronisation entre horloges (s)
T_r^s :	Erreur troposphérique (m)
I_r^s :	Erreur ionosphérique (m)
λ :	la longueur d'onde de l'onde (m)
N_r^s :	Ambiguïté entière

L'ambiguïté entière correspond à un nombre entier inconnu de cycles, qui ne peut pas être mesuré par le récepteur GNSS. Un cycle correspond à une période de temps et à une distance parcourue égale à la longueur d'onde. La fixation de cette ambiguïté va être décisive dans la qualité du positionnement (Duquenne et al., 2005). Plusieurs autres erreurs vont jouer un rôle dans la précision du positionnement.

III.1.2 Les erreurs de positionnement

Pour un positionnement relatif ou absolu, ce sont les mêmes erreurs qui vont intervenir. Cependant ce qui va changer, c'est la méthode pour éliminer ou réduire ces erreurs.

La position des satellites intervient dans le calcul de la distance géométrique satellite/récepteur, par conséquent les erreurs sur les éphémérides vont impacter la précision du positionnement. Suivant la méthode de positionnement, l'erreur sur les orbites n'aura pas le même effet. En positionnement absolu, l'erreur sur l'orbite va directement se répercuter sur la précision du positionnement du récepteur. Dans le cas d'un positionnement relatif, l'erreur se répercute sur la précision de la ligne de base. Ensuite, la connaissance de la date d'émission des satellites est aussi importante dans le calcul de la distance géométrique satellite/récepteur. Les horloges atomiques des satellites n'étant pas parfaitement synchronisées avec celle du récepteur, ceci induit une erreur sur la distance.

Pour corriger les erreurs liées aux orbites et aux horloges, il est possible de s'appuyer sur des produits d'éphémérides contenant la position des satellites ainsi que l'erreur d'horloge des satellites. Parmi ces produits, on compte les orbites radiodiffusées contenues dans le message navigation, qui sont disponibles en temps réel et calculées quotidiennement. Ensuite, l'International GNSS Service (IGS) fournit gratuitement plusieurs produits d'éphémérides avec une précision meilleure et un délai de diffusion plus long que les orbites radiodiffusées. Comme le montre le tableau 1, la meilleure solution est l'utilisation des produits finaux de l'IGS. Ils sont diffusés entre 12 et 18 jours après le jour des mesures et permettent d'obtenir une précision de 2,5 cm sur les orbites des satellites GPS et de 3 cm sur les orbites des satellites GLONASS. Ensuite, les éphémérides ainsi que les récepteurs vont prendre en compte les effets relativistes qui interviennent sur les mesures GNSS, ce qui implique qu'aucune correction n'est à apporter pour ces effets (Duquenne et al., 2005).

Type		Précision	Délais	Fréquence
Radiodiffusé	Orbites	~100cm	Temps réel	Quotidien
	Horloges	~5ns RMS		
Prédit	Orbites	~5cm	Temps réel	15 min
	Horloges	~3ns RMS		
Ultra-rapide	Orbites	~3cm	3-9 heures	15 min
	Horloges	~150ps RMS		
Rapide	Orbites	~2.5cm	17-41 heures	15 min
	Horloges	~75ps RMS		5 min
Final	Orbites GPS	~2.5cm	12-18 jours	15 min
	Orbites GLONASS	~3cm		
	Horloges	~75ps RMS		
				30 s

Tableau 1 : Les produits d'orbites et d'horloges fournis par l'IGS (IGS, 2022)

Tout comme pour les mesures de l'altimètre, l'atmosphère et plus particulièrement la troposphère et l'ionosphère vont provoquer des délais.

Comme expliqué précédemment, c'est la composition de l'ionosphère qui implique un retard de l'onde lors de sa traversée de cette partie de l'atmosphère. En positionnement absolu, cette erreur est corrigable en utilisant soit des modèles ou bien des combinaisons nécessitant un récepteur bifréquence, ce que nous possédons dans notre cas. L'utilisation d'une combinaison iono-free va permettre d'obtenir une observation dépourvue de terme ionosphérique, cependant son désavantage est la présence d'un bruit sur la combinaison supérieure à celui sur L1/L2. Cette combinaison peut être utilisée pour la correction au premier ordre. Les termes du second ordre qui correspondent à 1-2% des effets de l'ionosphère sont quant à eux éliminables en utilisant les produits de l'IGS. En positionnement relatif, l'utilisation des doubles différences pour des longueurs de base inférieures à 15 km va permettre d'éliminer le délai ionosphérique (Morel, 2021a).

Ensuite, l'onde va être aussi retardée lors de sa traversée de la troposphère. Tout comme pour les mesures altimétriques, on peut différencier le retard dû à la partie sèche de la troposphère SHD et le retard dû à la partie humide SWD. En positionnement relatif, cette erreur est éliminée par l'utilisation des doubles différences. En positionnement absolu, des modèles s'appuyant sur la température, la pression, l'humidité et l'élévation du satellite seront utilisés. Il en existe plusieurs en raison de la difficulté à déterminer la SWD (Fund et al., 2010). Le retard troposphérique sera d'autant plus important que la distance traversée par l'onde dans la troposphère est grande donc une solution pour réduire cette erreur est d'utiliser un angle de coupure sur l'élévation des satellites. Cette correction est importante car elle affecte surtout la composante verticale de la position.

Ensuite, plusieurs erreurs sur le positionnement vont intervenir lors de la réception et de l'émission du signal.

Dans un premier temps, la position du centre de phase de l'antenne va engendrer une erreur. En effet, lors de la réception, les mesures sont faites au niveau du centre de phase de l'antenne, mais nous allons chercher à déterminer un point fixe de l'antenne qui est l'Antenna Reference Point (ARP). Or la position du centre de phase va varier suivant l'élévation et l'azimut des satellites, mais aussi suivant la fréquence utilisée. Pour déterminer la position de ce point, un fichier ANTEX disponible sur le site de l'IGS est utilisé. Ce fichier contient pour chaque antenne l'excentrement du centre de phase par rapport à l'ARP mais aussi une partie variable fonction de l'élévation, de l'azimut des satellites et de la fréquence utilisée. Lors de l'émission au niveau des satellites, le décalage ne se fait pas vis-à-vis de l'ARP mais par rapport au centre de masse des satellites. Cette erreur sera aussi corrigable par l'utilisation d'un fichier ANTEX de l'IGS (Duquenne et al., 2005).

Puis lors de la réception du signal, une erreur va aussi apparaître dû au phénomène de multi-trajets, elle peut être diminuée par le choix du modèle et de la position de l'antenne. Ensuite, parmi les autres erreurs impliquées dans le positionnement, nous allons distinguer le Hardware biases, qui est biais de l'appareil. Il se situe au niveau des deux récepteurs (satellite et utilisateur) (Morel, 2021b).

Enfin, tout comme pour les mesures réalisées par l'altimètre, des phénomènes de marée vont être à prendre en compte. Les erreurs liées à ces phénomènes peuvent être corrigées grâce à l'utilisation de modèles définissant l'amplitude de ces mouvements. Dans le cas d'un positionnement absolu de notre aéronef, ces erreurs ne seront pas à prendre en compte puisque l'aéronef ne sera pas sujet aux marées. Mais dans le cas d'un positionnement relatif, les marées auront un effet sur la base au sol et devront donc être corrigées.

Les erreurs impliquées dans un positionnement GNSS pourront donc être corrigées qu'importe la méthode de positionnement réalisée (relatif ou absolu). Dans notre cas deux méthodes ont été envisagées pour déterminer la position de (ou des) antenne(s) embarquée(s) dans l'aéronef : le DGPS et l'iPPP.

III.2 Les méthodes de positionnement relatif et absolu utilisées

III.2.1 Le Differential Global Positioning System

Il existe actuellement plusieurs méthodes de positionnement à partir de mesures GNSS. L'une d'entre elles fréquemment utilisée est le Differential Global Positioning System (DGPS) qui réalise un positionnement relatif. Cette méthode permet l'élimination des erreurs sur le positionnement par le calcul (voir supra§III.1.2). Ce modèle s'appuie sur le principe que si deux stations sont proches l'une de l'autre, alors le signal du satellite va suivre le même trajet. Les erreurs rencontrées seront donc les mêmes. Ainsi, pour réaliser cette méthode, deux stations au sol doivent observer simultanément les mêmes satellites. Ensuite, une différence de leurs observations (Double différence) est faite pour éliminer les erreurs de positionnement (Morel, 2021b).

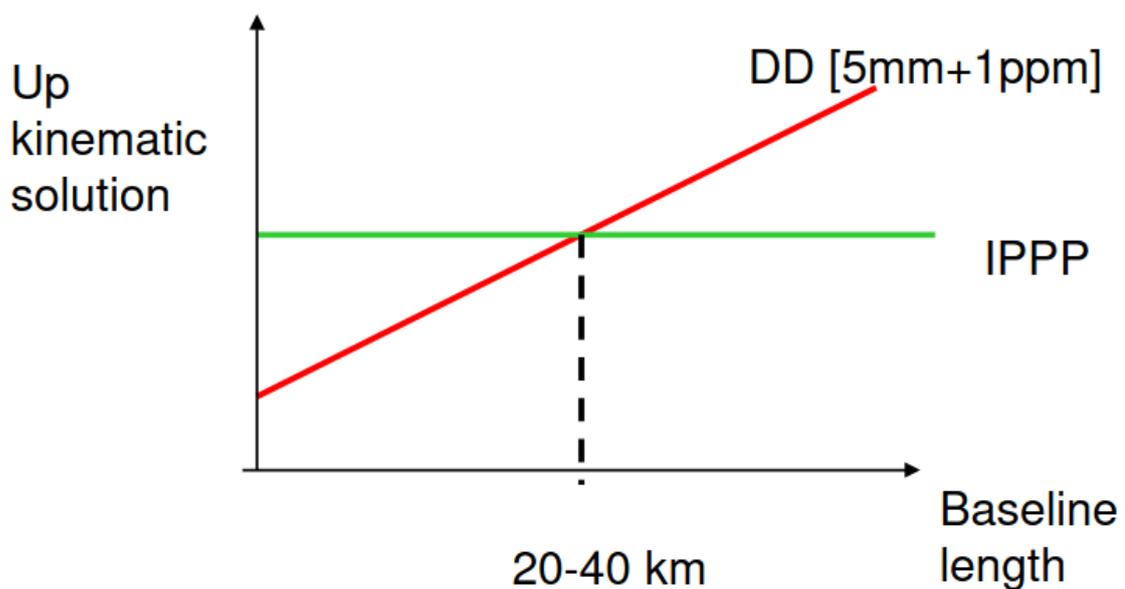


Figure 10 : Les Précisions de l'iPPP et du DGPS suivant la longueur de la ligne de base (Perosanz et al., 2014)

Cette technique de positionnement avec mesure de phase permet d'obtenir un positionnement au centimètre (Morel, 2021b). Cependant elle comporte une contrainte. En effet, plus la ligne de base séparant le récepteur de la base sera grande, moins la précision sera bonne (voir la figure 10). Par conséquent, la distance séparant la base et le mobile ne doit pas dépasser 20 km pour conserver une bonne précision. Or, lors des vols servant à déterminer des SSH, l'aéronef peut s'éloigner jusqu'à 80 km des côtes. La précision du

DGPS n'est donc plus suffisante, ce qui nécessite de trouver une autre méthode de positionnement.

III.2.2 L'Integer Precise Point Positioning

Afin de pallier ce problème de longueur de ligne de base, il faut se tourner vers une technique de positionnement absolu. Cela permettra de s'affranchir de l'utilisation d'un second récepteur qui peut impliquer un coût si une station du RGP ne se trouve pas à proximité du lieu de vol. Cela signifie aussi qu'il n'y aura aucune limite de distance à la côte pour réaliser la CalVal de SWOT, puisque la précision restera stable qu'importe la distance à la côte.

Une de ces techniques de positionnement est le Precise Point Positioning (PPP). Elle est devenue intéressante au cours des dernières années en raison des progrès effectués sur le calcul des produits d'orbites et d'horloges par l'IGS. L'absence de possibilité de réaliser des doubles-différences va impliquer l'utilisation de modèle pour déterminer le délai troposphérique, des éphémérides précises, etc. (voir supra §3.1.2).

En zéro-différence, la résolution des ambiguïtés entières va s'avérer difficile en raison de la méconnaissance des biais électroniques des satellites et des récepteurs, qui en double différence sont facilement éliminables. Par conséquent, en PPP seulement une résolution flottante des ambiguïtés sera réalisée. Aujourd'hui la précision du PPP est de 5 cm pour un temps d'observation de 30 min en statique (Morel, 2021a). Le temps de convergence pour fixer les ambiguïtés est important et ne permet pas d'envisager un positionnement cinématique, car la précision serait dégradée.

Pour résoudre ce problème, l'équipe de Géodésie spatiale du CNES a développé un nouveau traitement : l'Integer Precise Point Positioning (iPPP) ou Precise Point Positioning Ambiguity Resolution (PPPAR). Ce traitement va permettre de résoudre les ambiguïtés entières avec un temps de convergence très court grâce à la connaissance des biais électroniques des satellites et des récepteurs, et grâce à l'utilisation d'horloges et d'orbites qui conservent la nature entière des ambiguïtés (Loyer et al., 2012). Ces éphémérides sont distribuées par le GRGS. Celles utilisées dans nos traitements sont fournies dans un délai de deux semaines avec une fréquence de 5 min pour les orbites et de 30 secondes pour les horloges. La précision des orbites calculées par le GRGS est d'environ 2 cm (Serthelon, 2020).

Le traitement IPPP est réalisable grâce au logiciel GINS-PC du CNES/GRGS. Il s'agit d'un logiciel de calcul d'orbite et de positionnement précis capable de traiter tout type d'observation géodésique.

Lors d'un traitement, GINS-PC va prendre en entrées le fichier d'observation et un fichier directeur qui va contenir les différents paramètres de calculs du traitement¹. A L'issue des calculs trois fichiers sont créés : un fichier solution² (.sol), un fichier statistiques (.stats) et un fichier listing (.li). Le fichier solution contient le résultat des calculs des coordonnées du récepteur GNSS à une fréquence de 1 Hz, qui est la fréquence maximale calculable avec GINS. Nous obtenons dans ce fichier à chaque date les coordonnées dans trois projections différentes du système ITRF2014 (coordonnées cartésiennes XYZ, coordonnées géographique FLH, position dans le repère local ENV), avec leurs variances et covariances. Dans le fichier statistiques sont comprises diverses informations par observation telles que le nom du satellite, son élévation, la date, etc. Enfin, le fichier listing récapitule les étapes du traitement réalisé avec GINS-PC.

L'iPPP a déjà prouvé qu'il obtenait de meilleures performances que le PPP en statique (Perosanz et al., 2014). Cependant cette technique de positionnement est encore peu utilisée en cinématique et encore moins dans le cas d'un vol avec LiDAR aéroporté, sa précision reste donc à déterminer.

III.3 Analyse des trajectoires calculées par traitement iPPP

Pour déterminer la qualité d'un positionnement iPPP du LiDAR aéroporté, le vol au-dessus de Rouen avec deux récepteurs GNSS (AVIO et BASE) a été traité. Les trajectoires des deux antennes ont été déterminées avec le traitement iPPP grâce au logiciel GINS et en DGPS.

III.3.1 Le traitement des trajectoires

Dans un premier temps, les trajectoires des deux antennes ont été traitées grâce à GINS-PC. Pour cela, les marées n'ont pas été prises en compte dans les paramètres de

¹ Voir Annexe n°1

² Voir Annexe n°2

calculs. De plus, les éphémérides du GRGS ont été utilisées ainsi que le modèle empirique Global Pressure and Temperature (GPT2) et la fonction de mapping Vienna Mapping Functions (VMF1). Toutes ces informations se retrouvent dans le fichier directeur du traitement. Des échanges avec Hugo Meunier, ingénieur d'étude au CNES de Toulouse, ont permis de se rendre compte de plusieurs erreurs dans notre traitement.

Tout d'abord, afin d'obtenir les fichiers RINEX d'observations avec une fréquence de 1 Hz, le logiciel RTK Conv avait été utilisé. Or cette méthode arrondit les valeurs des observations. Les échantillonnages ont donc été refaits en utilisant la commande `teqc` (Translation Editing and Quality Check) sur linux.

Ensuite, la courte durée de la campagne (environ 1h30) impose de changer le nombre de calculs de biais troposphériques par jour. Celui-ci est fixé automatiquement à 12 par jour par GINS, soit un calcul de biais une fois toutes les deux heures. Cette valeur avait été laissée mais elle est inadaptée vis-à-vis de la durée de vol. En effet, bien que la SHD ait une variation lente (1 cm/6h), la SWD va au contraire avoir une variation temporelle rapide (quelques cm/h) (Morel, 2021a). Le nombre de biais calculés (`nb_adjusted_biases_per_day_per_station`) a été fixé ensuite à 192 afin que minimum 12 corrections soient calculées le temps du vol.

Malgré l'utilisation du même fichier directeur d'Hugo Meunier³ et des mêmes fichiers d'observations, nous nous sommes rendu compte d'une différence moyenne de positionnement de 5 mm entre les solutions calculées par Hugo Meunier sur GINS et celles calculées par nous sur GINS-PC. De plus, nos résidus sur les phases étaient importants, supérieurs au mètre. L'origine de cette erreur n'a pu être trouvée, donc les résultats utilisés pour l'évaluation des trajectoires iPPP sont ceux calculés à Toulouse sur GINS. La correction troposphérique est alors faite via la donnée grille VMF1 et la fonction de mapping VMF1.

Avant de comparer les trajectoires iPPP avec les trajectoires DGPS, il est possible d'avoir une première évaluation de la trajectoire calculée à l'aide des sorties de GINS. Tout d'abord le fichier `.sol` contient la variance sur la composante hauteur ellipsoïdale (`h`) ce qui nous permet de déterminer l'écart type sur `h`. Celui-ci est de 1.26 cm +/- 0.07 cm pour l'antenne AVIO et il est de 1.11 cm +/- 0.06 cm pour l'antenne BASE, ce qui constitue une bonne précision peu dispersée.

³ Voir Annexe n°1

Ensuite, le fichier .li donne des informations sur le déroulement du traitement. 100% des ambiguïtés ont été fixées sur la constellation GPS pour les deux antennes, ce qui est un très bon résultat dans le cadre d'une trajectoire iPPP. De plus, les deux antennes ont observé un nombre suffisant de satellites puisque 11 satellites GPS et 10 GLONASS ont été observés par l'antenne AVIO et ce sont 15 satellites GPS et 11 GLONASS qui le furent par l'antenne BASE. Cependant, bien qu'il n'y ait pas de trou de mesure sur les observations de l'antenne AVIO, un trou de données de 8 secondes apparaît sur l'antenne BASE à cause d'une interruption de réception par l'antenne.

Enfin, le fichier .stats contient les résidus sur les phases pour les constellations GPS et GLONASS. Ceux-ci sont compris entre - 4 cm et 4 cm sur la constellation GPS et entre - 5 cm et 5 cm sur la constellation GLONASS pour les deux antennes⁴.

Malgré un saut sur l'antenne BASE, nous pouvons donc dire que les traitements réalisés et les données acquises sont fiables et nous permettent d'évaluer la qualité des trajectoires iPPP.

Concernant les trajectoires DGPS des deux antennes, celles-ci avaient été calculées par Olivier Monfort (ingénieur d'étude à l'université de Caen) dans un premier temps en utilisant un angle de coupure de 12.5°. Cependant les trajectoires ayant été calculées en iPPP avec un angle de coupure de 8°, ces trajectoires ont dû être recalculées avec ce même angle dans les paramètres de calculs. Le trou de données pour le récepteur AVIO a eu un impact dans le calcul différentiel, puisque les ambiguïtés n'ont pas réussi à être fixées sur la fin de la trajectoire. Les trois dernières lignes sont donc inexploitable. Les coordonnées obtenues pour la trajectoire DGPS sont dans le système de référence RGF93 suivant le temps GPS. Selon l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN, 2022) le système RGF93 correspond à l'ETRF2000 époque 2019.0.

Avant de comparer les hauteurs ellipsoïdales obtenues en iPPP et en DGPS, nous avons dû convertir les coordonnées DGPS en ITRF 2014 grâce au convertisseur de l'EUREF Permanent GNSS Network (disponible sur <https://www.epncb.oma.be>). De plus, l'échelle de temps utilisée pour la trajectoire iPPP étant le Temps Atomique International (TAI), les TAI de cette trajectoire ont été passés en temps GPS en leur soustrayant 19 secondes.

⁴ Voir Annexes n°3 à 6

III.3.2 Analyse de la trajectoire à partir de l'expérience des deux antennes

Une première évaluation de la qualité des trajectoires iPPP peut être réalisée en observant la distance séparant les deux antennes.

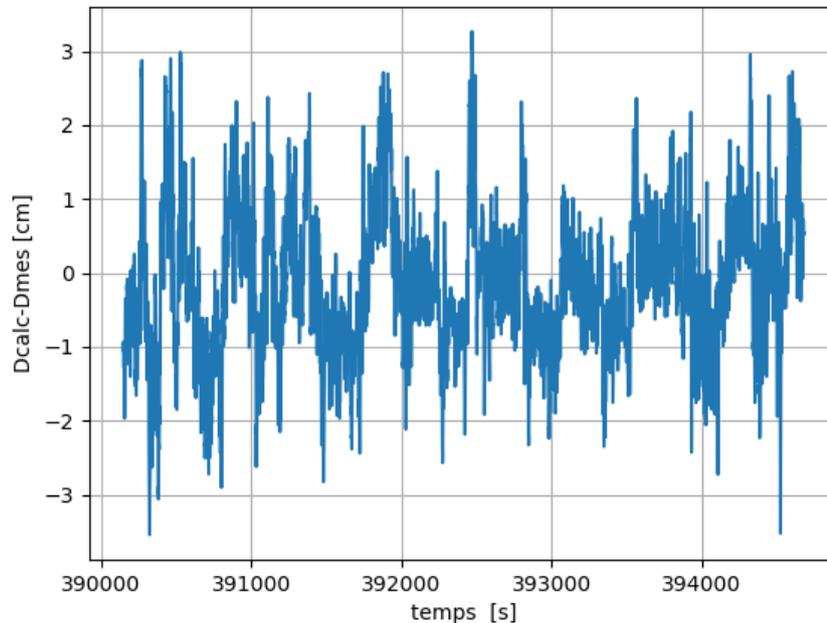


Figure 11 : Différences des distances entre les antennes calculées en iPPP avec la distance mesurée

Sur l'ensemble de la trajectoire, la distance calculée entre les deux antennes grâce aux trajectoires iPPP est en moyenne de 31.46 cm. La distance réelle séparant les antennes a été mesurée à l'aide d'un tachéomètre, elle est de 31.60 cm. Donc la différence moyenne entre la distance calculée en iPPP entre les deux antennes (D_{calc}) et celle mesurée (D_{mes}) est de -1.4 mm avec un écart-type de 1 cm, ce qui est un très bon résultat.

Nous pouvons observer sur la figure 11 que la différence entre les deux distances varie de 3 cm autour de 0 cm au cours du temps. Ces observations ressemblent aux résultats qu'avait obtenus Romain Serthelon lors de son travail de fin d'études au laboratoire M2C. Ce dernier avait disposé deux antennes GNSS au-dessus d'une voiture Kangoo. Les trajectoires des deux antennes avaient été traitées en iPPP et en DGPS. Et les mêmes différences avaient été réalisées. La différence moyenne entre la distance calculée iPPP et celle mesurée entre les deux antennes était de 1 mm avec un écart-type de 1.9 cm (Serthelon, 2020). Donc les résultats obtenus sur le vol de Rouen sont cohérents.

Sur la figure 11, il est possible d'observer que les variations de la différence $D_{calc}-D_{mes}$ sont de manière générale comprises entre -2 et 2 cm, cependant apparaissent des pics

à 3 cm. Ces derniers peuvent correspondre aux virages/changements de direction effectués par l'avion, qui peuvent engendrer momentanément des pertes de satellite (une aile de l'aéronef peut gêner la visibilité) qui causent alors une dégradation de la précision. Pour éliminer le biais lié à ce phénomène qui n'apparaîtra pas sur les mesures LiDAR (puisque le système n'est pas en acquisition lors des virages), les différences sur les dix passages effectués sur lignes droites lors du vol ont été isolées.

Passage	Moyenne (cm)	Ecart-type (cm)	RMS (cm)
1	-1.62	0.61	1.73
2	-0.98	0.36	1.04
3	1.66	0.59	1.76
4	-0.14	0.32	0.35
5	-0.19	0.62	0.65
6	-0.31	0.47	0.57
7	0.66	0.4	0.77
8	0.15	0.38	0.41
9	-0.73	0.68	0.99
10	0.75	0.37	0.83
Moyenne des valeurs absolues	0.72	0.48	1.01

Tableau 2 : Différences des distances entre les antennes calculées en iPPP avec la distance mesurée suivant les passages

Sur les lignes la différence entre D_{calc} et D_{mes} est en moyenne de 7.2 mm avec un écart-type de 4.8 mm (voir tableau 2). Ainsi sur les lignes l'écart-type est réduit par deux par rapport à celui de l'ensemble de la trajectoire.

Cette première expérience permet d'envisager une précision centimétrique pour la trajectoire iPPP. Pour réellement statuer sur cette qualité de trajectoire il faudrait comparer les trajectoires iPPP avec deux trajectoires de référence.

III.3.3 Comparaison des trajectoires iPPP et DGPS

Dans un second temps les trajectoires iPPP ont été comparées avec les trajectoires DGPS pour les deux antennes.

Tout d'abord, nous avons effectué la même expérience sur la distance séparant les deux antennes mais en utilisant les trajectoires DGPS. Le graphique de la différence entre la distance calculée en DGPS et la distance mesurée a aussi été réalisé⁵. Cette comparaison permet d'observer que la trajectoire DGPS est plus précise que la trajectoire iPPP, puisque la différence entre D_{calc} et D_{mes} est moins importante. En effet, la différence moyenne sur

⁵ Voir Annexe n°7

toute la trajectoire est de 3 mm avec un écart type de 6 mm. Soit un écart type moins important que pour les trajectoires iPPP. Cette comparaison justifie donc l'utilisation des trajectoires DGPS comme trajectoires de référence.

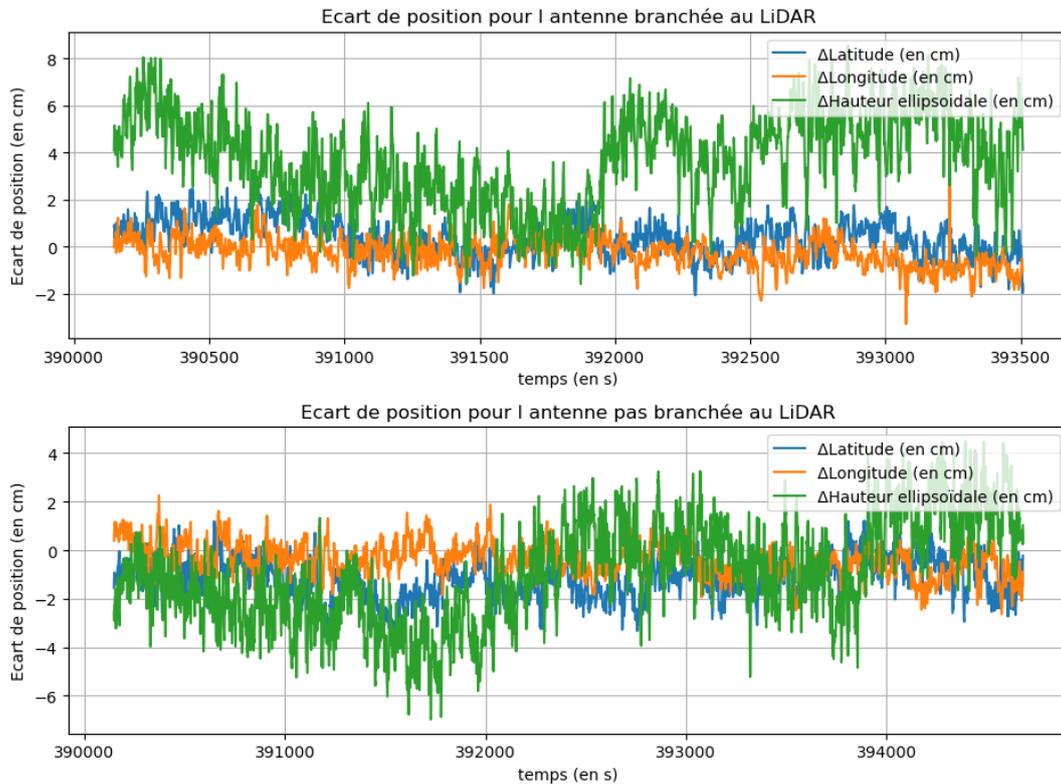


Figure 12 : Différences des trajectoires iPPP et DGPS pour les deux récepteurs et suivant les coordonnées géographiques

Ensuite, la figure 12 permet d'observer que pour la longitude et la latitude, la différence entre les trajectoires iPPP et DGPS est inférieure à 2 cm pour les deux récepteurs. De plus, cette différence sur la hauteur ellipsoïdale est inférieure à 9 cm pour le récepteur AVIO et à 7 cm pour le récepteur BASE.

Dans le cadre de la CalVal de SWOT, la coordonnée qui nous intéresse est la hauteur ellipsoïdale puisque c'est à partir d'elle qu'est formée la SSH. Le tableau 3 permet de constater que pour l'antenne branchée au LiDAR, l'écart moyen entre les deux trajectoires sur la hauteur ellipsoïdale est de 3.68 cm avec un écart-type de 1.94 cm et un RMS de 4.16 cm. Pour le récepteur BASE, ces valeurs sont respectivement de -1.0 cm, 2.08 cm et 2.31 cm. Ces deux résultats sont satisfaisants, puisque nous pouvons déduire de cela une précision de l'ordre de 5 cm pour le positionnement iPPP.

	Antenne branchée au Lidar			Antenne non branchée au Lidar		
	Δ Lat	Δ Long	Δ H	Δ Lat	Δ Long	Δ H
Moyenne (cm)	0.38	-0.27	3.68	-1.18	-0.38	-1.0
RMS (cm)	0.89	0.68	4.16	1.42	0.79	2.31
Ecart-type (cm)	0.81	0.62	1.94	0.8	0.69	2.08
Ecart max (cm)	2.99	3.75	8.54	3.74	2.64	6.98

Tableau 3 : Les statistiques suivant les coordonnées sur la différence entre les trajectoires iPPP et DGPS

Comme pour la comparaison utilisant la distance séparant les deux antennes, les différences entre les trajectoires iPPP et DGPS ont été observées uniquement sur les différents passages sur les lignes⁶. Le tableau 4 permet d'obtenir les statistiques moyennes obtenues sur les lignes pour chaque récepteur.

	Antenne branchée au Lidar	Antenne non branchée au Lidar
Moyenne (cm)	3.7	1.86
Ecart-type (cm)	1.20	1.15
RMS (cm)	3.95	2.29

Tableau 4 : Les statistiques sur la hauteur ellipsoïdale concernant la différence entre les trajectoires iPPP et DGPS sur les lignes

En comparaison avec la trajectoire en entière, nous allons obtenir des écart-type moins importants sur les lignes, puisque que pour le récepteur AVIO la moyenne des différences entre les trajectoires iPPP et DGPS sur les lignes est de 3.7 cm avec un écart type de 1.20 cm. Ces valeurs sont respectivement de 1.86 cm et 1.15 cm pour le récepteur BASE. De plus le RMS sur les deux récepteurs est inférieur à 4 cm ce qui nous permet d'envisager une précision inférieure à 5 cm.

Pour conclure, le traitement iPPP pour déterminer la position du LiDAR aéroporté apparaît comme être une bonne alternative au traitement DGPS, car aucune contrainte n'est imposée sur la distance à la côte. Par ailleurs, cela peut alléger le déploiement opérationnel en évitant l'installation d'une éventuelle base GPS. De plus, cette technique permet d'obtenir une précision sur le positionnement de l'ordre du centimètre, ce qui permet d'envisager l'étalonnage d'un altimètre.

⁶ Voir Annexe n°8

IV Méthode d'étalonnage d'un altimètre spatial à partir de données LiDAR

Le LiDAR aéroporté permet d'envisager deux méthodes pour étalonner l'altimètre SWOT : la comparaison des spectres directionnels de vagues et la comparaison des SSH mesurées in-situ et par SWOT. La deuxième technique a été étudiée dans ce rapport à l'aide de Sentinel-3A.

IV.1 Les produits de Sentinel-3A

Le satellite Sentinel-3A s'inscrit dans le programme Copernicus, qui est le résultat d'un projet entre l'Union européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA) visant à obtenir des observations de la Terre indépendantes. Selon le CNES, Sentinel-3A a pour objectifs de mesurer la topographie des océans, la couleur de la surface des océans et du sol ainsi que leur température. Enfin, son but est de fournir une aide aux décideurs et utilisateurs de services maritimes (CNES, 2022a). Un des points communs que partage Sentinel-3A avec le future altimètre SWOT, est son appui sur le principe du SAR pour son radar altimétrique. Le satellite de SWOT n'ayant pas encore été lancé, l'altimètre Sentinel-3A a servi de référence afin d'évaluer la possibilité d'une utilisation du LiDAR aéroporté dans le cadre de la CalVal de SWOT.

IV.1.1 Les méthodes d'acquisition de Sentinel-3A

Le radar altimétrique de Sentinel-3A (Synthetic Aperture Radar Altimeter, SRAL) fonctionne sur deux fréquences (les bandes Ku et C) et est un radar nadir capable de fonctionner selon deux modes : le mode Low resolution (LRM) et le mode SAR. La principale différence entre les deux modes repose sur la forme de l'empreinte, qui va être circulaire et dont le diamètre va dépendre de la SWH si le radar fonctionne en LRM, alors qu'en mode SAR l'empreinte sera rectangulaire avec une longueur de 300 m le long de la trace et une largeur qui dépendra aussi de la SWH (Bonfond et al., 2018).

En mode LRM, l'altimètre va émettre une série d'impulsions à une fréquence moins élevée qu'en SAR (2000 impulsions par secondes contre 18 000), cela va permettre de couvrir un rayon d'environ 20 km autour du nadir du satellite.

Le second mode utilisé par Sentinel-3A est issu d'une technologie développée depuis peu. En effet, le SAR a été utilisé pour la première fois en 2010 lors de la mission CryoSat-2. Dans cette configuration, le radar SRAL va utiliser l'effet Doppler afin de déterminer le range. Plus précisément, le satellite étant en mouvement, la fréquence des signaux réfléchis reçus va varier selon leur provenance de l'arrière, du dessous ou du devant de la trace. Par exemple, si le réflecteur se situe à l'arrière de la trace, la fréquence reçue sera moins élevée qu'au nadir, car le satellite s'éloigne de ce point (CNES, 2022a). Il va alors être possible de distinguer des bandes doppler perpendiculaire à la trace sur l'empreinte du radar (voir figure 13).

L'utilisation de la technologie SAR va comporter des contraintes sur l'imagerie, car plusieurs erreurs vont apparaître au niveau de la géométrie des images : effets de compression, ombre ou encore repliement (Richard, 2016) et aussi du speckle. En utilisant les mesures obtenues sur les bandes doppler suivant différentes fréquences, il va être possible de réduire ce bruit de chatoiement.

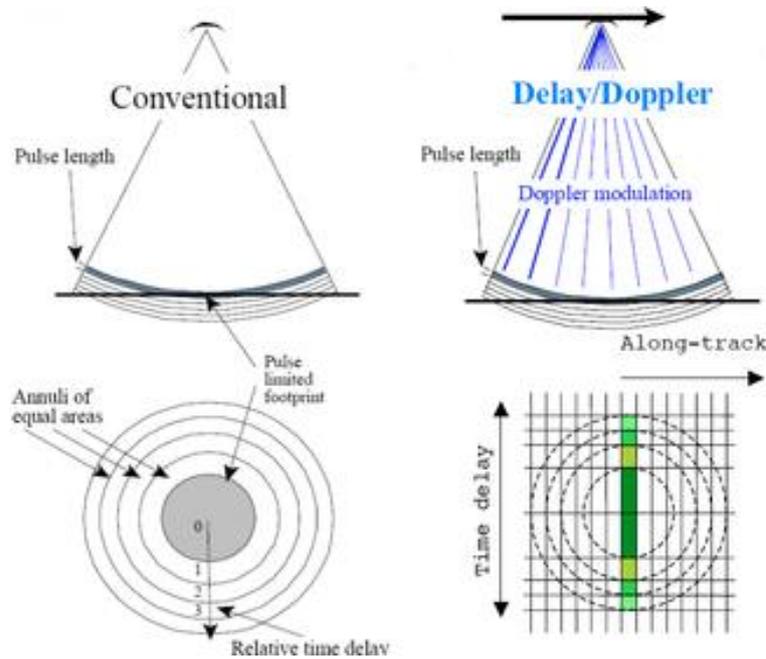


Figure 13 : Illustrations des modes LRM (à gauche) et SAR (à droite) utilisés par Sentinel-3A (CNES, 2022a).

La méthode SAR va donc améliorer à la fois la précision des mesures et la résolution spatiale comparée à l'altimètre conventionnel, puisque d'une part le bruit sera réduit et il y aura moins de contamination de la terre au niveau des côtes et d'autre part la résolution spatiale va passer à 300 m contre 7 km.

IV.1.2 Le traitement des données de Sentinel-3A

Une fois collectées par Sentinel-3A, les données sont transférées à des stations aux sols. L'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EumetSAT) est chargée de recueillir ces données, de les traiter et de les diffuser.

EumetSAT diffuse trois types de fichier qui correspondent à trois délais différents. Les fichiers NRT (Near Real-Time) sont diffusés 3 heures après l'acquisition par l'altimètre, les fichiers STC (Slow-Time Critical) 48 heures après et les fichiers NTC (Non-Time Critical) un mois après. Ce qui les différencie, en plus du temps de latence, ce sont les retraitements qui leur sont appliqués, ils sont plus précis suivant le temps écoulé. Par exemple, les fichiers NTC comportent des orbites précises contrairement aux fichiers STC ou NRT. Il sera donc plus intéressant d'utiliser les fichiers NTC pour leur précision lors de notre comparaison.

Ensuite, EumetSAT produit différents niveaux de produits. Tout d'abord, les données du Niveau 0 correspondent aux données brutes du satellite sans aucuns traitements. Les seules modifications réalisées concernent la conversion des unités de mesures dans celles du système international, la correction de l'heure et de la date et la localisation des levés (Serthelon, 2020). Ce niveau n'est pas disponible aux utilisateurs et est seulement considéré comme une entrée dans les chaînes de traitement pour sortir les niveaux supérieurs d'après EumetSAT.

Le Niveau 1 contient les produits du Niveau 0 corrigés des erreurs instrumentales. Trois principales chaînes de traitement vont agir pour passer du Niveau 0 au Niveau 1 : la chaîne LRM, la chaîne SAR et la chaîne Pseudo-Low Rate Mode PRLM. Il existe différents Niveaux 1 (L1A, L1B, L1B-S) suivant les corrections appliquées.

Le produit de Niveau 2 correspond au produit L1B corrigé des effets géophysiques. Pour cela trois chaînes principales de traitement sont appliquées aux données de niveau L1B : le calcul des paramètres géophysiques et environnementaux, le retracking et le calcul des paramètres physiques et enfin le calcul du niveau 2 des traitements géophysiques de l'altimètre et du radiomètre.

Il existe un dernier niveau, mais celui-ci va prendre en compte plusieurs missions altimétriques. Ce niveau ne nous intéresse donc pas dans le cadre de notre comparaison (EumetSAT, 2017).

D'autres traitements ont été développés pour contrer les failles du traitement SAR. En effet, plusieurs problèmes ont été constatés avec ce traitement. Notamment, il a pu être observé que la houle a pour conséquence de produire un bruit sur l'estimation de l'état de mer, ce qui empêche donc d'accéder à la hauteur significative de l'eau. Les plus gros impacts sont observés pour des grandes longueurs d'onde (supérieur à 100 m) et lorsque le champ de houle se propage parallèlement à la trajectoire du satellite. Une solution serait d'élargir l'empreinte pour la rendre moins sensible à l'état de surface à l'échelle des houles. C'est dans cette optique que le CNES a développé un nouveau traitement Low Resolution with Range Migration Correction (LR-RMC). Ce traitement est très similaire à celui du SAR, ce qui a permis une implémentation facile dans le Sentinel-3 processing prototype (S3PP) du CNES qui est une chaîne de traitement développée par le CNES permettant de passer les données de Niveau 1 à un Niveau 2. Comme l'illustre la figure 14, le traitement LR-RMC va impliquer un moyennage plus simple, puisque dans ce traitement, tous les faisceaux issus d'un cycle radar (4 salves de 64 rayons) sont additionnés de manière incohérente pour former une forme d'onde à regards multiples (Moreau et al., 2021). Ce traitement permet de réduire de 10% à 20% le bruit sur le range et la hauteur de vagues et a des performances stables quel que soit la houle (Boy, 2017). L'empreinte au sol du traitement LR-RMC est très différente de celle du SAR, puisqu'elle correspond à un disque ayant un diamètre d'environ 10 km. Soit une empreinte beaucoup plus grande que celle du traitement SAR. Matthias Raynal, ingénieur au CNES, nous a aidé à accéder aux résultats des traitements du CNES et à les comprendre. Selon lui, le changement d'échelle pour réaliser le traitement LR-RMC pose des questions sur une éventuelle perte de signal à la place d'une réduction du bruit. De plus, du fait notamment de sa grande empreinte, l'utilisation du traitement LR-RMC est recommandée au niveau des océans mais pas sur les zones côtières ou en hydrologie par exemple.

Le CNES a aussi implanté le traitement SAR dans le S3PP mais avec deux options. La première option est le sur-échantillonnage de la forme d'onde par l'utilisation de zero-Padding pour pallier le manque de résolution. La seconde option est l'utilisation d'une fenêtre de Hamming qui permet d'atténuer les échos parasites dus à l'effet de lobes secondaires. Cet effet apparaît uniquement sur des surfaces complexes (Laforge et al., 2021), par conséquent selon Matthias Raynal le traitement zero-Padding Hamming sera plus adapté pour les régions côtières.

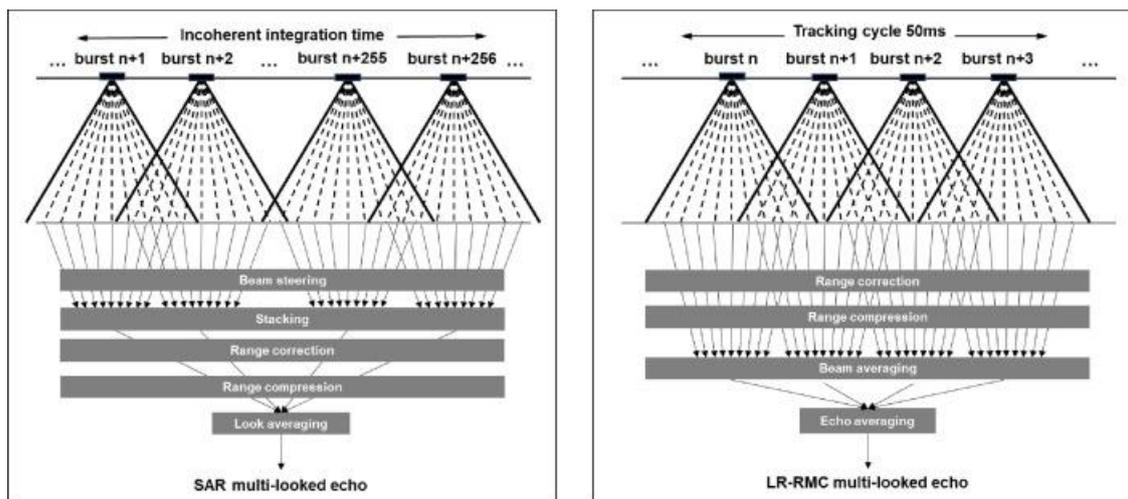


Figure 14 : Comparaison entre les étapes du traitement SAR (à droite) et celles du traitement LR-RMC (à gauche). (Moreau et al., 2021)

IV.1.3 Les données de Sentinel-3A utilisées pour l'étalonnage

Afin de comparer les mesures du LiDAR faites au large du Cotentin avec celles de Sentinel-3A, les SSH de Sentinel-3A ont été formées à partir de 3 sources différentes.

Tout d'abord, à partir de la base de EumetSAT, deux données ont été téléchargées, dont un fichier .ntc contenant des données de Niveau 2 pour une fréquence de 1 Hz. Le retracker utilisé dans ce fichier est *ocean*. De plus, de EumetSAT a été obtenu un fichier .ntc contenant des données de Niveau 2 mais avec une fréquence à 20 Hz, le retracker pour celui-ci est *OCOG*.

Ensuite, des données du Centre de données et services satellites AVISO ont été exploitées. Ce centre, qui a pour mission d'exploiter les données altimétriques, est basé à Toulouse et est piloté par le CNES. Il se compose de deux entités : AVISO (Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques) et le Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH). Les données de Sentinel-3A traitées par le centre sont disponibles sur son site web AVISO+ à travers une requête sur le logiciel ALTiS. La sortie d'ALTiS obtenue est une donnée de Niveau 2 à une fréquence de 20 Hz. Le fichier obtenu pour la comparaison contient différentes valeurs d'altitude de la surface de la mer, car plusieurs trackers ont été appliqués, dont : *ice1*, *ocean*, *sea ice*, etc. Les corrections présentes sur cette donnée sont les mêmes que pour la donnée de EumetSAT à 20 Hz comme le montre le tableau 5.

Enfin, les données pour les traitements SAR zero-Padding Hamming et LR-RMC ont été récupérées sur le centre de calcul du CNES, via un notebook (cahier électronique rassemblant texte, code, image etc.) sur leur Jupyterhub. Les trackers utilisés pour traiter

ces données sont tous deux issus du S3PP. Ensuite, tout comme les données de CTOH et une de EumetSAT, la fréquence est de 20 Hz. La particularité de cette dernière source est qu'elle propose plusieurs corrections pour la troposphère et l'ionosphère pour former les SSH.

Les corrections géophysiques présentes et appliquées vont changer suivant la base de données comme le récapitule le tableau 5. Ainsi, pour la correction du délai dû à l'ionosphère, celle-ci peut être issue de la global ionosphere map (GIM), ou être calculée à partir des mesures sur doubles fréquences ou encore des mesures réalisées par le radiomètre. La correction pour la partie de la troposphère humide peut être quant à elle, déduite des mesures du radiomètre, de modèle (tel que ECWMF), ou enfin en utilisant la température de brillance du radiomètre, le coefficient de rétrodiffusion en bande Ku, la température de la surface de la mer et le taux de décroissance de la température de l'atmosphère avec l'altitude pour calculer sa valeur (cette dernière correction correspond à 'radiomètre+sst+gamma' dans le tableau 5).

BASE de données	EUMETSAT	EUMETSAT	Altis	CNES	CNES
Traitement	Niveau 2 LRM	Niveau 2 SAR	Niveau 2 retraité par CTOH	LR-RMC	SAR option Zero-Padding Hamming
Fréquence	1 Hz	20 Hz	20 Hz	20 Hz	20 Hz
Ellipsoïde de référence	WGS84	WGS84	WGS84	TOPEX	TOPEX
Retracker(s)	Ocean	OCOG	ice1/ice2/ ocean/ocean sar/seaice	S3PP prototype	S3PP prototype
Δ_{iono}	Radiomètre	GIM	GIM	Double fréquence / GIM	Double fréquence / GIM
$\Delta_{tropo_{dry}}$	Modèle altitude 0	Modèle altitude de mesure	Modèle altitude de mesure	ECMWF	ECMWF
$\Delta_{tropo_{wet}}$	Radiomètre	Modèle altitude de mesure	Modèle altitude de mesure	Radiomètre/ ECWMF gauss/ radiomètre+ sst+gamma	Radiomètre/ ECWMF gauss/ radiomètre+ sst+gamma
Correction de l'état de mer	Présente	Absente	Absente	Présente	Présente
Autres	/	Les marées sont comprises dans la SSH calculée	/	/	/

Tableau 5 : Synthèse des données de Sentinel-3A utilisées et des paramètres utilisés dans le calcul de la SSH (EumetSAT, 2021) (CNES, 2022c)

IV.2 Comparaison des données LiDAR avec les données de Sentinel-3A

L'objectif de ce vol est de comparer les valeurs de SSH obtenues avec le LiDAR aéroporté au large du Cotentin, avec celles mesurées par Sentinel-3A. Dans l'optique de réduire le risque de biais, un seul passage mesuré par le LiDAR a été étudié dans un premier temps. Il s'agit de celui le plus synchronisé avec le vol de Sentinel-3A.

Afin de réaliser les comparaisons, le fichier .las ainsi que les produits de Sentinel-3A contenus dans des fichiers .ntc, sont importés dans un Notebook. Ensuite, les fichiers .ntc sont filtrés de façon à ne conserver que les points mesurés qui se situent dans la zone survolée par le LiDAR. Les données de Sentinel-3A étant en coordonnées géographiques dans le système de référence WGS84, les données du LiDAR ont dû être converties dans le même système pour effectuer des comparaisons.

13 variables SSH de Sentinel-3A ont été créées grâce aux différentes sources. Ces SSH ont été construites de manière à être comparables à la hauteur d'eau mesurée par le LiDAR aéroporté (voir infra IV.2.1.1).

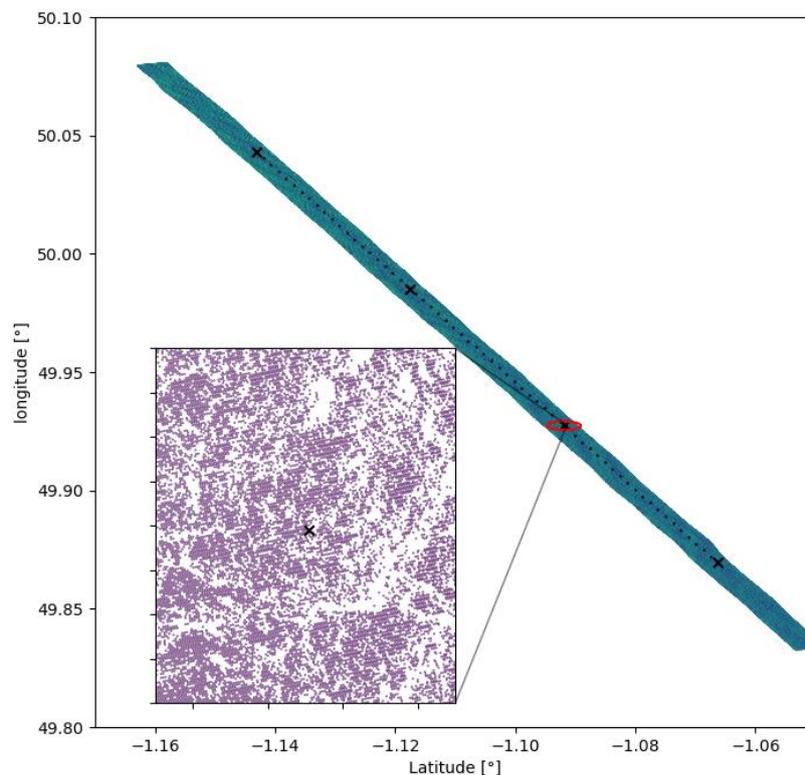


Figure 15 : Représentation d'un buffer autour d'un point de la donnée de Eumetsat à 1 Hz sur le nuage de point du passage synchronisé avec Sentinel-3A

Pour chaque localisation (longitude et latitude) où une SSH de Sentinel-3A a été mesurée, une zone tampon (buffer) a été générée (voir la figure 15). Pour chacune de ces zones, nous avons moyenné la hauteur ellipsoïdale des points mesurés au LiDAR compris dans la zone. Ceci a donc permis de créer des SSH moyennées pour la mesure LiDAR. 4 SSH du LiDAR sont associées à la donnée d'EumetSAT à 1 Hz, pour la donnée de CTOH 60 SSH ont été générées et pour la donnée du CNES 59 SSH du LiDAR ont été calculées sur ce passage. Les méthodes de construction de la forme d'onde différant entre EumetSAT et les prototypes du CNES, les temps et les localisations des points SSH sont aussi différents. Donc des buffers différents ont dû être générés centrés sur les points de chacun de ces deux traitements.

Une fois les SSH calculées, un biais du LiDAR a été déterminé pour chacune des SSH de Sentinel-3A. Ce biais correspond à la moyenne des différences de SSH (entre les mesures de Sentinel-3A et du LiDAR) le long de la trace.

IV.2.1 La formation des SSH

IV.2.1.1 La formation des SSH mesurées par Sentinel-3A

Les paramètres compris dans les bases de données permettent de former des SSH mesurées par Sentinel-3A plus ou moins comparables avec celles du LiDAR. La SSH formée avec Sentinel-3A doit avoir pour formule :

$$SSH = H - R - \Delta_{iono} - \Delta_{tropo} - pole\ tides - ssb \quad (1)$$

Pour la donnée de EumetSAT à une fréquence de 1 Hz, les mêmes paramètres de l'équation (1) sont présents pour former une SSH. Cependant, pour la donnée à 20 Hz d'EumetSAT, en plus du temps, de la latitude et de la longitude, seulement une élévation nous a été directement fournie. Elle comprend les marées mais pas la correction liée à l'état de mer (*ssb*). Donc, la SSH formée avec la donnée de EumetSAT à 20 Hz a pour formule :

$$SSH_{EumetSAT} = H - R - \Delta_{iono} - \Delta_{tropo} - pole\ tides + marées$$

Le paramètre *marées* inclut les marées terrestres, océaniques, la correction de la surcharge atmosphérique, etc.

Pour la donnée de CTOH à une fréquence de 20 Hz, la correction liée à l'état de mer (*ssb*) manque dans les variables, par conséquent la SSH formée de CTOH a pour formule :

$$SSH_{CTOH} = H - R - \Delta_{iono} - \Delta_{tropo} - pole\ tides$$

Le manque de la correction *ssb* peut avoir une importance dans les comparaisons, puisque celle-ci a une valeur d'environ -6 cm sur la radiale si on regarde la donnée du traitement SAR option zero-Padding Hamming.

Enfin, pour les SSH issues des traitement LR-RMC et SAR option zero-Padding Hamming, la base de données du CNES permet de reconstituer l'équation (1). Cependant, lors de premières comparaisons nous nous sommes aperçus d'un écart de 70 cm entre la SSH du Lidar et celle des deux traitements. Un échange avec Matthias Raynal (CNES), nous a permis d'apprendre l'utilisation de l'ellipsoïde TOPEX dans les traitements par le CNES, d'où cet écart de hauteur. Afin de corriger cette différence, la variable 'ELLIPSOID_REF_CORRECTION.ALTI.ESA_TO_CNES' a été soustraite dans la formation de la SSH. Cette variable est notée Δh_{ell} dans l'équation suivante reprenant les variables prises pour la formation de la SSH des traitements LR-RMC et SAR option zero-Padding Hamming.

$$SSH_{CNES} = H - R - \Delta_{iono} - \Delta_{tropo} - pole\ tides - ssb - \Delta h_{ell}$$

Il est à noter que les valeurs de *ssb* sont différentes et disponibles pour ces deux traitements.

Les valeurs de R vont différer suivant le retracker et le traitement utilisé. De plus, plusieurs valeurs de Δ_{iono} , Δ_{tropo} , *pole tides* et *ssb* peuvent être disponibles dans la base de données utilisée (voir le tableau 5).

Dans la base de données du CNES, sont présentes plusieurs variables pour la correction du délai ionosphérique et du délai troposphérique dans la partie humide. La figure 16 montre que l'écart maximal entre les deux corrections possibles du délai ionosphérique est inférieur à 1 mm, alors que cet écart est de l'ordre du centimètre pour les différentes corrections du délai troposphérique. Par conséquent, une seule correction ionosphérique a été utilisée pour calculer les SSH des traitement SAR option zero-Padding Hamming et LR-RMC : la correction utilisant les doubles fréquences. Cependant, à cause de l'écart important

entre les corrections troposphériques, 6 variables SSH ont été formées avec les données du CNES : 3 variables pour le traitement LR-RMC (chaque SSH utilisant une correction troposphérique différente), et trois pour le traitement SAR option zero-Padding Hamming. 13 variables ont donc été formées en tout.

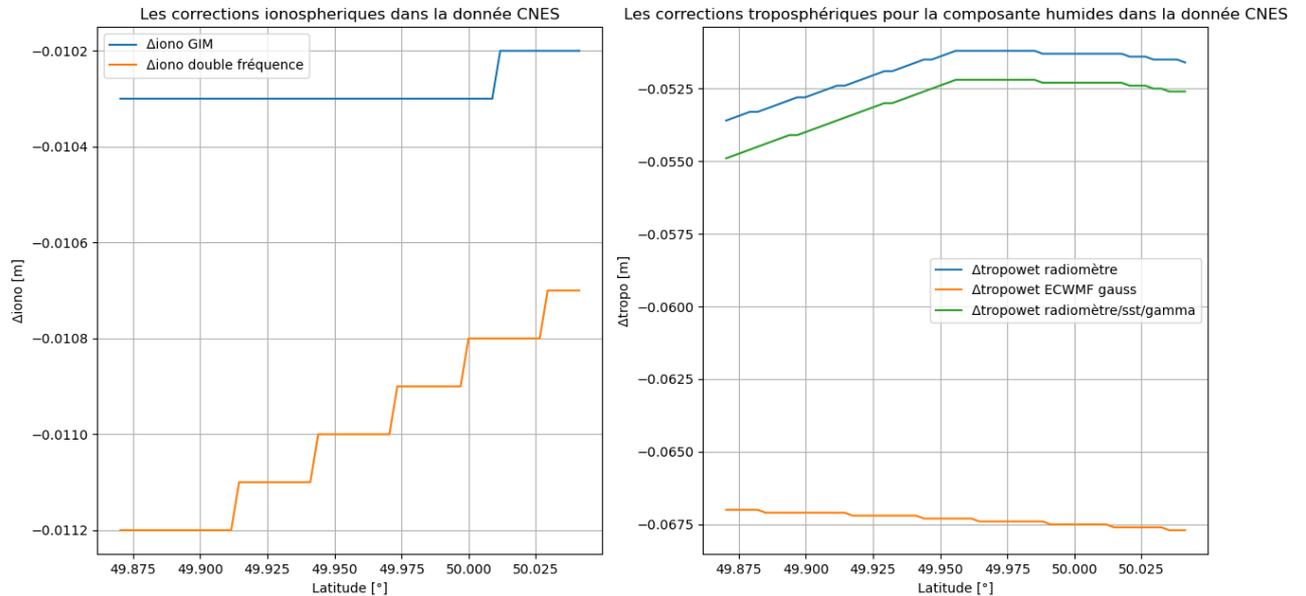


Figure 16 : Les corrections ionosphériques et troposphériques suivant la latitude sur le passage synchronisé avec Sentinel-3A (CNES, 2022c).

IV.2.1.2 La formation de la SSH à partir des mesures LiDAR

Dans un premier temps, nous avons eu accès aux données de EumetSAT et CTOH. Ces deux premières sources ont donc servi d'appui pour déterminer la taille optimale des buffers à utiliser.

Tout d'abord, la représentation des hauteurs mesurées par le LiDAR avec les différentes SSH (voir figure 17), permet de constater que les SSH à 20 Hz de CTOH utilisant le retracker *ocean SAR* et les SSH à 1 Hz de EumetSAT sont les plus en accord avec notre donnée LiDAR. En effet, la figure 17 montre que les SSH des retrackers *ice2*, *ocean* et *ice1* ont un biais proche ou supérieur à 1 m avec les SSH du LiDAR. Ce qui est logique puisque ces retrackers ne sont pas adaptés à cet état de surface. Ensuite, les SSH de EumetSAT à 20 Hz présentent aussi un écart important de l'ordre du mètre avec la donnée du LiDAR, ce qui est dû en grande partie au fait que les marées soient prises en compte dans la formation de ces SSH.

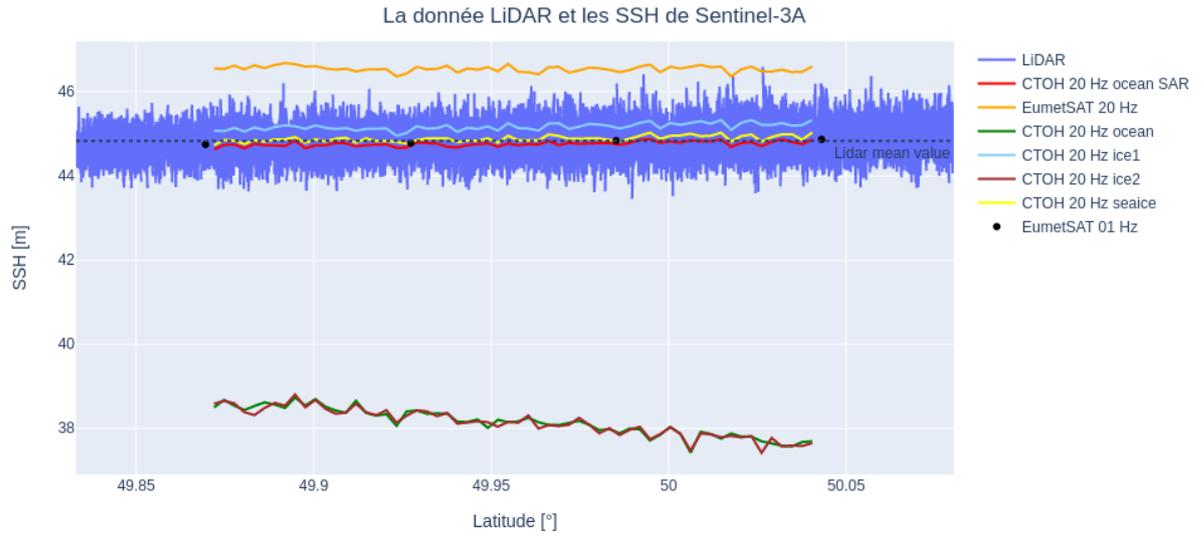


Figure 17 : Les SSH de Sentinel-3A et les mesures LiDAR suivant la latitude sur le passage synchronisé avec Sentinel-3A

L'utilisation d'un buffer de 100 m pour calculer les SSH du LiDAR permet de conclure que les SSH issues du retracker *ocean SAR* sont plus en accord avec la donnée LiDAR (voir Tableau 6). En effet, sur ce passage, le biais moyen entre la donnée LiDAR et de Sentinel-3A est plus faible avec un écart-type et RMS plus petit pour la SSH issu du retracker *ocean SAR* comparé à celle de *sea ice*.

Retracker	ocean SAR	sea ice
Biais (cm)	5.74	-6.50
Ecart-type (cm)	8.54	9.08
RMS (cm)	10.29	11.17

Tableau 6 : Les statistiques sur le biais pour la donnée de CTOH issue des retrackers Ocean SAR et Sea ice

Le biais avec la donnée de CTOH issue du retracker *ocean SAR* est de 5.74 cm. Dans ce biais se retrouve le *ssb* qui n'a pas été retirée lors de la formation des SSH.

Afin d'avoir un plus grand échantillon pour la détermination de la taille de buffer optimale, l'utilisation de la SSH de CTOH issue du retracker *ocean SAR* a été privilégiée à la SSH d'EumetSAT qui a une fréquence de 1 Hz.

Plusieurs tailles de buffer ont été calculées (de 25 m à 500 m) et leurs SSH associées. Pour chaque taille de buffer, les 60 SSH du LiDAR ont été comparées aux 60 SSH de la donnée CTOH. Grâce à la figure 18, il est possible d'observer que le biais est assez stable qu'importe la taille du buffer, mais tend quand même à augmenter plus la taille du buffer est conséquente.

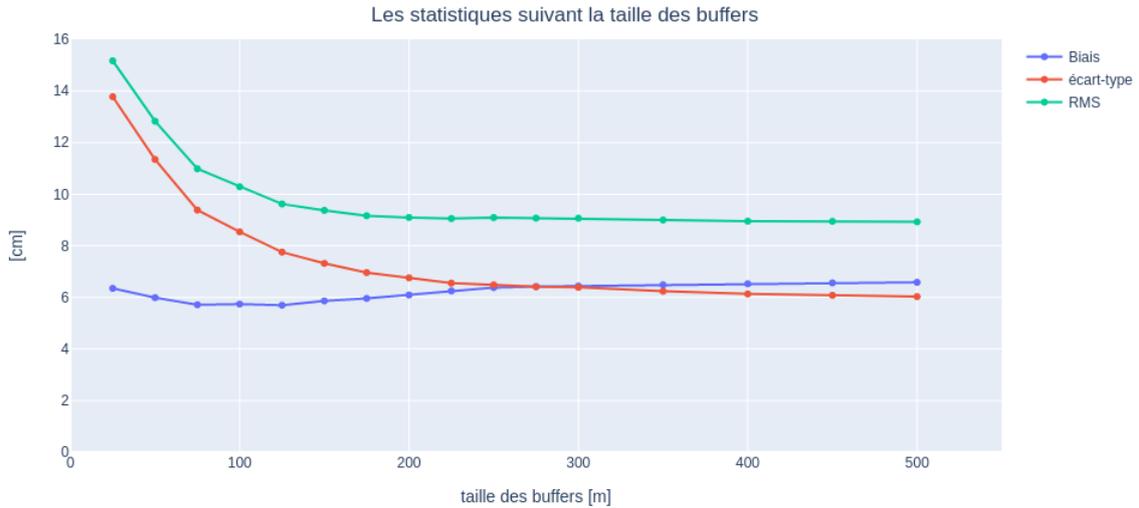


Figure 18 : Les statistiques sur le biais du LiDAR suivant la taille de buffer utilisée

D'un autre côté, l'écart-type et le RMS sur le biais décroissent fortement pour ensuite se stabiliser au niveau de la taille d'un buffer de 300 m où le biais est de 6.44 cm, l'écart-type de 6.39 cm et le RMS de 6.44 cm. Cette valeur de 300 m correspond aussi à la résolution spatiale le long de la trace de Sentinel-3A en mode SAR, donc il y a une cohérence dans ce résultat. C'est donc une taille de buffer de 300 m qui a été utilisée pour comparer les différentes SSH de Sentinel-3A avec les mesures du LiDAR.

IV.2.2 Comparaison des mesures SAR avec les mesures LiDAR

La taille du buffer choisie à 300 m, la comparaison entre les mesures altimétriques SAR et les mesures du LiDAR aéroporté est possible. Pour cette comparaison, ont été incluses les SSH issues des traitements LR-RMC et SAR option zero-Padding Hamming.

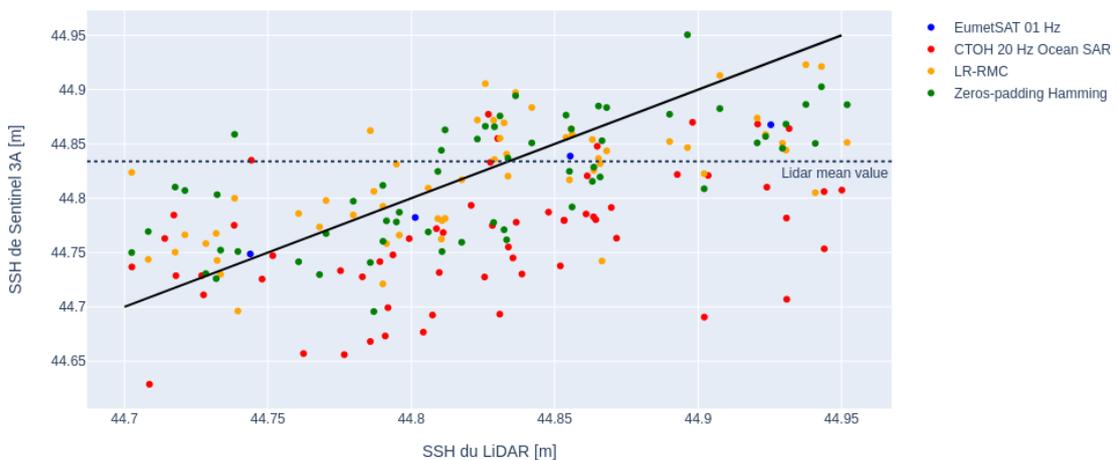


Figure 19 : Représentation des SSH de Sentinel-3A en fonction des SSH du LiDAR associées

Pour chacune des 13 variables de SSH de Sentinel-3A, le biais du LiDAR ainsi que l'écart type et le RMS ont été calculés. De plus, un coefficient de corrélation avec la donnée du LiDAR a été déterminé. Celui-ci correspond à la pente de la régression linéaire passant par 0 de la SSH de Sentinel-3A en fonction de la SSH du LiDAR.

Traitement	Biais (cm)	Écart-type (cm)	RMS (cm)	1-coef de corrélation
Eumetsat 1 Hz	2.21	2.25	3.16	0.000494
Eumetsat 20 Hz	-171.82	10.73	172.16	/
CTOH <i>Ocean SAR</i>	6.44	6.39	9.07	0.001437
LR-RMC radiomètre	0.68	4.94	4.99	0.000152
LR-RMC ECMWF gauss	-0.87	4.90	4.98	0.000128
LR-RMC radiomètre+sst+gamma	0.57	4.94	4.98	0.000193
Zero-Padding Hamming radiomètre	0.86	4.98	5.06	0.000194
Zero-Padding Hamming ECMWF gauss	-0.68	4.95	5.00	0.000151
Zero-Padding Hamming radiomètre+sst+gamma	0.76	4.99	5.04	0.000170

Tableau 7 : Les statistiques sur le biais du LiDAR suivant les traitements des mesures de Sentinel-3A

Les données du tableau 7 ainsi que la figure 19 mettent en évidence le fait que le biais de la mesure LiDAR est moins important avec les traitements LR-RMC et SAR option zero-Padding Hamming. De plus, la correction troposphérique qui semble la plus adaptée, pour ces deux traitements, est celle utilisant le modèle ECMWF. En effet, le coefficient de corrélation est meilleur (plus proche de 1) avec cette correction pour les deux traitements. Ensuite, si nous comparons leur biais et écart-type avec la donnée du LiDAR, le traitement LR-RMC semble plus en accord avec la donnée du LiDAR, puisqu'il est mieux corrélé avec les mesures LiDAR et son écart-type sur le biais est moins important.

Donc en prenant la SSH du traitement LR-RMC avec la correction troposphérique issue d'un modèle, le biais de la mesure LiDAR est de -0.87 cm +/- 4.90 cm. Dans ce biais et cet écart-type, sont compris les deux principales sources d'erreur sur le LiDAR qui sont l'erreur sur le positionnement en iPPP, qui est de l'ordre du centimètre, et l'erreur altimétrique due au laser qui est pour le LiDAR ALS60, proche de 6 cm. Les résultats obtenus sont donc cohérents.

Ensuite, une comparaison avec les autres passages, moins synchronisés avec celui de Sentinel-3A, a été réalisée en utilisant les SSH du traitement LR-RMC avec la correction de la troposphère humide issue de ECMWF.

Passage	Ligne	Biais (cm)	Écart-type (cm)	RMS (cm)
1	1	19.86	12.82	21.03
2	2	10.95	3.65	11.54
3	3	10.02	4.33	10.92
4 (synchronisé)	3	-0,87	4.90	4.98
5	2	-1.48	4.08	4.33
6	2	-13.84	4.03	14.41
7	2	-5.53	4.00	6.82
8	1	-2.49	25	25.13

Tableau 8 : Les statistiques sur le biais du LiDAR suivant les passages

Il est possible d’observer, à travers le tableau 8, que la désynchronisation aura un effet important sur le biais. L’erreur absolue augmente sur les passages désynchronisés. Elle a une valeur absolue comprise entre 1.48 cm et 19.86 cm. Cependant, l’écart-type reste similaire pour la majorité des passages. L’erreur relative reste donc stable. Cela montre la capacité du LiDAR à observer les vagues. Les observations sur l’ensemble des passages montrent donc la nécessité d’une synchronicité entre le passage de l’altimètre et du LiDAR.

Enfin, nous avons constaté que les écarts types sont plus importants pour les radiales plus proches du littoral. Pour les passages 1 et 8, ce sont les points situés le plus au sud, donc au plus proche du littoral, pour lesquels la différence entre la SSH de Sentinel-3A et celle du LiDAR est la plus importante⁷. Ceci est dû à la contamination des mesures de l’altimètre par la terre.

⁷ Voir Annexes n°9 et 10

IV.3 Etalonnage à partir des spectres directionnels de vagues

Le premier altimètre à avoir fourni des spectres directionnels de vagues est l'altimètre issu de la mission Surface Waves Investigation and Monitoring instrument (SWIM). Les spectres de vagues sont un bon moyen de représenter l'état de la mer. Ils ne représentent non pas la fréquence des vagues mais le nombre d'onde, car la représentation la plus facile d'une onde est sous la forme d'un vecteur d'onde (Ternon, 2019).

L'altimètre SWOT permettra aussi de réaliser des spectres directionnels de vagues. L'étalonnage de SWOT à partir de ces spectres sera réalisable par LiDAR aéroporté pour les longueurs d'onde allant de 15 à 120 km. Ceci est possible grâce aux travaux de Hwang et al. qui ont montré la possibilité de créer des spectres de vagues à partir de mesures effectuées par LiDAR aéroporté (Hwang et al., 2000).

Les vagues qui vont être étudiées par les spectres réalisés à partir de mesures LiDAR sont la houle. Paul Ternon (ancien élève ESGT) avait réalisé en 2019 son TFE au sein du laboratoire M2C sur la création de spectres de vagues par LiDAR aéroporté. Il avait montré que ces vagues peuvent être considérées linéaires si l'on respecte l'hypothèse d'eau profonde, soit que le produit de la profondeur d'eau par le nombre d'onde soit supérieur à 1. De plus, plusieurs effets impactant les spectres de vagues avaient été mis en évidence, tel que l'effet doppler.

Cependant quelques questions demeuraient à l'issue de ce travail, notamment sur la correction de l'effet doppler mais aussi sur la perte de densité à cause de la specularité (Ternon, 2019).

Pour conclure la comparaison avec les mesures SAR de Sentinel-3A montre une précision de la mesures LiDAR avec un positionnement iPPP de l'ordre de 5 cm. Cette comparaison a aussi démontré l'importance d'une synchronisation entre le passage du LiDAR et le passage de l'altimètre à étalonner. Enfin, la réalisation de spectres de vagues grâce au LiDAR est réalisable mais l'utilisation de ces spectres dans le cadre d'une CalVal nécessite encore de réaliser quelques tests.

Conclusion

La mission Surface Water Ocean Topography permettra de mieux comprendre les phénomènes se produisant au niveau des côtes, estuaires, etc., grâce à son radar KaRIn embarqué sur un satellite. L'altimètre spatial SWOT permettra aussi le suivi de l'hydrologie continentale grâce à son excellente résolution, et fournira une mesure des hauteurs d'eau avec une meilleure précision. SWOT sera aussi en mesure de fournir des spectres directionnels de vagues.

Comme tous les altimètres, SWOT devra observer à la suite de son lancement une phase d'étalonnage et de validation de ses instruments. De nombreux sites de calibration sont répartis dans le monde mettant en place majoritairement des campagnes terrestres de mesure in-situ. La nouveauté dans la CalVal de SWOT sera l'utilisation d'un LiDAR aéroporté, cette technique permet de couvrir de plus grandes zones comparé aux autres techniques de mesure utilisées pour la CalVal. Par conséquent, plusieurs campagnes aériennes avec LiDAR sont prévues aux Etats-Unis pour l'étalonnage de SWOT.

La mesure de la hauteur significative d'eau avec cette technique impose de connaître la position de la plateforme du LiDAR. L'aéronef peut s'éloigner loin des côtes lors des mesures de SSH, ce qui implique l'inadaptabilité d'un traitement DGPS pour réaliser le positionnement. En effet, ce traitement impose une proximité (d'au moins 20 km) de l'avion avec une base au sol. L'utilisation du logiciel GINS du CNES/GRGS a permis de traiter des trajectoires d'aéronef avec un traitement iPPP. Les analyses effectuées sur le vol réalisé au-dessus de Rouen en septembre 2021 ont montré qu'il était possible d'obtenir une précision inférieure à 5 cm avec ce traitement. Ce qui est une précision satisfaisante dans le cadre de la CalVal.

Ensuite, une comparaison a été réalisée entre les mesures effectuées avec le LiDAR aéroporté du laboratoire M2C et les mesures SAR faites par le satellite Sentinel-3A au large du Cotentin. La réalisation de cette comparaison a nécessité de bien comprendre quelles mesures sont effectuées par Sentinel-3A, mais aussi quels traitements sont appliqués sur ses mesures et où trouver leurs résultats. Cette analogie a montré qu'avec les mesures du LiDAR nous pouvons obtenir au mieux un biais de -0.87 cm avec un écart-type de 4.90 cm. Ce qui nous permet avec cette précision d'en conclure l'opérationnalité du LiDAR pour effectuer

étalonnage d'altimètre à partir de mesure de SSH. Cela uniquement s'il y a une synchronicité entre le passage de l'avion et le passage du satellite.

Afin d'améliorer les résultats obtenus, il serait possible d'envisager de remplacer LiDAR ALS60 par un LiDAR plus récent. Cela permettrait d'avoir une erreur moins importante sur le laser, mais aussi d'observer la constellation Galileo, ce qui augmenterait le nombre de mesures utilisées pour effectuer le positionnement iPPP de la plateforme du LiDAR. De plus, nous pourrions envisager de changer notre aéronef pour un avion plus rapide comme l'ont fait le Scripps, dans l'optique de diminuer le biais dû au changement d'état de mer.

Une autre possibilité serait de réaliser l'étalonnage de SWOT à partir de spectres directionnels de vagues. L'intérêt de cette technique est qu'elle ne nécessite pas une synchronisation parfaite entre le passage du LiDAR et le passage du satellite en raison des grandes longueurs d'onde qui sont étudiées (qui sont comprises entre 15 et 120 km pour SWOT). Avant la Calval, il pourrait être intéressant de réaliser le traitement des spectres directionnels de vagues issus d'un vol réalisé au large d'Ouessant réalisé en janvier 2020, en vue d'améliorer les résultats déjà obtenus par le laboratoire M2C sur l'établissement de spectres directionnels de vagues (Ternon, 2019).

Les résultats obtenus lors de ce travail de fin d'études seront réutilisés à l'avenir. En effet, la CalVal de SWOT devrait se dérouler au printemps 2023. Lors de cette phase SWOT passera tous les jours au-dessus de la Normandie. Le LiDAR du laboratoire M2C pourra ainsi effectuer lors de cette période des vols à basse altitude (environ 400 m) afin de mesurer des SSH qui seront comparées avec les hauteurs trouvées par SWOT, ou afin de mesurer des hauteurs qui permettront de construire des spectres directionnels de vagues.

Bibliographie

I. Ouvrages imprimés

- Dufour J-P., 2001. Introduction à la géodésie. Hermès Science Publications, Paris, 334p.
- Duquenne F., Botton S., Peyret F., Bétaille D. et Willis P., 2005. GPS localisation et navigation (2e édition). Hermès-Lavoisier, 330p.

II. Chapitre dans un ouvrage imprimé

- Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L-L. et Callahan P.S., 2001. Satellite Altimetry. In : Fu L.L., Cazenave A., Eds. Satellite Altimetry and Earth Sciences. Academic Press, 463p.

III. Travaux universitaires

- Carret Alice. Etude de la variabilité spatio-temporelle de la circulation en Méditerranée Nord-Occidentale – Apport de l’altimétrie spatiale. Thèse Océan, Atmosphère, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2019, 229p.
Disponible sur : < <https://core.ac.uk/download/pdf/356666164.pdf> >. (consulté le 06/04/2022)
- Castruccio Frédéric. Apports des données gravimétriques GRACE pour l’assimilation de données altimétriques et in-situ dans un modèle de l’Océan Pacifique Tropical. Thèse Océan, Atmosphère. Université Joseph-Fourier – Grenoble I, 2006, 264p.
- Richard Thibault. Qualification et correction des modèles numériques de surfaces (MNS) haute résolution pour la dérivation de volumes d’eau : application aux surfaces en eau du bassin du Yangtze (R.P. Chine) dans le cadre de la mission SWOT 2020. Travail de fin d’études, Le MANS : Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 2016, 62p.
Disponible sur : < <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179252> >. (consulté le 15/04/2022)
- Roge Marine. Études de cartographie altimétrique pour l’observation de la dynamique méso-échelle dans le contexte SWOT : application à la mer Méditerranée occidentale. Thèse Océan, Atmosphère, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2018, 272 p.
Disponible sur : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02146019/document> >. (consulté le 05/04/2022)
- Serthelon Romain. 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. Travail de fin d’études, Le MANS : Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 2020, 79p.
Disponible sur : < <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03268346/document> >. (consulté le 24/06/2022)
- Ternon Paul. Spectre de vagues par LiDAR aéroporté comparé aux mesures satellitaires. Travail de fin d’études, Le Mans : Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 2019, 53p.
Disponible sur : < <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02959277/document> >. (consulté le 24/06/2022)

IV. Rapports institutionnels

- Arias P.A., Bellouin N., Coppola E., Jones R.G., Krinner G. et al., 2021 : Technical Summary. In Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, p.33-144
- Chen C., 2018, SWOT Calibration/Validation Plan (152 pages), Jet Propulsion Laboratory.
- EUMETSAT, 2017, Sentinel-3 SRAL Marine User Handbook (55 pages).

- EUMETSAT, 2021, S3IPF-Product Data Format Specification – SRAL and MWR Level 2 Marine (100 pages).

V. Articles de périodiques imprimés

- Bonnefond P., Laurain O., Exertier P., Calzas M., Guinle T., Picot N. et the FOAM Project Team. *Validating a New GNSS-Based Sea Level Instrument (CalNageo) at Senetosa Cape*. Marine Geodesy-Taylor&Francis, 2021, vol.45, n°2, p.121-150
- Desportes C., Obligis E. et Eymard L.. *On the Wet Tropospheric Correction for Altimetry in Coastal Regions*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, vol. 45, n°7, p.2139-2149
- Flamant P.. *Comprendre la science du lidar*. Photoniques, 2019, vol.97, p.40-44
- Vincent P., Steunou N., Caubet E., Phalippou L., Rey L., Thouvenot E. et Verron J.. *AltiKa : a Ka-band Altimetry Payload and System for Operational Altimetry during the GMES Period*. Sensors, 2006, vol.6, n°3, p.208-234
- Frappart F., Roussel N., Biancale R., Martinez-Benjamín J.J., Mercier F. et al. *The 2013 Ibiza Calibration Campaign of Jason-2 and SARAL Altimeters*. Marine Geodesy, 2015, vol.38, n°1, p.219-232
- Fund F., Morel L. et Mocquet A.. *Modélisation des retards troposphériques pour les observations GPS et impacts sur l'estimation de la hauteur ellipsoïdale*. Revue XYZ, 2010, n°123, p.27-32
- Haines B.J., Dong D., Born G.H. et Gill S.K.. *The Harvest Experiment : Monitoring Jason-1 and TOPEX/POSEIDON from a California Offshore Platform*. Marine Geodesy, 2003, vol. 26, p.239-259
- Hwang P.A., Krabill W.B., Wright C.W., Walsh E.J. et Swift R.N.. *Airborne Scanning Lidar Measurements of Ocean Waves*. Remote Sensing of Environment, 2000, vol.73, n°2, p.236-246.
- International Altimetry Team. *Altimetry for the future : Building on 25 years of progress*. Advances in Space Research, 2021, vol.68, n°2, p.319-363.
- Kendall Melville W., Lenain L., Cayan D.R., Kahru M., Kleissl J.P., Linden P. F. et Statom N.M.. *The Modular Aerial Sensing System*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, vol.33, n°6, p.1169-1184.
- Laforge A., Fleury S., Dinardo S., Garnier F., Remy F., Benveniste J., Bouffard J. et Verley J.. *Toward improved sea ice freeboard observation with SAR altimetry using the physical retracker SAMOSA+*. Advances in Space Research, 2021, vol.68, n°2, p.732-745.
- Loyer S., Perosanz F., Mercier F., Capdeville H. et Marty J-C.. *Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center*. Journal of Geodesy, 2012, vol.86, p.991-1003.
- Moreau T., Cadier E., Boy F, Aublanc J., Rieu P., et al. *High-performance altimeter Doppler processing for measuring sea level height under varying sea state conditions*. Advances in Space Research, 2021, vol.67, n°6, p.1870-1886

VI. Articles de périodiques électroniques

- Bonnefond P., Laurain O., Exertier P., Boy F., Guinle T., et al. *Calibrating the SAR SSH of Sentinel-3A and CryoSat-2 over the Corsica Facilities*. Remote Sensing, [en ligne], 2018, vol.10, n°1. Disponible sur : < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01852691/document> >. (consulté le 21/04/2022)
- Crétaux J.F., Bergé-Nguyen M., Calmant S., Jamangulova N., Satylkanov R., et al. *Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan)*. Remote Sensing, [en ligne], 2018, vol.10, n°11.

Disponible sur : < <https://doi.org/10.3390/rs10111679> >. (consulté le 21/04/2022)

• Fernandes M.J., Lázaro C. et Vieira T. *On the role of the troposphere in satellite altimetry*. Remote Sensing of Environment, [en ligne], 2021, vol.252. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112149> >. (consulté le 12/07/2022)

• Morrow R., Fu L-L., Arduin F., Benkiran M., Chapron B., et al. *Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission*. Frontiers in Marine Science, [en ligne], 2019, vol.6.

Disponible sur : < <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232> >. (consulté le 05/05/2022)

VII. Cours Universitaires

• Morel L. (2021 a), Géodésie, GNSS et géoréférencement, cours de l'Ecole Supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes, ESGT/CNAM

• Morel L. (2021 b), Géodésie, GNSS, cours de l'Ecole Supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes, ESGT/CNAM

VIII. Sites web

• ESA, CNES. RADAR ALTIMETRY-TUTORIAL&TOOLBOX, [en ligne].

Disponible sur : < <http://www.altimetry.info/> >. (consulté le 29/03/2022)

• CNES (a). AVISO+-Satellite Altimetry Data, [en ligne].

Disponible sur : < <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html> >. (consulté le 02/03/2022)

• CNES (b). SWOT-Une mission d'hydrologie et océanographie pleine de promesses, [en ligne].

Disponible sur : < <https://swot.cnes.fr/fr> >. (consulté le 02/03/2022)

• CNES (c). Jupyterhub, [en ligne].

Disponible sur : < <https://jupyterhub.cnes.fr> >. (consulté le 24/06/2022)

• IGN. Géodésie, [en ligne]. Disponible sur : < <https://geodesie.ign.fr/> >. (consulté le 21/06/2022)

• IGS. International GNSS Service [en ligne]. Disponible sur : < <https://igs.org/products/> >. (consulté le 23/06/2022)

• ODATIS. ODATIS Données et Services pour l'océan, [en ligne].

Disponible sur : < <https://www.odatis-ocean.fr/> >. (consulté le 06/04/2022)

IX. Notice

• Leica Geosystems. Leica ALS60 Airborne Laser Scanner. Product Specifications, 2008, 12 p.

X. Communication dans un congrès

• Lenain L., Kendall Melville W., Statom N. et Grare L. . Broad range airborne ocean topography measurements : Modular Aerial Sensing System (MASS) in support of SWOT Calval. SWOT CalVal meeting, Bordeaux, 17 juin 2019, 43p.

• Boy F. . New stacking method for removing the SAR sensitivity to swell. The 25th Anniversary of TOPEX/Poseidon, 23-27 octobre 2017, 17p.

• Perosanz F., Loyer S., Mercier F., Capdeville H. et Mezerette A. .Contribution du GRGS à la campagne REPRO2 de l'IGS: Intérêts pour les traitements GPS statiques et dynamiques en mode iPPP. G2(Géodésie Geophysique), Strasbourg, 17-19 novembre 2014, 50p.

Table des annexes

Annexe 1 Extrait du fichier directeur du traitement iPPP du vol au-dessus de Rouen pour le récepteur AVIO	60
Annexe 2 Extrait du fichier solution du traitement iPPP pour le récepteur AVIO	61
Annexe 3 Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GPS pour le récepteur AVIO	62
Annexe 4 Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GLONASS pour le récepteur AVIO	63
Annexe 5 Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GPS pour le récepteur BASE	64
Annexe 6 Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GLONASS pour le récepteur BASE	65
Annexe 7 Différences des distances entre les antennes calculées en DGPS avec la distance mesurée	66
Annexe 8 Statistiques sur la comparaison entre les trajectoires iPPP et DGPS suivant les lignes et le récepteur	67
Annexe 9 Graphique représentant la SSH du traitement LR-RMC avec la correction troposphérique du modèle ECMWF en fonction de la SSH du LiDAR pour le premier passage réalisé avec l'aéronef.....	68
Annexe 10 Graphique représentant la SSH du traitement LR-RMC avec la correction troposphérique du modèle ECMWF en fonction de la SSH du LiDAR pour le huitième passage réalisé avec l'aéronef.....	69

Annexe 1

Extrait du fichier directeur du traitement iPPP du vol au-dessus de Rouen pour le récepteur AVIO

```

# gravity_from_atmospheric_pressure_variations : not_computed
# satellite_emission : not_computed
1 accelerometer_attitude_thrust : not_computed
2 observation :
3 removal :
4 minimum_gnss_data_per_pass : 0
5 nsigma_threshold : 5
5 first_iteration_residual_threshold : 0
7 minimum_elevation_threshold : 0
3 data_sampling : 1
# minimum_laser_raw_data : 0
# minimum_doppler_data_per_pass : 0
1 interobject_data :
2 - file : orbites/GRG
3 name : GNSS_ephemeris
4 objects : [GNSS_GPS, unknown]
5 type : fixed_ephemeris
5 - file : .temp.Documents/Rouen/resultats_hugo/AVIO2451.21o
7 name : GNSS_measurement
3 objects : [GNSS_GPS, station]
# type : undifferentiated_gnss
# tropospheric_correction : [wet, vmf1, vmf1]
1 nb_adjusted_biases_per_day_per_station : 192
2 min_elevation_phase : 8
3 min_elevation_range : 8
4 apriori_obs_stddev : 0.05
5 apriori_model_stddev : 5.0
5 gps_phase_ponderation_law : [0.0030, 0.15, 1.0]
7 gps_code_ponderation_law : [0.3000, 0.15, 1.0]
3 glo_phase_ponderation_law : [0.0060, 0.15, 1.0]
# glo_code_ponderation_law : [0.6000, 0.15, 1.0]
# gal_phase_ponderation_law : [0.0030, 0.15, 1.0]
# gal_code_ponderation_law : [0.2000, 0.15, 1.0]
2 gnss_options :
3 phase_observations_process : yes
4 clock_parameters_globally_solved : no
5 observation_options : [initialize_from_clock_file, constellation_as_time_reference]
5 phase_nsigma_threshold : 0
7 code_nsigma_threshold : 0
3 max_iter_gps_removal : 2
# phase_rms_threshold_after_iter_max : 0
# code_rms_threshold_after_iter_max : 0
1 minimum_number_observations_per_pass : 0
2 parameter :
3 algorithm :
4 allow_elim_at_convergence : yes
5 nb_iter_min_max : [1, 20]
7 convergence_criterion : 0.1
# type : kalman_qr
3 kalman_options :
# state_reduction : yes
# forward_backward : yes
1 adjustment_parameters :
2 stations :
3 adjustment_type : [geodetic_marker, all_stations]
4 coordinates : cartesian_xyz
5 adjustment_frequency : [0, 0, 0, 1]
5 velocity : not_adjusted
7 label_output : middle_of_period
3 pole :
# adjustment_x_y_t : [not_adjusted, not_adjusted, not_adjusted]
# love_h2_h2_tilde : [not_adjusted, not_adjusted]
1 love_k2_k2_tilde : [not_adjusted, not_adjusted]
2 nutation_longitude_obliquity : [not_adjusted, not_adjusted]
3 constellation :
4 - name : GNSS_GPS
5 integration :
5 integration_stepsize : 0.0
7 low_inclination_formalism : normal
3 regularization : not_regularized
# integration_algorithm : none
# integration_order : 0
1 encke_technique : 0
# direct_solar_pressure :

```

Annexe 2

Extrait du fichier solution du traitement iPPP pour le récepteur AVIO

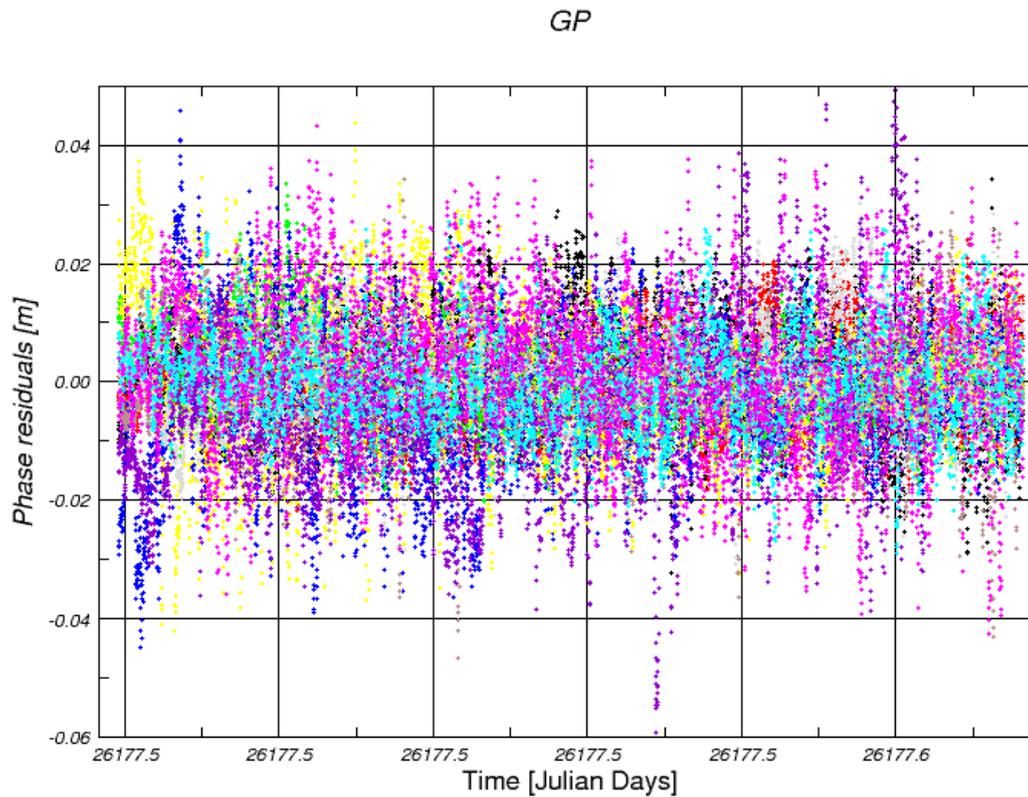
```

1 #GINS_VERSION VALIDE_Z1_Z2
2 #STATION_NAME AVIO
3 #PROCESSING IPPP
4 # Station solution file v1.0
5 #RADIUS 0.637813700000000E+07
6 #FLAT 0.335281068118232E-02
7 #ARP 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
8 #VELOC 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
9 # type calendar epoch julian days(1950) correction (X or lat) position (X or lat) correction (Y or lon) position
(Y or lon) correction (Z or h) position (Z or h) cov11 cov22
cov33 cov21 cov31 cov32
10 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:49.000 26177.50959491 -0.116915685543790E+01 0.415940232695070E+07 0.390236802195431E+00
0.853948821297885E+05 -0.810888004489243E+00 0.481858156508269E+07 0.934090753891890E-04 0.258953170073978E-04
0.759952941342785E-04 -0.121762579560370E-04 0.451090256558859E-04 0.426172527972402E-06
11 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:49.000 26177.50959491 0.317691964113465E-05 0.493835161083958E+02 0.570375498676334E-05
0.117614952508106E+01 -0.137126980070025E+01 0.195542459595948E+03 0.332608071442778E-14 0.501176963056500E-14
0.127732491583009E-03 0.123348263439979E-04 0.136839968889510E-09 -0.126721921841052E-09
12 ENU_SOL 2021-09-02T12:13:49.000 26177.50959491 0.414152973743893E+00 0.493835161083958E+02 0.353338892305331E+00
0.117614952508106E+01 -0.137126980070025E+01 0.195542459595948E+03 0.264235226182811E-04 0.411436723295754E-04
0.127732491583009E-03 0.996134498720201E-05 -0.920135015399391E-05 -0.152194199610820E-04
13 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:50.000 26177.50960648 -0.121071379585192E+01 0.415940232528485E+07 0.383998327946756E+00
0.853948812275701E+05 -0.826310893520712E+00 0.481858156140864E+07 0.934020880715904E-04 0.258897893968014E-04
0.759948869421628E-04 -0.121693878133473E-04 0.451127606808961E-04 0.425517656003243E-06
14 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:50.000 26177.50960648 0.337108849633151E-05 0.493835160983844E+02 0.562960386307764E-05
0.117614951312915E+01 -0.141010797246099E+01 0.195538574396633E+03 0.332545718339437E-14 0.411359591902859E-04
0.127733092810223E-03 0.123277564569206E-14 -0.136817087529192E-09 -0.126667756685887E-09
15 ENU_SOL 2021-09-02T12:13:50.000 26177.50960648 0.408768821137631E+00 0.493835160983844E+02 0.374934472091305E+00
0.117614951312915E+01 -0.141010797246099E+01 0.195538574396633E+03 0.264177124100454E-04 0.411359591902859E-04
0.127733092810223E-03 0.995563548574449E-05 -0.919741718783173E-05 -0.152168750737370E-04
16 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:51.000 26177.50961806 -0.119216647697612E+01 0.415940232622434E+07 0.372729368405999E+00
0.853948797963673E+05 -0.812376474961638E+00 0.481858156416611E+07 0.933951042014569E-04 0.2588462644280571E-04
0.759944874952664E-04 -0.121625194704150E-04 0.451164973983476E-04 0.424863297679691E-06
17 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:51.000 26177.50961806 0.332766832400466E-05 0.493835161083142E+02 0.546919624655473E-05
0.117614949315705E+01 -0.138760956097394E+01 0.195541259898804E+03 0.332483392145905E-14 0.500956609363910E-14
0.127733701745831E-03 0.123206886390880E-14 -0.136794189420794E-09 -0.126613602550457E-09
18 ENU_SOL 2021-09-02T12:13:51.000 26177.50961806 0.397121528759616E+00 0.493835161083142E+02 0.370105251734227E+00
0.117614949315705E+01 -0.138760956097394E+01 0.195541259898804E+03 0.264119049140859E-04 0.411282494648636E-04
0.127733701745831E-03 0.994992767187457E-05 -0.919348502755411E-05 -0.152143283394043E-04
19 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:52.000 26177.50962963 -0.123306730017066E+01 0.415940232763565E+07 0.363171144417720E+00
0.853948783809702E+05 -0.836340337991714E+00 0.481858156212816E+07 0.93388123832069E-04 0.258787420991054E-04
0.759940957272855E-04 -0.121556529190313E-04 0.451202360763585E-04 0.424209433587414E-06
20 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:52.000 26177.50962963 0.346783343729840E-05 0.493835160869538E+02 0.534914936078934E-05
0.117614947326920E+01 -0.143254838977009E+01 0.195540612568147E+03 0.332421093275705E-14 0.500846509282550E-14
0.127734318451465E-03 0.123136228864414E-14 -0.136771274671901E-09 -0.126559459923778E-09
21 ENU_SOL 2021-09-02T12:13:52.000 26177.50962963 0.388404858025788E+00 0.493835160869538E+02 0.385694502442008E+00
0.117614947326920E+01 -0.143254838977009E+01 0.195540612568147E+03 0.264061001318635E-04 0.411205430758688E-04
0.127734318451465E-03 0.994422152167120E-05 -0.918955370397434E-05 -0.152117797462656E-04
22 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:53.000 26177.50964120 -0.121355860866607E+01 0.415940233084145E+07 0.347515587243834E+00
0.853948767756355E+05 -0.835545488633215E+00 0.481858156433700E+07 0.933811469198037E-04 0.258732224102021E-04
0.759937116960561E-04 -0.121487881636506E-04 0.451239765977547E-04 0.423556081840466E-06
23 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:53.000 26177.50964120 0.334155965475702E-05 0.493835160782323E+02 0.512807005237370E-05
0.117614945025878E+01 -0.141945688985288E+01 0.195544354324229E+03 0.332358821437288E-14 0.500736460226685E-14
0.127734942870851E-03 0.123065592059696E-14 -0.136748343220674E-09 -0.126505328433439E-09
24 ENU_SOL 2021-09-02T12:13:53.000 26177.50964120 0.372352158787811E+00 0.493835160782323E+02 0.371650258220011E+00
0.117614945025878E+01 -0.141945688985288E+01 0.195544354324229E+03 0.264002980622834E-04 0.411128400875275E-04
0.127734942870851E-03 0.993851705605356E-05 -0.918562319296052E-05 -0.152092293059931E-04
25 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:54.000 26177.50965278 -0.126674357289448E+01 0.415940233317708E+07 0.343109992027167E+00
0.853948752502429E+05 -0.870445907115937E+00 0.481858156585383E+07 0.93374173463205E-04 0.258677053589339E-04
0.759933353708228E-04 -0.121419251996069E-04 0.451271789743520E-04 0.422903238316754E-06
26 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:54.000 26177.50965278 0.350081141675673E-05 0.493835160713868E+02 0.508244330021946E-05
0.117614942859509E+01 -0.148062383476644E+01 0.195547005503438E+03 0.332296577018594E-14 0.500626462819010E-14
0.127735575013273E-03 0.122994976082563E-14 -0.136725395123638E-09 -0.126451208274097E-09
27 ENU_SOL 2021-09-02T12:13:54.000 26177.50965278 0.369039178311186E+00 0.493835160713868E+02 0.389362339384464E+00
0.117614942859509E+01 -0.148062383131212E+01 0.195547005503438E+03 0.263944987048541E-04 0.411051404749949E-04
0.127735575013273E-03 0.993281426864245E-05 -0.918169350277444E-05 -0.152066770117636E-04
28 XYZ_SOL 2021-09-02T12:13:55.000 26177.50966435 -0.127303520590067E+01 0.41594023347504E+07 0.327054405919625E+00
0.853948740412834E+05 -0.872512381523847E+00 0.481858156420643E+07 0.933672034733912E-04 0.258621909438429E-04
0.759929667578636E-04 -0.121350640236994E-04 0.451314632129148E-04 0.422250901228508E-06
29 FLH_SOL 2021-09-02T12:13:55.000 26177.50966435 0.353389678764415E-05 0.493835160598085E+02 0.486314936809507E-05
0.117614941186446E+01 -0.148650194797665E+01 0.195545932764187E+03 0.332234360190886E-14 0.500516517343740E-14

```

Annexe 3

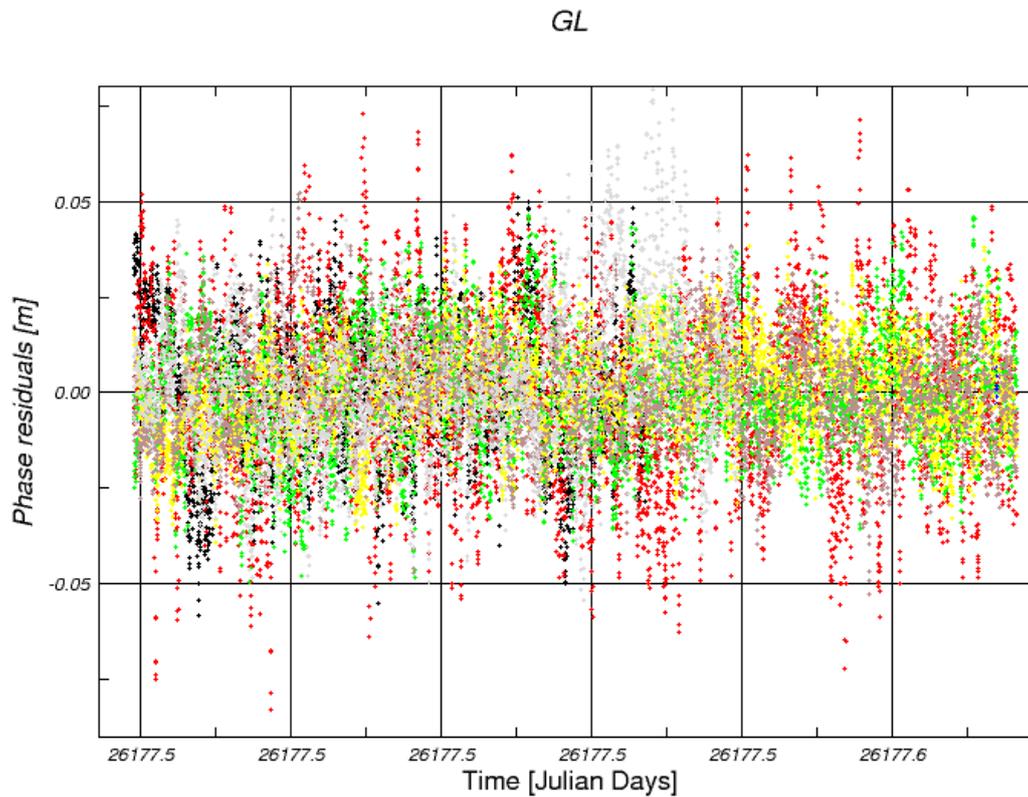
Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GPS pour le récepteur AVIO



Ce graphique permet d'observer les résidus sur les observations de phase en fonction du temps pour le récepteur AVIO. Chaque couleur est associée à un satellite observé par le récepteur GNSS, qui dans ce cas appartient à la constellation GPS.

Annexe 4

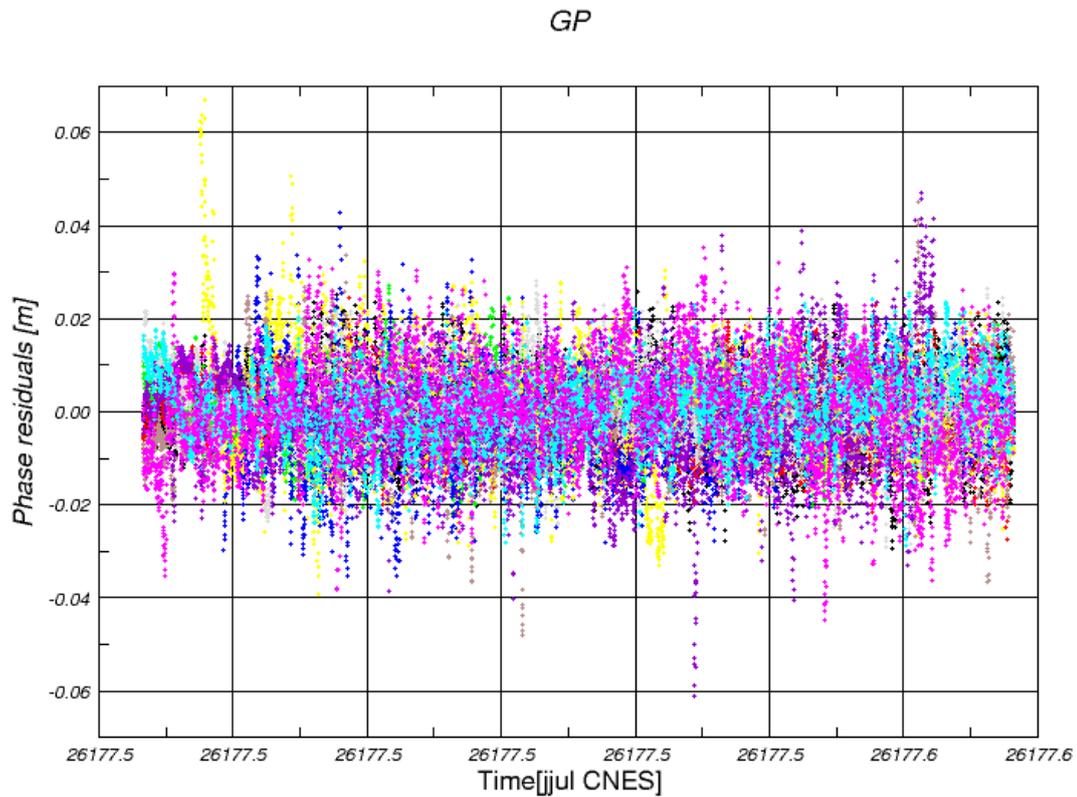
Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GLONASS pour le récepteur AVIO



Ce graphique permet d'observer les résidus sur les observations de phase en fonction du temps pour le récepteur AVIO. Chaque couleur est associée à un satellite observé par le récepteur GNSS, qui dans ce cas appartient à la constellation GLONASS.

Annexe 5

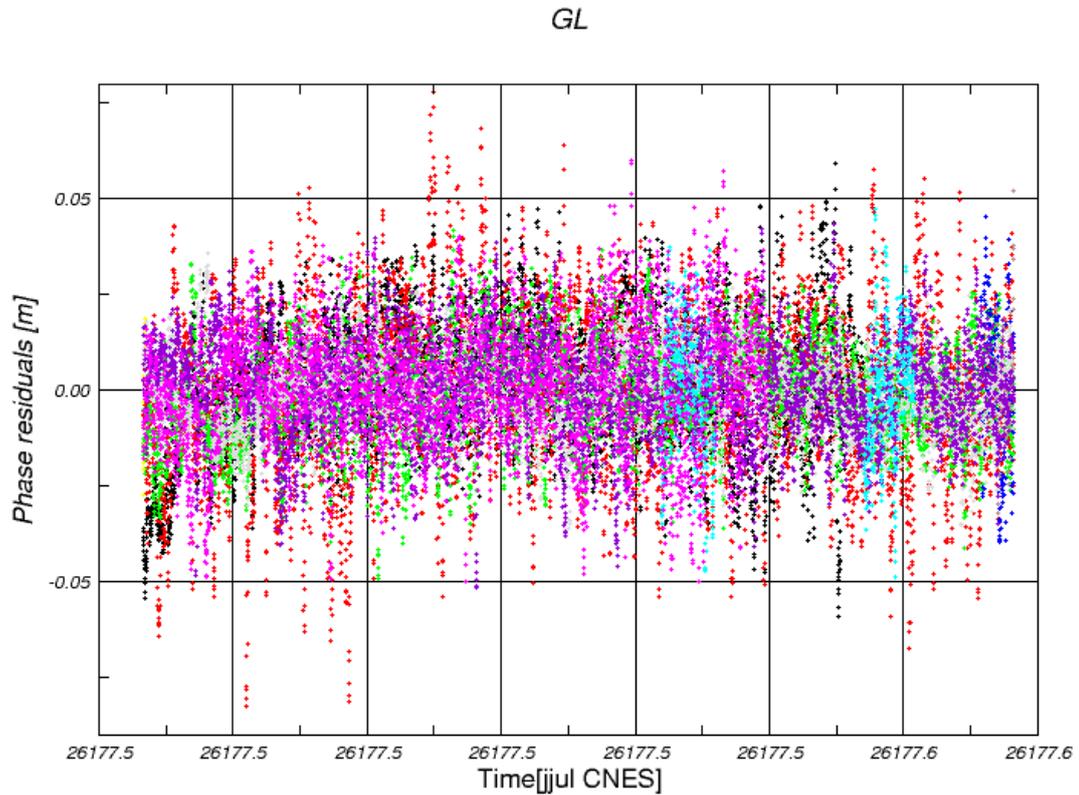
Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GPS pour le récepteur BASE



Ce graphique permet d'observer les résidus sur les observations de phase en fonction du temps pour le récepteur BASE. Chaque couleur est associée à un satellite observé par le récepteur GNSS, qui dans ce cas appartient à la constellation GPS.

Annexe 6

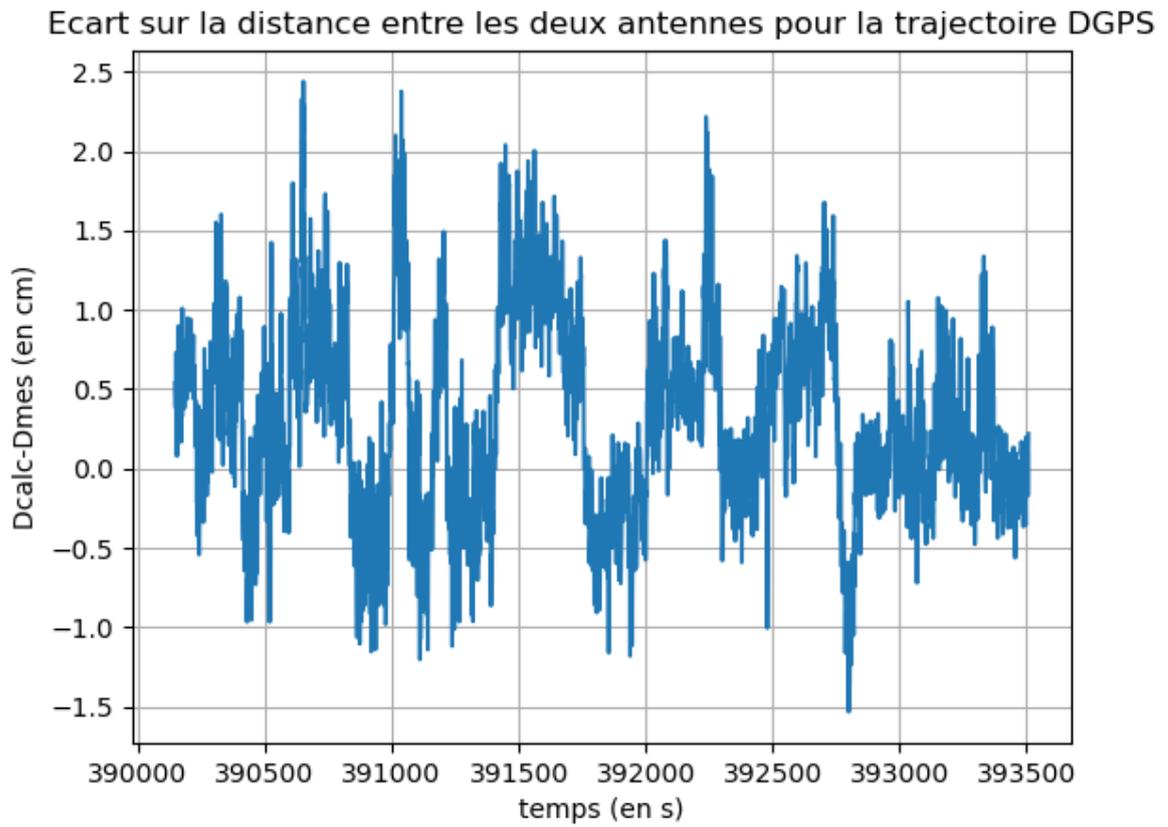
Graphique représentant les résidus sur la mesure de phase des données provenant de la constellation GLONASS pour le récepteur BASE



Ce graphique permet d'observer les résidus sur les observations de phase en fonction du temps pour le récepteur BASE. Chaque couleur est associée à un satellite observé par le récepteur GNSS, qui dans ce cas appartient à la constellation GLONASS.

Annexe 7

Différences des distances entre les antennes calculées en DGPS avec la distance mesurée

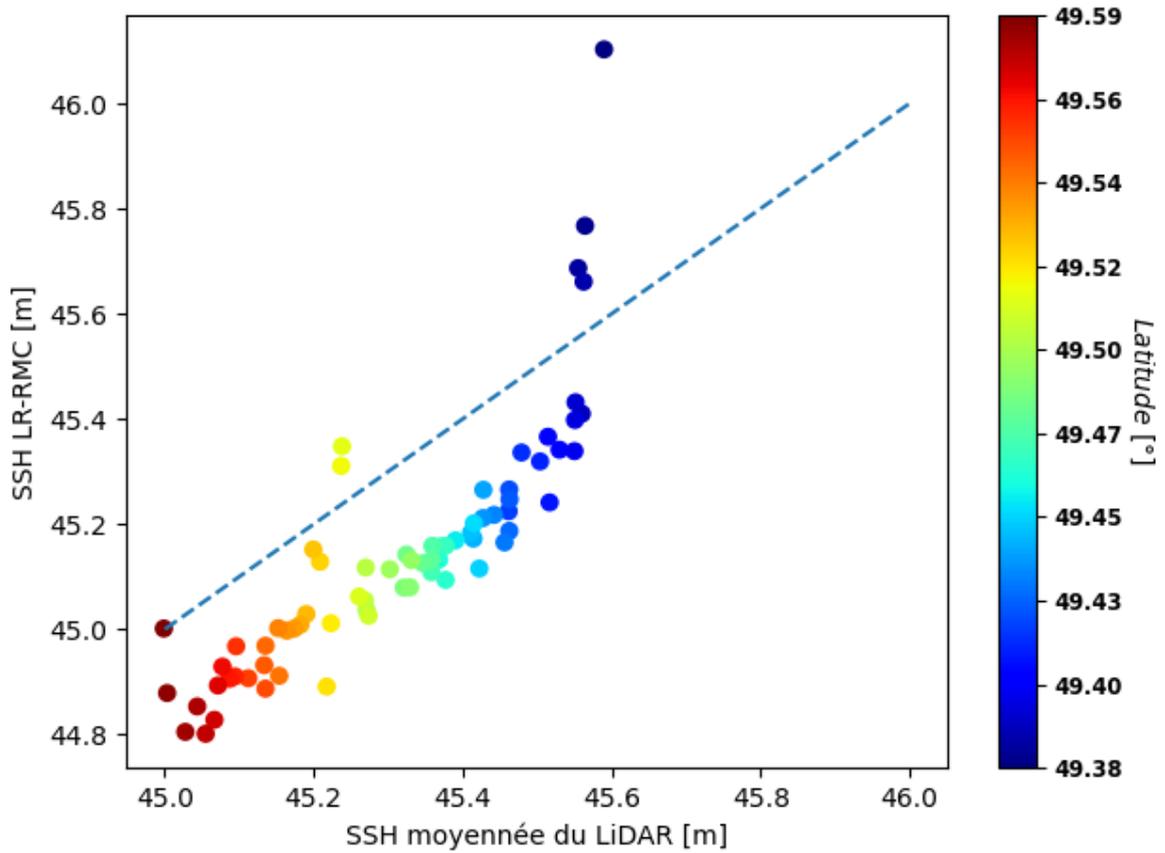


Annexe 8
Statistiques sur la comparaison entre les trajectoires iPPP et DGPS suivant les lignes et le récepteur

	Récepteur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne absolue
Ecart d'hauteur ellipsoïdale (cm)	AVIO	4.06	1.88	1.23	5.08	4.87	5.27	3.5	/	/	/	3.7
	BASE	-2.12	-4.47	-2.5	-1.86	0.46	-0.25	-1.02	-1.57	1.68	2.69	1.86
Ecart-type (cm)	AVIO	0.78	1.06	1.27	0.84	1.28	1.3	1.89	/	/	/	1.20
	BASE	0.83	1.21	1.07	1.11	1.23	0.85	1.45	1.31	1.54	0.9	1.15
RMS (cm)	AVIO	4.13	2.16	1.77	5.15	5.04	5.43	3.97	/	/	/	3.95
	BASE	2.28	4.63	2.72	2.16	1.31	0.88	1.87	2.04	2.28	2.84	2.29
Ecart-max (cm)	AVIO	5.62	4.06	3.25	6.87	7.38	7.71	7.18	/	/	/	6.01
	BASE	3.71	6.77	4.44	4.17	2.63	2.57	3.31	4.49	3.74	4.45	4.03

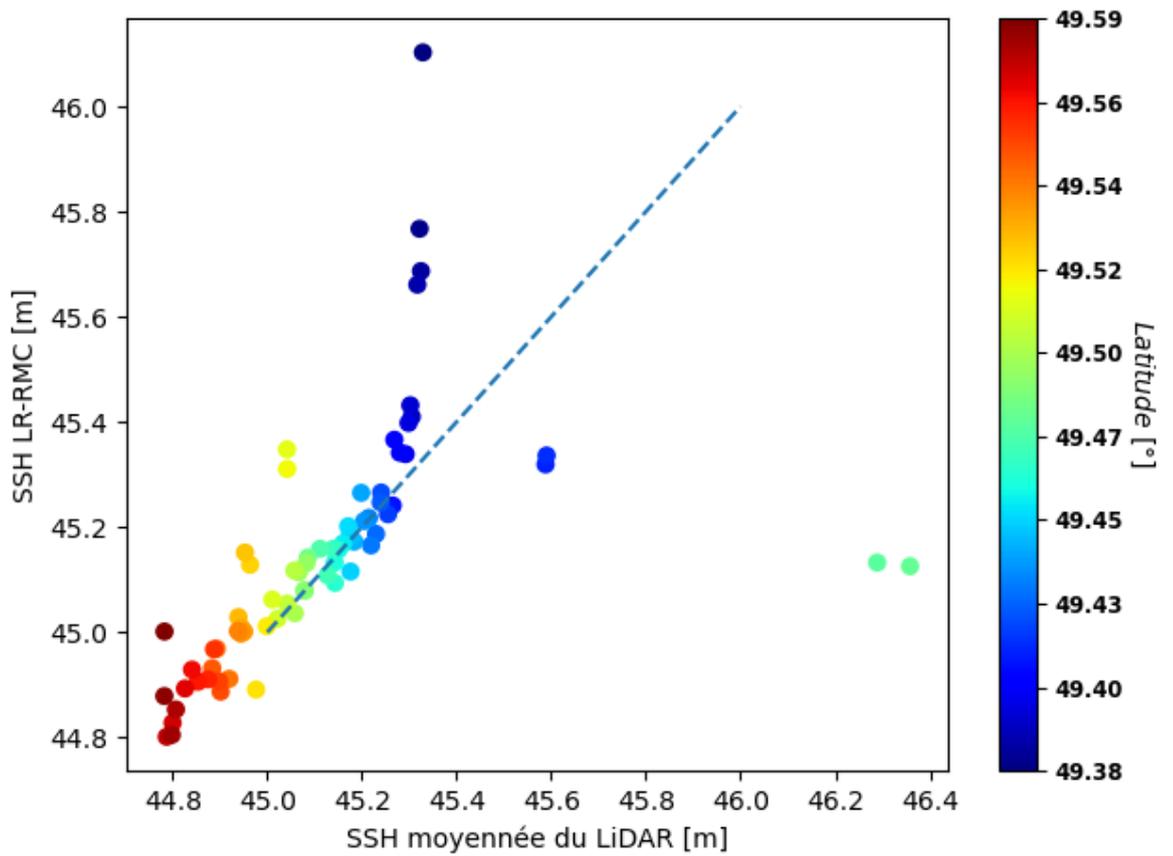
Annexe 9

Graphique représentant la SSH du traitement LR-RMC avec la correction troposphérique du modèle ECMWF en fonction de la SSH du LiDAR pour le premier passage réalisé avec l'aéronef



Annexe 10

Graphique représentant la SSH du traitement LR-RMC avec la correction troposphérique du modèle ECMWF en fonction de la SSH du LiDAR pour le huitième passage réalisé avec l'aéronef



Liste des figures

Figure 1 : Représentation des différentes hauteurs utilisées en altimétrie (Castruccio, 2006).....	10
Figure 2 : Schéma d'une forme d'onde typique au niveau de l'océan illustrant la correction opérée par un retracker (ESA,2022).....	13
Figure 3 : Radar interférométrique à large fauchée KaRIn (CNES, 2022b)	14
Figure 4 : Schéma du principe de fonctionnement du radar interférométrique à large fauchée KaRIn (CNES, 2022a).....	15
Figure 5 : La précision du LiDAR suivant la hauteur de vol indiquée dans la notice du LiDAR ALS60	21
Figure 6 : Orbite d'étalonnage de SWOT au niveau de la France (CNES,2022a).....	22
Figure 7 : Installation pour le vol au-dessus de Rouen	23
Figure 8 : Trajectoire du vol au-dessus de Rouen effectué le 2 Septembre 2021.	24
Figure 9 : Trajectoire de l'aéronef lors du vol au large du Cotentin effectué le 20 Novembre 2019.	25
Figure 10 : Les Précisions de l'iPPP et du DGPS suivant la longueur de la ligne de base (Perosanz et al., 2014)	30
Figure 11 : Différences des distances entre les antennes calculées en iPPP avec la distance mesurée	35
Figure 12 : Différences des trajectoires iPPP et DGPS pour les deux récepteurs et suivant les coordonnées géographiques.....	37
Figure 13 : Illustrations des modes LRM (à gauche) et SAR (à droites) utilisés par Sentinel-3A (CNES, 2022a)	40
Figure 14 : Comparaison entre les étapes du traitement SAR (à droite) et celles du traitement LRM (à gauche). (Moreau et al., 2021).....	43
Figure 15 : Représentation d'un buffer autour d'un point de la donnée de Eumetsat à 1 Hz	45
sur le nuage de point du passage synchronisé avec Sentinel-3A.....	45
Figure 16 : Les corrections ionosphériques et troposphériques suivant la latitude sur le passage synchronisé avec Sentinel-3A (CNES, 2022c).....	48
Figure 17 : Les SSH de Sentinel-3A et les mesures LiDAR suivant la latitude sur le passage synchronisé avec Sentinel-3A	49
Figure 18 : Les statistiques sur le biais du LiDAR suivant la taille de buffer utilisée	50
Figure 19 : Représentation des SSH de Sentinel-3A en fonction des SSH du LiDAR associées	50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les produits d'orbites et d'horloges fournis par l'IGS (IGS, 2022)	28
Tableau 2 : Différences des distances entre les antennes calculées en iPPP avec la distance mesurée suivant les passages	36
Tableau 3 : Les statistiques suivant les coordonnées sur la différence entre les trajectoires iPPP et DGPS.....	38
Tableau 4 : Les statistiques sur la hauteur ellipsoïdale concernant la différence entre les trajectoires iPPP et DGPS sur les lignes	38
Tableau 5 : Synthèse des données de Sentinel-3A utilisées et des paramètres utilisés dans le calcul de la SSH (EumetSAT, 2021) (CNES, 2022c).....	44
Tableau 6 : Les statistiques sur le biais pour la donnée de CTOH issue des retracker Ocean SAR et Sea ice.....	49
Tableau 7 : Les statistiques sur le biais du LiDAR suivant les traitements des mesures de Sentinel-3A	51
Tableau 8 : Les statistiques sur le biais du LiDAR suivant les passages	52

Etalonnage du futur altimètre spatial NASA/CNES SWOT LiDAR aéroporté : trajectographie iPPP et analyse du champ de vagues

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2022

RESUME

L'altimètre SWOT permettra une grande avancée dans la connaissance et la modélisation des océans, surtout pour les zones côtières et estuariennes. À la suite de son lancement, l'altimètre devra suivre une phase d'étalonnage et de validation (CalVal). Lors de ce temps ses mesures altimétriques seront comparées avec des mesures in-situ dont certaines seront réalisées par LiDAR aéroporté.

L'utilisation de la méthode de positionnement integer Precise Point Positioning (iPPP) pour déterminer la trajectoire du LiDAR aéroporté, permet de s'affranchir des contraintes d'un traitement différentiel tout en gardant une précision satisfaisante pour l'étalonnage d'un altimètre. Cette première observation a permis la comparaison de mesures par LiDAR aéroporté avec des mesures effectuées par le radar à synthèse d'ouverture (SAR) de Sentinel-3A. Cette étude démontre la capacité du LiDAR à intervenir dans le cadre d'une CalVal.

Mots clés : SWOT, altimétrie spatiale, LiDAR aéroporté, Sea Surface height, DGPS, IPPP (PPAR).

SUMMARY

The altimeter SWOT will allow a significant improvement in the knowledge and the modeling of oceans, particularly in the coastal and estuarine areas. Following its launch, the altimeter will have to follow a calibration and validation phase (CalVal). During this period, its altimetric measures will be compare with data measured in-situ, included some measured by airborne lidar.

The technique of GPS Precise Point Positioning with integer ambiguity (iPPP) to determine the position of the airborne lidar, allows to overcome the constraints of double-differences processing, keeping a sufficient accuracy for the CalVal. This first observation allowed us to compare Airborne lidar measurements of sea surface height with altimeter data measured by the synthetic aperture radar of Sentinel-3A. This study proves the ability of airborne lidar to intervene in a CalVal.

Key words : SWOT, satellite altimetry, airborne lidar, Sea Surface height, DGPS, IPPP (PPAR).