



HAL
open science

Topographie des océans avec le nouvel altimètre spatial SWOT (NASA/CNES) et le LiDAR aéroporté du laboratoire M2C

Hugo Kersimon

► **To cite this version:**

Hugo Kersimon. Topographie des océans avec le nouvel altimètre spatial SWOT (NASA/CNES) et le LiDAR aéroporté du laboratoire M2C. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04411601

HAL Id: dumas-04411601

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04411601>

Submitted on 23 Jan 2024

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

Hugo KERSIMON

Topographie des océans avec le nouvel altimètre spatial SWOT
(NASA/CNES) et le LiDAR aéroporté du laboratoire M2C

Soutenu le 7 septembre 2023

JURY

Monsieur Jean-Michel FOLLIN	Président du jury
Monsieur Laurent FROIDEVAL	Maître de stage
Monsieur Laurent MOREL	Enseignant référent

Remerciements

Je souhaite remercier mon maître de stage Laurent Froideval pour m'avoir guidé tout au long de ce travail. Son implication, ses recommandations ainsi que son écoute ont grandement participé au bon déroulement du stage. Assurément, ses conseils précieux et ses retours d'expérience me serviront dans mes projets futurs.

Je tiens également à adresser des remerciements à Christophe Conessa pour son assistance et sa bienveillance, à Laurent Benoît pour son accompagnement lors des missions sur le terrain ainsi qu'à Olivier Monfort pour la réalisation de certains traitements dédiés à cette mission.

J'adresse par ailleurs mes remerciements à la société PixAir Survey m'ayant permis de participer à des missions LiDAR en avion et de passer une journée au salon du Bourget.

Je remercie aussi l'équipe du CNES en charge du logiciel GINS-PC et en particulier Sylvain Loyer et Jean-Charles Marty qui ont su répondre à mes diverses interrogations quant aux problèmes que j'ai pu rencontrer avec le logiciel. Je remercie également Matthias Raynal pour ses échanges quant à l'utilisation des données SWOT.

Je remercie Yoann Bonte de Builders Caen pour la mission drone réalisée dans le cadre de ce projet.

Je souhaite en outre remercier Laurent Morel en tant que professeur référent pour ses conseils donnés lors de nos différentes entrevues ainsi que le temps accordé à la relecture de ce mémoire.

Enfin, je remercie à la fois ceux qui m'ont accompagné au bureau chaque jour, Xavier Pellerin-Lebas et Ayoub Yamoul, ainsi que l'ensemble des doctorants et stagiaires du laboratoire avec qui nous avons passé des moments conviviaux le midi.

Je ne pouvais conclure sans dire merci à ma famille et mes amis qui m'ont soutenu durant toute ma formation et qui m'ont aidé à la mener à son terme.

Liste des abréviations

ALS : Airborne Laser Scanning/Scanner

ASPRS : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

ASC : Agence Spatiale Canadienne

CalVal : Calibration and Validation

CLS : Collecte Localisation Satellite

CNES : Centre National des Etudes Spatiales

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CFOSAT : China France Oceanography SATellite

DGPS : Differential Global Positioning System

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

ECMWF : European Centre for Medium-range Weather Forecasts

FoV : Field of View

GINS : Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPS : Global Positioning System

GRGS : Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale

IGS : International GNSS Service

IMU : Inertial Measurement Unit

iPPP : integer Precise Point Positioning

JPL : Jet Propulsion Laboratory

KaRIn : Ka-band Radar Interferometer

LiDAR : Light Detection And Ranging

LRA : Laser Retro-Reflector Array

M2C : Morphodynamique Continentale et Côtière

NASA : National Aeronautics and Space Agency

PPP : Precise Point Positioning

SAR : Synthetic Aperture Radar

SSB : Sea State Biases

SSH : Sea Surface Height

SWH : Significant Wave Height

SWOT : Surface Water and Ocean Topography

ZHD : Zenith Hydrostatic Delay

ZWD : Zenith Wet Delay

Glossaire

Altimétrie : Technique de détermination des altitudes

Champ de vagues : Étendue spatiale de la surface de l'océan dans laquelle des vagues sont générées, se propagent puis se dissipent

Étalonnage : Vérification, par comparaison à un étalon, de l'exactitude des indications d'un instrument de mesure

Géoréférencement : Processus d'attribution de coordonnées géographiques dans un système de référence à un point ou à un ensemble de point

In situ : Sur place, dans le lieu où se déroule le phénomène examiné

Océanographie : Étude scientifique des mers et océans

Orbitographie : Détermination de la position d'un satellite en fonction de paramètres orbitaux

Résolution : Plus petite valeur absolue pouvant être distinguée par un système de mesure

Spectre en fréquence : Analyse et visualisation des différentes fréquences intervenant dans la constitution d'un signal

Topographie : Relief d'un lieu

Trajectographie : Détermination et étude de la trajectoire d'un véhicule aérospatial

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	4
Table des matières	5
Introduction	7
I La mesure de la surface des océans : état de l'art.....	9
I.1 L'ALTIMETRIE SATELLITAIRE	9
I.1.1 UNE EVOLUTION A TRAVERS UNE SUCCESSION DE MISSIONS ALTIMETRIQUES	9
I.1.1.1 PRINCIPE GENERAL DE L'ALTIMETRIE : L'EXEMPLE TOPEX/POSEIDON	9
I.1.1.2 DES CORRECTIONS SANS CESSER AMELIOREES.....	11
I.1.2 MISSION SWOT : ENJEUX ET INNOVATIONS	12
I.1.2.1 UN ROLE ESSENTIEL DANS LA GESTION DE L'EAU	12
I.1.2.2 KARIN, UNE REVOLUTION TECHNIQUE	13
I.1.2.3 UNE PREMIERE PHASE DE CALIBRATION ET DE VALIDATION	14
I.2 LE LiDAR	15
I.2.1 LE SYSTEME LiDAR POUR LA MESURE DU NIVEAU DE LA MER.....	16
I.2.1.1 LES PRINCIPES GENERAUX DU LiDAR AEROPORTE.....	16
I.2.1.2 L'EMPLOI DU LiDAR POUR LA MISSION SWOT	17
I.2.2 LE LiDAR DU LABORATOIRE M2C	18
I.2.2.1 LE LEICA ALS60 : SES COMPOSANTES ET SES SPECIFICATIONS.....	18
I.2.2.2 UNE COLLABORATION AVEC UNE SOCIETE PRIVEE.....	19
II Élaboration et application d'une stratégie d'étude pour la description de la surface de l'eau par LiDAR aéroporté	21
II.1 ACQUISITION DES MESURES : UNE CONTRAINTE DE SYNCHRONICITE	22
II.2 GEOREFERENCEMENT	22
II.2.1 CALCUL DE LA TRAJECTOIRE PAR TECHNIQUE iPPP	23
II.2.1.1 POSITIONNEMENT RELATIF CONTRE POSITIONNEMENT ABSOLU.....	23
II.2.1.2 L'INTEGER PRECISE POINT POSITIONING	24
II.2.2 LE GEOREFERENCEMENT D'UN VOL LiDAR	24
II.2.2.1 PARAMETRAGE DU CALCUL	24
II.2.2.2 RESULTATS ET APPRECIATION DE LA TECHNIQUE	25
II.3 CREATION D'UN OUTIL D'ANALYSE : LE SPECTRE DIRECTIONNEL DE VAGUES.....	28
II.3.1 LES DONNEES LiDAR EXPLOITEES	28
II.3.2 DESCRIPTION DU SPECTRE	29
II.3.3 PROBLEMES RENCONTRES ET SOLUTIONS APORTEES	30
II.3.3.1 L'IMPACT DE L'EFFET DOPPLER.....	30
II.3.3.1.1 SA CORRECTION ET SON ORDRE DE GRANDEUR.....	30
II.3.3.1.2 LA PROBLEMATIQUE DU DRONE LiDAR	30
II.3.3.2 LA CONSTRUCTION D'UNE METHODE D'EXPLOITATION D'IMAGES.....	31
II.3.3.2.1 PAR DECOUPAGE EN IMAGES CARREES : UNE METHODE LIMITEE	31
II.3.3.2.2 PAR ZERO-PADDING : UNE METHODE GLOBALE.....	32
II.3.3.3 ORIENTATION DES VAGUES ET ETAT DE MER	35
II.3.3.3.1 L'INCIDENCE SUR LE DOMAINE DE DEFINITION DU SPECTRE	35

II.3.3.3.2	L'INTERET DE LA FORME DE L'ACQUISITION	36
II.4	VALIDATION ET MISE EN PLACE DES METHODES DE COMPARAISON	37
II.4.1	LE SPECTRE DE VAGUE : VALIDATION AVEC LES BOUEES HOULOGRAPHERS	37
II.4.2	LE CALCUL DE SSH : MISE EN PLACE DE LA METHODE AVEC LES PRODUITS DE SWOT	38
Conclusion	.....	41
Bibliographie	.....	42
Table des annexes	.....	47
Liste des figures	.....	66
Liste des tableaux	.....	66

Introduction

Lancé le 16 décembre 2022, le satellite-altimètre Surface Water Ocean Topography (SWOT) doit permettre d'observer et d'étudier comme jamais auparavant les phénomènes qui régissent à la fois les eaux continentales mais également les océans. Et dans un contexte d'urgence climatique, suivre les évolutions des niveaux en eau à une résolution très fine est désormais déterminant (CNES, 2023, c). Cette mission, menée conjointement entre le CNES et la NASA, représente aussi une révolution technique dans l'histoire récente des satellites altimètres. SWOT possède en effet un altimètre interférométrique KaRIn doté d'une grande précision et capable de couvrir une zone bien plus importante que les altimètres nadirs utilisés dans les missions d'altimétrie satellitaire précédentes (CNES, 2023, b). De ce fait, il est capable de couvrir l'entièreté du globe en l'espace de 21 jours, ce qui était impossible auparavant. SWOT fait notamment suite aux satellites Sentinel 3B (2018) et 3A (2016) ainsi qu'à leurs prédécesseurs TOPEX/Poséidon (1992), Jason 1 (2001), Jason 2 (2008) et Jason 3 (2016) ayant contribué à de grandes avancées dans le domaine de l'océanographie.

Ce travail de recherche s'inscrit dans la phase d'étalonnage, communément appelée dans la communauté scientifique étape de calibration et de validation (CalVal) du satellite, qui a débuté en avril 2023. Cette période, d'une durée de 3 mois, doit servir à confirmer la cohérence des performances du satellite avec celles d'instruments dont la fiabilité a déjà été prouvée (NASA, 2018). Cette recherche constitue une innovation dans ce domaine puisqu'elle se focalise sur l'emploi du Light Detection And Ranging (LiDAR) aéroporté ou Airborne Laser Scanning (ALS) pour la comparaison, entre mesures satellitaires et mesures *in situ*, nécessaire à l'étalonnage de SWOT. Les mesures obtenues par capteur LiDAR seront dans cette étude qualifiées d'observations *in situ*. Les travaux menés à ce sujet par Laetitia Roguet (2022), Romain Serthelon (2020) et Paul Ternon (2019), anciens étudiants de l'École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes (ESGT) au laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), ont permis de faire ressortir deux moyens de comparaison entre ces deux types de capteurs. Une acquisition effectuée en 2020 au large de l'île d'Ouessant (Finistère, France) servira de cas d'étude pour évaluer ces deux méthodes.

La première repose sur la mesure de hauteur de la surface de l'eau par rapport à un ellipsoïde de référence, appelée Sea Surface Height (SSH). Pour cela, des calculs de trajectographie par méthode integer Precise Point Positioning (iPPP) seront réalisés à l'aide du logiciel GINS-PC développé par le CNES. L'iPPP, ou Precise Point Positioning with

Ambiguity Resolution (PPP-AR) est une technique de positionnement absolu, ne nécessitant qu'un seul récepteur, mais aussi cinématique dont le temps de convergence est bien plus court que le PPP classique (Loyer, 2012). Elle est ainsi parfaitement adaptée au géoréférencement d'une campagne avec LiDAR aéroporté en mer impliquant parfois un éloignement des côtes, et donc des bases GNSS. De plus, les travaux menés par Laetitia Roguet ont démontré que le calcul de la trajectoire par iPPP atteint la précision nécessaire pour l'étalonnage de l'altimètre. La principale source d'erreur de mesure provient plutôt du bruit altimétrique dû à la houle (Bonnefond, 2022) pouvant être atténué par une analyse spectrale de la surface de l'eau.

Cette seconde méthode complémentaire s'appuie en effet sur l'analyse de champs de vague par le biais de spectres directionnels mettant en évidence les vecteurs d'onde prédominants sur un secteur. Un vecteur d'onde est caractérisé par un nombre d'onde, correspondant à sa norme, ainsi que par une direction sur un plan horizontal. Dans le cadre d'une acquisition LiDAR par avion, de faible altitude par rapport à celle du satellite, des erreurs liées à l'effet Doppler devront inévitablement être prises en considération.

Le laboratoire M2C souhaite ainsi se servir de son capteur LiDAR Leica ALS60 pour participer à l'étalonnage de SWOT en plus de la mise en place de deux sites de calibration dans le Cotentin en Normandie. Des campagnes d'acquisition LiDAR seront réalisées sur la trace du satellite durant cette période d'étalonnage lors de laquelle SWOT aura une orbite d'environ une journée. Les problématiques liées à la simultanéité de la mesure entre le satellite et le LiDAR seront considérées. En effet, l'état de la mer varie très rapidement sur certains secteurs pouvant ainsi altérer la comparaison. L'objectif de ce projet sera d'une part de confirmer l'efficacité du LiDAR pour la calibration et la validation d'un altimètre et d'autre part de mener une réflexion sur la combinaison de multiples capteurs à diverses échelles pour une meilleure connaissance de la topographie de la surface des océans.

Ce rapport comporte une première partie qui expose et met en parallèle l'art de la mesure de la surface des océans au moyen de deux instruments spécifiques : l'altimètre et le LiDAR. Nous nous focaliserons en particulier sur l'enjeu de ce travail dans le cadre de l'étalonnage de SWOT. Par ailleurs, la seconde partie aborde de manière détaillée la stratégie élaborée dans l'objectif de comparer les mesures de ces deux instruments. Nous analyserons ses étapes en l'appliquant à différents cas d'étude et tenterons de valider les deux méthodes de comparaison que sont le spectre directionnel de vagues et le calcul de SSH.

I La mesure de la surface des océans : état de l'art

L'océan est un système dynamique pouvant varier à diverses échelles d'élévation et de temps, ce qui le rend particulièrement difficile à mesurer. Avec une surface représentant environ 71% de la planète, il est un acteur majeur des changements climatiques. Depuis l'Antiquité, études et techniques se sont succédé dans le but de mieux comprendre les phénomènes qui structurent l'océan. La véritable première expédition scientifique fut celle nommée Challenger datant de 1872. Réalisée par bateau, elle a permis de recueillir de nombreuses données océanographiques en l'espace de 1290 jours, soit environ 4 ans. Mais à partir des années 1970, l'altimétrie satellitaire va révolutionner les moyens d'études de notre planète et en particulier des océans. Elle a considérablement aidé à la perception plus poussée des phénomènes majeurs à l'échelle de la planète. En revanche, cette faible résolution qui caractérise les altimètres, bien que celle-ci soit de plus en plus améliorée, n'est pas systématiquement suffisante pour analyser les océans dans leur globalité. Il serait ainsi intéressant d'associer les mesures satellitaires avec celles provenant d'un capteur capable d'apporter une meilleure résolution sur une échelle de temps réduite. Plus récemment démocratisée, la technologie LiDAR semble être une solution adaptée pour l'observation de l'océan à des échelles plus fines.

I.1 L'altimétrie satellitaire

Un satellite possède l'avantage de pouvoir couvrir l'entièreté du globe en quelques dizaines de jours en orbite polaire. Et l'instrumentation qu'il possède est primordiale car c'est elle qui va définir la fiabilité des informations recueillies depuis l'espace. Plusieurs types d'instruments ont été développés ces dernières années dans le but d'améliorer la précision des mesures et donc la compréhension fine de ce vaste système qu'est l'océan.

I.1.1 Une évolution à travers une succession de missions altimétriques

I.1.1.1 Principe général de l'altimétrie : l'exemple TOPEX/Poséidon

Premier altimètre spatial à avoir été lancé, TOPEX/Poséidon a révolutionné la mesure des océans. En l'espace de 10 jours, les données obtenues par le satellite « non seulement correspondent » à celles recensées depuis cent ans mais également fournissent « plus de détails » (CNES, 2023, a). TOPEX/Poséidon disposait en effet d'une précision instantanée, soit toutes les secondes, de 6 cm (CNRS, 1995). Jamais auparavant, il n'avait été possible de connaître avec une telle précision chaque endroit de la mer. Cette justesse

dans la mesure était en partie due à son système de positionnement et donc à la très bonne connaissance de son orbite. Le satellite était composé de plusieurs antennes réceptionnant des signaux différents : une antenne GPS, un récepteur DORIS, un système laser LRA ainsi qu'un radiomètre. La combinaison entre ces récepteurs augmente la fiabilité de la mesure.

Le calcul de positionnement par GPS s'opère par triangulation et nécessairement à l'aide de quatre satellites localisés et observés en simultanément : trois pour la position et un supplémentaire pour la synchronisation de l'horloge interne du récepteur. Le récepteur DORIS se base lui sur des balises au sol et calcule sa vitesse -et donc sa position- par étude de l'effet Doppler (Dufour, 2001). Le positionnement par laser (LRA) exige de disposer de miroirs qui réfléchissent des émissions laser diffusées depuis des stations terrestres. Le temps que met le rayonnement laser à revenir définit la position du satellite sur son orbite et délivre des informations pour la calibration du biais de l'altimètre (CNES, 2023, a). Enfin, le radiomètre permet de déterminer la contenance en eau de l'atmosphère en collectant des émissions à trois fréquences différentes. Cette contenance définit alors le retard causé par la vapeur d'eau et contribue ainsi à l'amélioration de la précision des mesures réalisées par l'altimètre.

En plus d'un système d'orbitographie complet et performant, le satellite embarque un altimètre capable de mesurer la surface des océans avec précision. Celui de TOPEX/Poséidon et de la plupart qui ont suivi est un altimètre visant au nadir. Le principe est très simple : des impulsions radars sont émises à une très haute fréquence à la verticale du satellite. Elles sont ensuite réfléchies par la surface du sol qui les renvoie avec plus ou moins d'intensité. La distance entre le satellite et la surface au sol (R) peut être calculée en fonction du temps que le signal a mis pour revenir et de la vitesse de la lumière. Connaissant l'altitude précise du satellite (S), la hauteur de la surface au sol (H) en est déduite selon l'ellipsoïde de référence choisie (voir figure 1 et équation 1) :

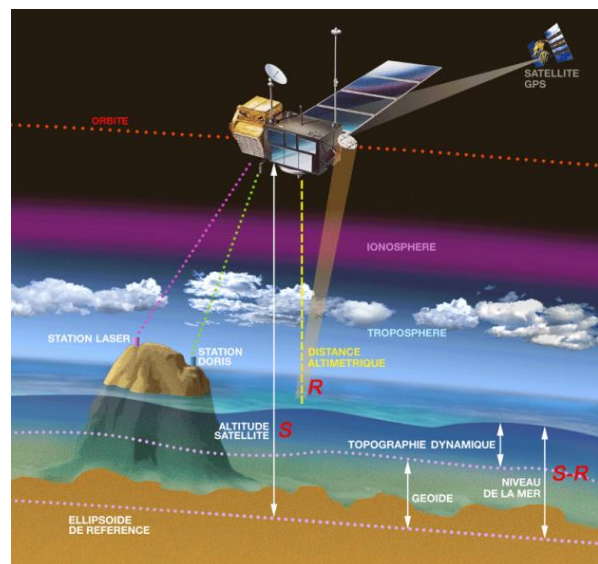


Figure 1 : Principe général de l'altimétrie satellitaire (ill D.Ducros, CNES)

$$H = S - R \quad [1]$$

En réalité, la hauteur de la surface de l'eau calculée (H) résulte d'une moyenne entre les mesures d'élévations réalisées sur une zone dont la surface dépend des caractéristiques de l'altimètre (Stammer, 2017). Cette surface définit ainsi la résolution des produits fournis par le satellite. De plus, la distance entre le satellite et la surface (R) est impactée par plusieurs types d'erreurs. Et pour garantir une précision de quelques centimètres, il est indispensable de les connaître parfaitement.

I.1.1.2 Des corrections sans cesse améliorées

Tout d'abord, plusieurs erreurs indépendantes sont liées à la traversée du signal dans l'atmosphère. En effet, la troposphère et l'ionosphère sont les deux couches à l'origine du retard de l'impulsion. La présence d'électrons dans l'ionosphère engendre parfois une erreur de plus de 30 cm en période d'activité solaire maximale (Stammer, 2017). Les altimètres équipés d'un radar bi-fréquence, comme TOPEX/Poséidon, peuvent alors obtenir la correction à appliquer par la combinaison des deux fréquences différentes. Pour un radar mono-fréquence, l'erreur est estimée au moyen d'un modèle global comme le modèle NIC09¹.

La troposphère se divise elle en deux parties : la partie sèche et la partie humide. La première citée contient des gaz qui sont, en très grande partie, à l'origine du retard du signal lors de son passage dans la troposphère. Bien que ce retard, aussi appelé Zenith Hydrostatic Delay (ZHD), soit de l'ordre de 2.3 m, il reste relativement constant et peut facilement s'éliminer à partir d'un modèle connu (Fernandes, 2021). Au contraire, le retard causé par la traversée de la partie humide de la troposphère, ou Zenith Wet Delay (ZWD), est très variable dans le temps et l'espace et est donc bien plus complexe à estimer. Il correspond à environ 10% du retard total et ne peut ainsi être négligé (Fernandes, 2021 ; Fund, 2010). Sa correction peut alors provenir de mesures *in-situ*, de modèles de prédictions météorologiques comme ceux produits par l'ECMWF ou bien des radiomètres qui accompagnent les altimètres. Elle varie de ce fait entre 0 et 50 cm (Stammer, 2017).

D'autres sources d'erreur sont également liées aux phénomènes de marées. D'une part, la marée océanique, participe fortement à la variabilité des océans. Le marnage, défini comme étant l'amplitude des marées, ne dépasse généralement pas 1 m en pleine mer. Celui-ci augmente en revanche lorsque l'on se rapproche des côtes. C'est le cas par exemple de la

¹ NOAA Ionosphere Climatology 2009

baie du Mont-Saint-Michel (France), bien connue pour ses marées de grande amplitude et dont le marnage atteint parfois 15 m (Poullain, 2013). Bien que son influence soit relativement faible, il est aussi nécessaire de considérer la marée polaire. Elle résulte de légères perturbations de la Terre par rapport à son axe de rotation et ses effets sont de l'ordre de quelques centimètres. Un dernier phénomène géophysique correspond à la marée terrestre -ou marée solide- provoquant une erreur altimétrique comprise entre 0 et 50 cm pour les continents (Stammer, 2017).

En plus de cela, en raison de la non-linéarité de la surface des océans, des biais plus ou moins importants se retrouvent dans la mesure selon l'état de la surface en eau rencontré. Si le radar mesure une réflexion dans le creux d'une vague, l'intensité du signal reçu sera plus importante que sur la crête. Cette erreur engendre alors une sous-estimation de la hauteur de la surface moyenne de l'eau. Un biais global, appelé Sea State Biais (SSB), combine ainsi généralement toutes les corrections liées à l'état de la mer et est compris entre 0 et 30 cm pour une précision approchant les 2 cm (Guo, 2023 ; Stammer, 2017).

Enfin, des corrections instrumentales interviennent pour éliminer des erreurs soit de calibration interne, soit liées à une dérive de l'oscillateur, à l'effet Doppler ou encore à un défaut angulaire de pointage. Elles rectifient communément les mesures de quelques centimètres. Le tableau 1 résume les principales sources d'erreur qui interviennent dans la mesure de distance par radar altimétrique, leur ordre de grandeur ainsi que les techniques qui permettent de les corriger.

Type de correction	Ionosphère	Troposphère		Marée			SSB	Instrumentale
		ZHD	ZWD	Océanique	Terrestre	Polaire		
Ordre de grandeur	0–30 cm	~2.3 m	0–50 cm	0–15 m	0–50 cm	1–2 cm	0–30 cm (préc. 2 cm)	1–2 cm
Méthode	Combinaison bi-fréquence ou modèle	Modèle	Mesures in situ, modèle ou radiomètre	Marégraphes ou modèle	Modèle	Modèle	Modèle	Étalonnage

Tableau 1 : Synthèse des corrections sur la mesure radar

I.1.2 Mission SWOT : enjeux et innovations

I.1.2.1 Un rôle essentiel dans la gestion de l'eau

Les missions altimétriques précédentes ont ainsi permis d'avoir une bonne connaissance des circulations océaniques majeures et de mieux comprendre leur influence sur les changements climatiques. L'objectif principal de la mission SWOT est d'une part d'affiner cette connaissance mais également de la compléter avec l'observation de

phénomènes qui n'étaient pas visibles avec les anciens altimètres. Pensée depuis 1998 (CNES, 2023, b), cette mission dispose d'un intérêt pour deux domaines scientifiques différents : l'océanographie et l'hydrologie. En effet, pour la première fois, un satellite sera en partie dédié aux eaux continentales et côtières. Dès lors, ce ne sont pas moins de 90% des eaux de surface de la Terre qui seront désormais connues grâce à la mission (ASC, 2023). SWOT est aussi en mesure de différencier deux volets de l'océan : le premier correspondant aux littoraux et estuaires alors que le second est consacré aux océans. La mission est cruciale d'un point de vue climatique. Pour les littoraux déjà, qui sont des zones très peuplées et parfois soumises aux risques d'inondation et d'érosion côtière. Ce satellite va permettre ainsi de détecter et de quantifier le recul du trait de côte et de prévoir des scénarios souvent demandés par les collectivités pour établir leurs documents de planification (CNRS, 2022). Les prévisions de tempêtes et de fortes marées seront aussi mieux anticipées. En effet, les seules observations que l'on possède aujourd'hui sont essentiellement ponctuelles dans l'espace, comme cela est le cas pour les marégraphes. Mais SWOT va pouvoir apprécier ces variations à n'importe quel endroit du globe et à un intervalle de temps relativement court pour observer leur évolution. Mieux se préparer aux risques futurs constitue le grand enjeu auquel doit servir la mission SWOT.

I.1.2.2 KaRIn, une révolution technique

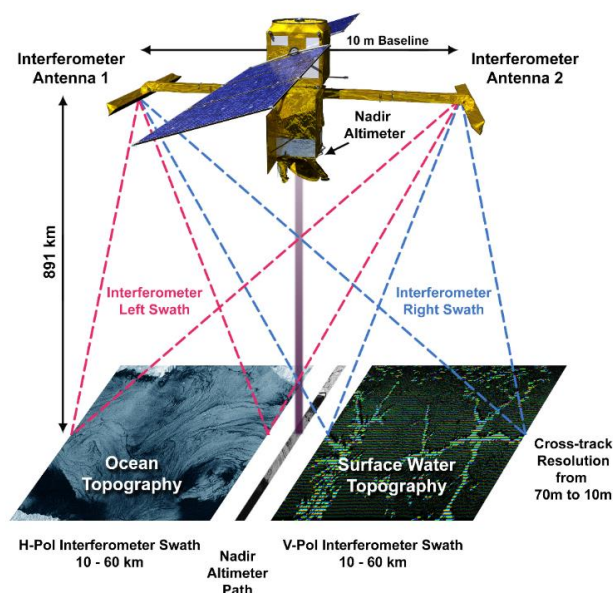


Figure 2 : Le satellite SWOT et son système interférométrique (CNES, 2023, b)

Cette amélioration drastique des performances de l'altimètre est en majeure partie due à son radar interférométrique KaRIn. Véritable révolution technologique, il est capable de couvrir deux larges fauchées de 50 km aux deux extrémités d'un mât de 10 m (voir figure 2). SWOT embarque aussi avec lui un altimètre nadir, dit classique, du nom de POSEIDON-3C d'une emprise au sol de 5 à 10 m environ. Son objectif est d'une part de compléter les bandes produites par le radar interférométrique et d'autre part

de jouer un rôle important dans la phase de calibration du satellite.

KaRIn est composé de deux antennes toutes les deux émettrices/réceptrices en bande Ka et disposées des deux côtés du mât. La bande Ka, d'une fréquence de 35 GHz, favorise l'observation de la glace, des zones côtières ainsi que de la hauteur des vagues (CNES, 2023, a). L'instrument KaRIn emploie le principe des altimètres SAR² (Synthetic Aperture Radar ou Radar à Synthèse d'Ouverture) mais dans une configuration différente notamment en raison de la technique de mesure employée. Au moyen de ses deux antennes, le radar interférométrique détermine la position d'un point par calcul de différence de phase. Le radar fonctionne en mode bi-statique, c'est-à-dire qu'une seule des deux antennes émet le signal mais les deux réceptionnent ce même signal réfléchi. Le principe mathématique de mesure opéré par KaRIn est notamment abordé en annexe³.

Malgré les 891 km le séparant de la Terre, le radar interférométrique est annoncé avec une précision de 50 cm en élévation instantanée pouvant baisser à moins de 2 cm à la suite d'une moyenne entre les élévations observées sur une surface de 1 km² (CNES, 2023, a). Des produits possédant deux résolutions différentes sont fournis suivant la typologie de la zone mesurée. Un produit High Resolution (HR) est dédié à l'hydrologie continentale qui, comme son nom l'indique, offre une très haute résolution et s'active uniquement au-dessus des continents. Le second produit concerne les océans ; il correspond au produit Low Resolution (LR). Sa précision altimétrique reste très élevée mais la résolution planimétrique est abaissée. Il est néanmoins bien plus résolu que les produits fournis par les altimètres nadirs précédents.

On observe de ce fait une rupture de concept majeure dans l'altimétrie satellitaire. Les radars visant au nadir collectent des données ponctuelles le long de la trace du satellite et espacées de plusieurs dizaines de kilomètres, ce qui ne permet pas l'observation sur des zones complexes telles que les littoraux. Au contraire, le radar interférométrique sera lui en mesure de fournir une image bidimensionnelle avec une résolution de 250 m à 2 km pour l'océan et de 100 à 250 m pour les zones proches du littoral (CNRS, 2022).

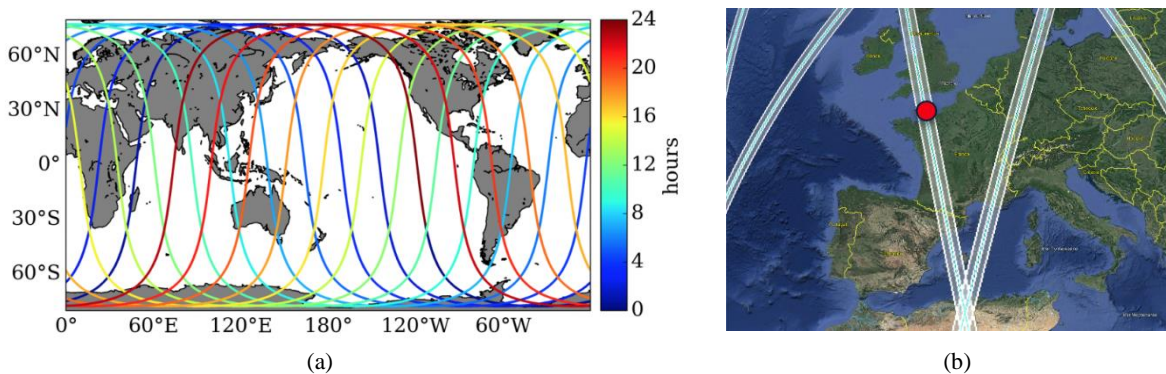
I.1.2.3 Une première phase de calibration et de validation

La mission SWOT doit s'étaler sur 3 ans et débute par une phase de tests puis une phase d'étalonnage aussi appelée phase de calibration et validation (CalVal). Ce travail de recherche se déroule lors de cette deuxième phase préparatoire qui sert à contrôler les

² Voir annexe 1

³ Voir annexe 2

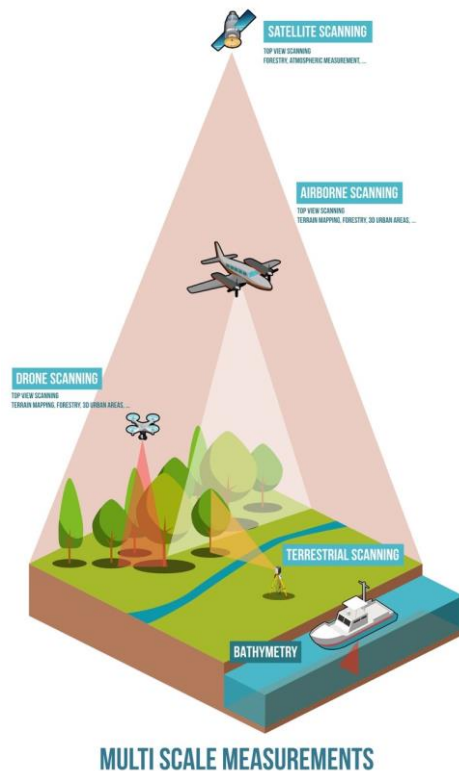
premières données acquises par le satellite. Elle a débuté à partir du mois d’avril 2023 et dure 3 mois. Durant cette période, la répétitivité de l’orbite du satellite, ou son cycle, est d’environ une journée (0.99349 jour) ; c’est-à-dire que SWOT survole les mêmes zones chaque jour avec une légère dérive du temps de passage. Un cycle est notamment composé de plusieurs passes qui peuvent être soit ascendantes ou descendantes (voir figures 3a et 3b). Cet « échantillonnage rapide » permet de constater plus efficacement l’évolution des phénomènes et donc de faciliter la calibration de l’altimètre (CNES, 2023, a). Son orbite passera à 21 jours à partir de juillet 2023 et couvrira alors l’entièreté du globe.



I.2 Le LiDAR

Les premières utilisations de la télédétection laser remontent aux années 60 et étaient consacrées aux missions lunaires de la NASA. La technologie LiDAR a mis beaucoup de temps avant d’être commercialisée puisqu’elle ne bénéficiait pas du balayage ni du géoréférencement direct. Elle est aujourd’hui intéressante pour produire une représentation dense, ce qui offre la possibilité de scanner entre les arbres par exemple, et avec une très bonne précision. Ces avantages ont fait de ce capteur une alternative très performante à ceux destinés à la photogrammétrie.

Un capteur LiDAR peut aujourd’hui se déployer sur différents supports aéroportés et parfois terrestres (voir figure 4). Même s’il est coûteux, le moyen de plus employé pour couvrir une vaste zone



en un temps relativement court reste encore l'avion. Les échelles de résolution et de temps sont tout de même bien éloignées de celles des satellites. Le LiDAR n'a été perçu que très récemment comme un outil alternatif aux altimètres qui ne sont parfois pas optimaux pour l'observation océanographique de phénomènes localisés et très variables dans le temps. C'est le cas par exemple des interactions entre la côte et les littoraux. En effet, les altimètres sont contraints par leur orbite, ce qui ne permet pas l'observation sur un espace de temps raccourci. Et pourtant la connaissance de la fine échelle océanique est cruciale pour comprendre les cycles et déplacements globaux.

I.2.1 Le système LiDAR pour la mesure du niveau de la mer

I.2.1.1 Les principes généraux du LiDAR aéroporté

Le capteur LiDAR est un capteur actif ; il émet une impulsion puis reçoit cette même impulsion réfléchiée par une surface. De cette réception découle des informations sur la distance séparant le capteur de la surface ainsi que sur l'intensité de l'impulsion après réflexion. Il est possible que le signal laser heurte un ou plusieurs objets avant de revenir au récepteur et que seule une faible partie de l'énergie émise soit récupérée. L'impulsion se divise alors en multiples échos. L'écart de temps entre ces échos indique l'élévation entre les différentes surfaces qui ont réfléchi l'impulsion.



Figure 5 : Le fonctionnement du Lidar aéroporté (M2C)

Le couplage du LiDAR avec une centrale inertielle IMU, donnant des indications sur les angles de roulis (roll), de tangage (pitch) et de lacet (yaw), ainsi que d'un récepteur GNSS produit un nuage de points directement géoréférencé (voir figure 5). Un ou plusieurs autres récepteurs GNSS assurent un rôle de base au sol pour un positionnement relatif. Ils doivent

être stationnés dans la zone relevée et à une distance du mobile inférieure à 25 km d'éloignement (Purkis, 2013), le mobile étant l'antenne positionnée sur l'avion.

L'emprise au sol du levé (en rouge sur la figure 5) dépend de nombreux paramètres. En effet, le mécanisme d'acquisition influe grandement sur la résolution spatiale et notamment le long de deux dimensions : selon l'axe de vol et à la perpendiculaire de ce même axe (Fernandez-Diaz, 2014). D'une part, les scanners les plus répandus fonctionnent généralement avec des lasers à balayage et possèdent ainsi des fréquences et angles de balayage qui jouent sur la résolution perpendiculaire à la direction de vol. D'autre part, la vitesse de déplacement de l'avion définit la résolution le long de l'axe de vol. Enfin, l'écart entre points successifs dépend de la fréquence des impulsions mais également de l'altitude de vol de l'avion. La connaissance de ces divers paramètres est essentielle pour adapter les acquisitions aux produits souhaités.

I.2.1.2 L'emploi du LiDAR pour la mission SWOT

Généralement, les surfaces réfléchissantes comme l'eau posent quelques problèmes aux capteurs LiDAR du fait de l'absorption des faisceaux lasers ou des réflexions spéculaires que peut provoquer la surface d'une eau plate. Cela engendre ainsi des retours d'impulsions très faibles voire nuls. Cependant, une fois doté d'une configuration appropriée, le LiDAR peut être utilisé pour acquérir une donnée précise de la surface de l'eau (voir partie I.2.2.1). L'objectif consiste donc, dans ce travail, à évaluer les produits du tout nouveau satellite SWOT au moyen de la technologie LiDAR dont les capacités sont aujourd'hui parfaitement connues. Cette comparaison constitue un caractère encore innovant puisque le LiDAR n'est encore que très peu adopté lors des campagnes d'étalonnage des altimètres. Ces deux outils de mesure opèrent à des échelles spatiales et temporelles différentes et se complètent ainsi parfaitement. L'un des intérêts de cette étude réside néanmoins dans la recherche d'un domaine de définition qui serait exploitable à la fois avec les données de l'altimètre et celles acquises par capteur LiDAR permettant ainsi de les comparer.

Des recherches ont montré que le LiDAR était capable de détecter des variations de hauteur de la fin de la *mésoéchelle*, soit les longueurs d'onde comprises entre 100 à 1000 km, jusqu'aux *ondes capillaires* dont la longueur d'onde approche 1 cm (Melville, 2016). Il semble donc adapté à l'étalonnage de la plus fine échelle à laquelle SWOT reste efficient, soit environ 15 km. La calibration des plus grandes longueurs d'onde, au-delà de 150 km, est réalisée à l'aide de l'altimètre nadir embarqué ainsi que des altimètres provenant d'autres

satellites (Fu, 2014). L'altimètre nadir bénéficie en effet du succès des calibrations de plusieurs anciennes missions et donc d'une très bonne connaissance de ces performances (Morrow, 2019).

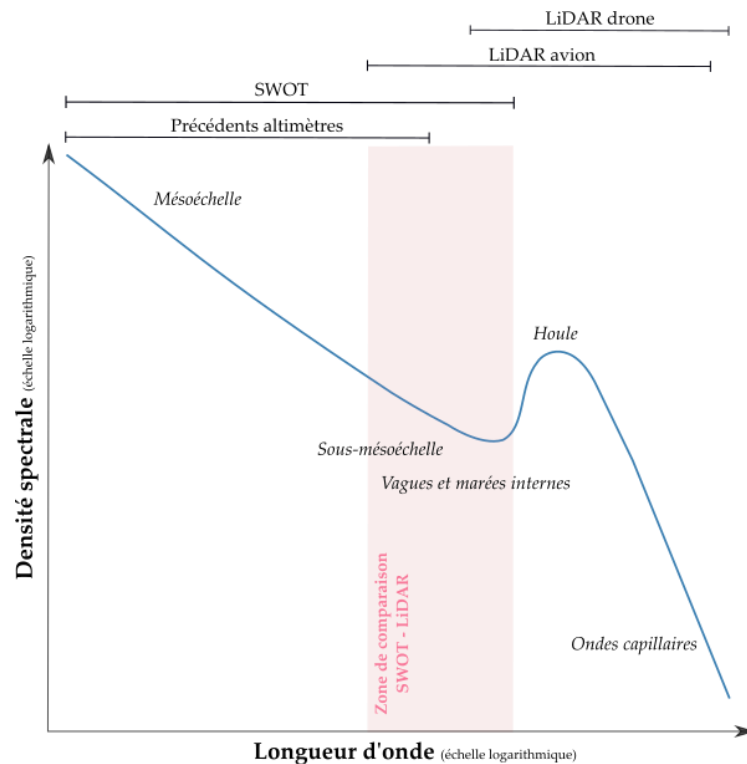


Figure 6 : Spectre global de la hauteur de la surface de la mer SSH

La figure 6 décrit les couvertures spectrales des différents instruments de mesure comparés dans notre étude. Le spectre représenté sur ce graphique correspond au spectre en fréquence des variabilités de Sea Surface Height (SSH) des océans. Traditionnellement, deux groupements d'échelle de vagues sont étudiées indépendamment : la *mésoséchelle* (au-delà de 100 km) et les ondes de gravité comme la *houle* (en deçà de quelques km). Or, pour la première fois, SWOT explore la zone de transition entre ces deux parties, dans laquelle sont notamment présentes les *vagues et marées internes*. Cette avancée va permettre de considérer le spectre SSH dans son ensemble et de comprendre l'influence de certains types de vague sur les circulations océaniques (Villas Bôas, 2022). C'est notamment pour cette zone du spectre que le LiDAR va avoir un rôle à jouer dans l'étalonnage de l'altimètre.

I.2.2 Le LiDAR du laboratoire M2C

I.2.2.1 Le Leica ALS60 : ses composantes et ses spécifications

Dans le laboratoire M2C, le LiDAR utilisé est un Leica ALS60 équipé d'un laser proche infrarouge de longueur d'onde équivalent à 1064 nm. Avec une telle longueur d'onde, ce capteur est capable de relever des points à la surface de l'eau puisque en effet ses

impulsions ne pénètrent que très faiblement l'eau. Le scanner du Leica ALS60 est associé à un bloc alimentation comportant la centrale inertielle IMU ainsi que le stockage des données récoltées. Son couplage avec une antenne GNSS implique l'intégration de logiciels de traitement au système LiDAR.

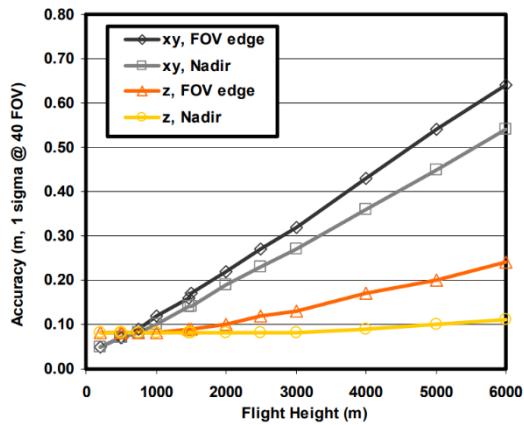


Figure 7 : La précision absolue de l'ALS60 (en m) avec un FoV à 40° et un positionnement DGPS en fonction de la hauteur de vol (Leica, 2008)

L'ALS60 dispose de caractéristiques techniques ajustables. Son FoV (Field of View), correspondant au champ de vision du capteur, peut être compris entre 0 et 75°. Avec un FoV de 40° par exemple, il est possible d'avoir une bande au sol entre 800 à 1000 m de largeur. La fréquence maximale de balayage (Max Scan Rate) quant à elle ne peut pas aller au-delà de 100 Hz. Elle est à distinguer de la fréquence d'impulsion qui de son côté est bien supérieure et avoisine les 144 kHz. En ce qui concerne la

précision, l'erreur globale s'obtient en combinant les différentes sources d'erreur ; soit l'erreur de positionnement GNSS (5 cm en DGPS contre 2 cm en iPPP en mer (voir partie II.2.2.2)), l'erreur du laser (1 à 5 cm), l'erreur liée au défaut angulaire de l'instrument et enfin l'erreur due à la divergence du faisceau lumineux. Et cette erreur globale dépend principalement de la hauteur du capteur par rapport à la surface mesurée. La figure 7 démontre bien que la meilleure précision s'obtient pour une altitude de vol comprise entre 0 et 1000 m. Pour un vol à 600 m et une erreur GNSS de 5 cm, la précision absolue de la hauteur d'eau est d'environ 8 cm.

1.2.2.2 Une collaboration avec une société privée

Cependant, le laboratoire M2C ne possède pas d'avion pour réaliser ses vols LiDAR. C'est pourquoi elle collabore régulièrement avec la société PixAir Survey basée à Rouen. Ses principales activités se concentrent autour de l'imagerie aérienne, la retransmission télé, et la surveillance maritime. La société détient un certain nombre d'avions disposant d'une trappe dans laquelle peut s'installer le système du LiDAR ALS60. Trois types d'avions peuvent être utilisés, chacun des avions possédant des caractéristiques et donc des applications qui leurs sont propres. Le premier est le Piper PA31 Chieftain (voir figure 8a), dont la vitesse peut varier de 115 à 150 nœuds en acquisition. C'est un avion relativement rapide, particularité parfois très utile sur certaines missions et en particulier pour la mission

SWOT (voir I.2.2.3). Le second type d'avion, surnommé avion « tout terrain », correspond au Britten Norman Islander. Reconnu pour être très polyvalent, il se distingue par la grande longueur de ses ailes et par sa vitesse réduite. Il est ainsi très intéressant pour l'acquisition de nuages de points denses. Troisième et dernier type, le Swearingen Fairchild Merlin est l'avion le plus rapide et apte à voler à de très hautes altitudes. Celui-ci se prête très bien à des acquisitions rapides sur de larges zones (PixAir, 2023).

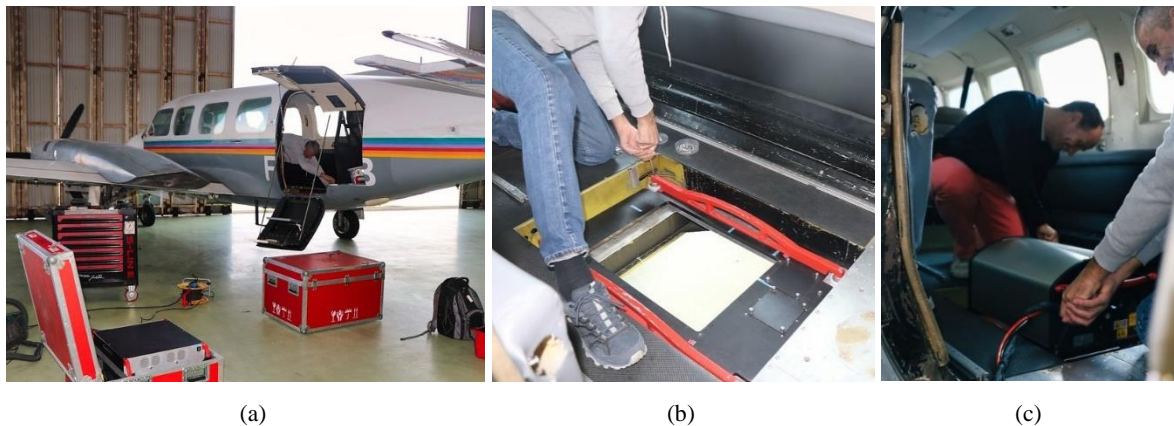


Figure 8 : Le Piper PA31 Cheftain de la société PixAir Survey (a) et sa trappe (b) dans laquelle est installé l'ALS60 (c) (23.05.2023)

Une platine à la dimension du LiDAR (voir figure 8b), disposant notamment de pièces anti-vibratoires appelées silent blocs, est conçue pour chaque trappe des avions. Elle fait office de support sur lequel le LiDAR est positionné dans l'aéronef (voir figure 8c). Et selon la spécificité de la trappe, le champ de vision du capteur LiDAR peut être contraint si celle-ci est trop profonde⁴.

⁴ Voir annexe 3

II Élaboration et application d'une stratégie d'étude pour la description de la surface de l'eau par LiDAR aéroporté

Cette étude se focalise sur les variations de l'état de la surface de la mer observables à la fois par les satellites mais aussi par capteur LiDAR. Les altimètres étant performants à des échelles de plus en plus fines, elle endosse un intérêt majeur pour leur étalonnage. Mon travail consiste ainsi à élaborer et évaluer une stratégie de description de l'état de mer à partir de données LiDAR. L'objectif est ensuite de l'adopter à l'occasion de la campagne d'étalonnage de SWOT.

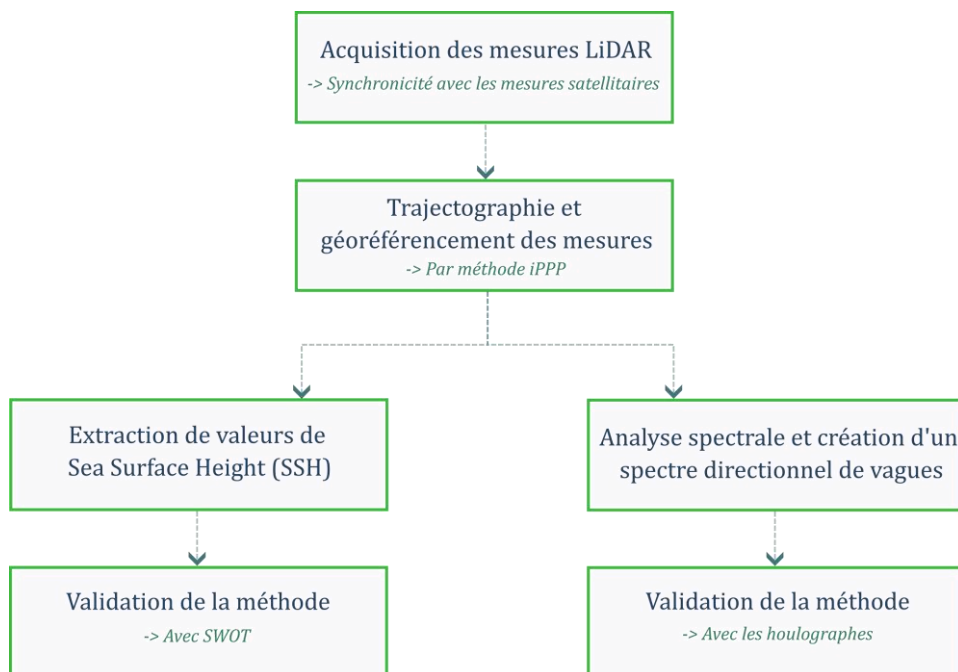


Figure 9 : Les étapes de la stratégie de comparaison entre mesures LiDAR et satellitaires

Les différentes étapes du processus sont abordées dans cette partie en soulignant notamment leur importance vis-à-vis de l'objectif comparatif souhaité dans ce travail (voir figure 9). Nous verrons qu'il existe au moins deux méthodes de comparaison dont une que nous développerons dans ce rapport. La première repose sur la mesure de SSH à des positions connues tandis que la deuxième revient à caractériser un champ de vague ; une caractérisation qui s'opère par traitements d'images. Par ailleurs, nous évoquerons les problèmes rencontrés lors de l'élaboration de cette seconde méthode. A l'aide de plusieurs cas d'étude, nous analyserons enfin la fiabilité de ces deux procédés et leur apport dans la stratégie globale.

II.1 Acquisition des mesures : une contrainte de synchronicité

Dans le cas d'un vol pour la mission d'étalonnage de SWOT, la principale condition est de l'effectuer en même temps que le passage du satellite sur la zone. Lors de la phase d'étalonnage, l'orbite du satellite correspond à environ une journée et son passage au-dessus de la zone se fait en quelques secondes seulement. Dans l'idéal, l'avion doit être en vol à ce moment-là. Le plan de vol est donc constitué de radiales principales, ou bandes, réalisées de manière longitudinale par rapport à la trajectoire du satellite tandis que plusieurs bandes transversales viennent les compléter⁵. Le vol doit également être suffisamment rapide pour mesurer le maximum de points sur une grande zone en un temps réduit.

Avec l'objectif de confronter les observations LiDAR et celles de SWOT lors de sa phase d'étalonnage, des vols ont ainsi été planifiés au cours des mois de mai et juin 2023 en suivant le plan de vol établi à l'annexe 4. Ces dates ont été choisies en fonction des conditions météorologiques mais aussi des contraintes imposées par l'avionneur. L'heure de vol devait également correspondre avec le passage de SWOT. Par exemple, pour les dates du 16.06.2023 et du 17.06.2023 cela correspondait respectivement à 0h38 et 0h29 (UTC+2)⁶. Les vols ont dès lors été réalisés dans différentes conditions et au-dessus de plusieurs zones (voir tableau 2).

<i>Nom du vol</i>	<i>Date</i>	<i>Durée de vol (sur site)</i>	<i>Avion</i>	<i>Type de trappe</i>	<i>FoV (en deg)</i>	<i>Nbr de bandes (+ calibration)</i>	<i>Trajectoire prétraitée</i>
<i>SWOT1</i>	23.05.2023	4h	Piper PA-31	Ouverte	40	17 (+4)	Annexe 6
<i>SWOT2</i>	24.05.2023	3h30	Piper PA-31	Ouverte	40	17 (+4)	Annexe 7
<i>SWOT3</i>	16.06.2023	1h30	Merlin	Vitre	40	6 (+4)	Annexe 8
<i>SWOT4</i>	17.06.2023	1h30	Merlin	Vitre	50	6 (+4)	Annexe 9

Tableau 2 : Résumé des vols LiDAR effectués durant ce travail pour l'étalonnage de SWOT

II.2 Géoréférencement

Le positionnement et sa précision associée sont essentiels pour le géoréférencement de n'importe quelle acquisition. L'étude des océans concerne en effet une couverture mondiale et il est fondamental de définir une référence capable d'harmoniser les coordonnées à n'importe quel endroit de la planète. La méthode par GNSS possède ce rôle-là et délivre la position, dite absolue, d'un point. Elle se base sur une ou plusieurs

⁵ Voir annexe 4

⁶ Voir annexe 5

constellations de satellites (GPS, GLONASS, Galileo...) qui couvrent pour la plupart l'entièreté de la Terre à tout moment.

II.2.1 Calcul de la trajectoire par technique iPPP

II.2.1.1 Positionnement relatif contre positionnement absolu

Le positionnement par GNSS peut s'opérer de deux manières, soit en absolu ou en relatif. Le DGPS est un mode de positionnement relatif impliquant deux récepteurs et s'appuyant sur la méthode de doubles différences. Cette dernière est le fruit de la combinaison de deux différences et permet d'atténuer ou d'éliminer certains types d'erreur. Une des deux antennes, appelée base, doit être positionnée sur un point connu et la précision attendue dépend de la distance qui la sépare avec le mobile. Cela s'explique par l'existence d'une corrélation spatiale entre les erreurs de propagation (voir figure 10). Celles-ci s'estompent lorsque les récepteurs GNSS sont suffisamment proches, soit à moins de 40 km.

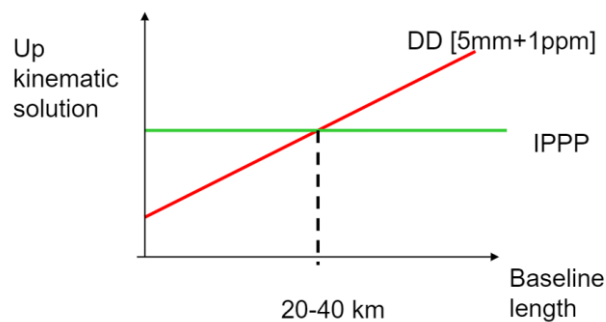


Figure 10 : Comparaison entre la précision en positionnement relatif (DD) et absolu (iPPP) en fonction de la longueur de la ligne de base (Perosanz, 2014)

La plupart des corrections, qu'il n'était pas nécessaire d'appliquer en positionnement relatif en raison de la double différence, sont aujourd'hui très précisément estimées. Des erreurs sont en effet principalement causées par la traversée de l'atmosphère ou par des décalages d'horloges (Duquenne, 2005). Le positionnement absolu, soit au moyen d'une seule station, devient par conséquent envisageable. Il est même possible, en PPP notamment, d'atteindre une bonne précision à condition que le temps d'observation soit suffisamment long. Cette précision dépend principalement de celle des orbites et horloges données par l'International GNSS Service (IGS) qui sont utilisées comme référence dans le calcul. Celui-ci diffuse les orbites précises à 2.5 cm dans un délai compris entre 12 et 18 jours (IGS, 2023). En PPP, l'ambiguïté entière n'est pas fixée et possède une valeur réelle à cause des délais de phase inconnus et propres à chaque satellite (Perosanz, 2018). Cette méthode n'est donc pas adaptée à un positionnement cinématique nécessitant une résolution rapide des ambiguïtés.

Depuis, des modes PPP avec ambiguïté fixée sont apparus ; c'est le cas notamment de la technique iPPP développée par le CNES.

II.2.1.2 L'integer Precise Point Positioning

D'après Shi (2012), plusieurs techniques de résolution permettent d'améliorer considérablement la précision de la position ainsi que le temps de convergence de la méthode PPP. Celle qui nous intéresse repose sur l'emploi d'un modèle. Ce dernier renseigne les biais électroniques des satellites et donc les horloges satellites « cohérentes avec la nature entière des ambiguïtés » (Morel, 2014). C'est notamment par ce moyen que, depuis 2012, le CNES a mis au point la méthode de positionnement iPPP. Une nette amélioration de la précision cinématique est constatée passant de 10 à 50 cm pour le PPP classique à moins de 5 cm en iPPP. Le travail réalisé par Laetitia Roguet (2022) a notamment permis de démontrer cette précision. Cette étude consistait à comparer deux trajectoires : l'une calculée par iPPP et l'autre connue à moins d'1 cm grâce à la méthode DGPS. En plus de cela, la précision de la position déterminée par iPPP n'est pas dégradée en raison d'un éloignement avec une base ou un réseau de stations et convient donc parfaitement à un positionnement en pleine mer (voir figure 10).

II.2.2 Le géoréférencement d'un vol LiDAR

II.2.2.1 Paramétrage du calcul

Le CNES a développé la méthode iPPP sur le programme GINS, créé dans les années 70 dans le cadre du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS). Il a, depuis toujours, servi de moyen de diffusion de produits tels que ceux de l'IGS ou bien de modèles. C'est également un outil de calcul performant et capable de s'adapter à diverses configurations de traitement. Il fonctionne par ailleurs sous l'environnement Linux.

Le logiciel GINS-PC facilite l'utilisation de l'outil GINS par le biais d'une interface⁷. Un autre outil nommé PREPARS rassemble et vérifie la bonne recevabilité des données indispensables au traitement. Parmi ces données, doivent figurer les observations GNSS ainsi qu'un fichier *directeur*. Le fichier d'observation est nécessairement sous le format RINEX. J'ai ainsi converti les données brutes GNSS de l'antenne avec une fréquence d'observation qui convient au logiciel, soit nécessairement inférieure ou égale à 1 Hz. Ce

⁷ Voir annexe 10

paramètre fréquentiel ainsi que tous ceux utiles au traitement sont contenus dans le fichier *directeur*. J'ai donc configuré celui-ci de manière à convenir aux exigences de précision prévues.

Le *directeur*⁸ indique en tout premier lieu l'étendue temporelle des observations permettant ainsi de rechercher les fichiers d'orbites correspondants. Les modèles de correction et les paramètres de calcul sont ensuite choisis et utilisés lors de l'exécution du traitement (voir tableau 3). Pour notre étude, le mode de positionnement choisi est *cinem* (cinématique) car il fournit les positions du récepteur mobile avec un échantillonnage donné (ici 1 Hz). Ces positions sont calculées entre autres grâce aux produits GRG qui permettent l'emploi de la technique iPPP. En réalité, je me suis aperçu que les horloges satellites ne sont connues qu'à seulement 30 secondes d'intervalle. J'ai de ce fait ajouté un paramètre d'interpolation pour estimer la position de l'avion chaque seconde.

<i>Principaux modèles et produits utilisés</i>	
Orbites précises	GRG
Horloges satellites	GRG
Ionosphère	IGS
Troposphère	IGS
Centre de phase de l'antenne	ANTEX
Surcharge océanique	FES2014
Marée solide	IERS2010
<i>Paramètres du calcul</i>	
Mode de calcul	Cinématique
Échantillonnage de l'interpolation	1 s
Constellation(s)	GPS
Filtre	Kalman
Nombre itérations max	20
Critère de convergence	0.1 m

Tableau 3 : Modèles et paramètres du traitement iPPP utilisés pour le vol OUESSANT et contenus dans le fichier *directeur*

A l'issue du traitement, trois types de fichiers sont créés : un fichier *solution*, un fichier *listing* et un fichier *statistiques*. Le premier comporte le résultat du calcul d'un ou plusieurs jeux de coordonnées du récepteur selon qu'il soit mobile ou non. Le fichier *listing* recense toutes les opérations réalisées par les programmes PREPARS et GINS. Les résidus sur les satellites observés, tout comme d'autres indicateurs du traitement, sont résumés dans le fichier *statistiques*.

II.2.2.2 Résultats et appréciation de la technique

J'ai appliqué la technique de positionnement iPPP à trois vols différents afin de correctement la qualifier. Ils sont nommés de la manière suivante : OUESSANT, SWOT1 et SWOT3 (voir tableau 2). Ces trois traitements disposent du paramétrage décrit dans la partie précédente (voir partie II.2.2.1).

⁸ Voir annexe 11

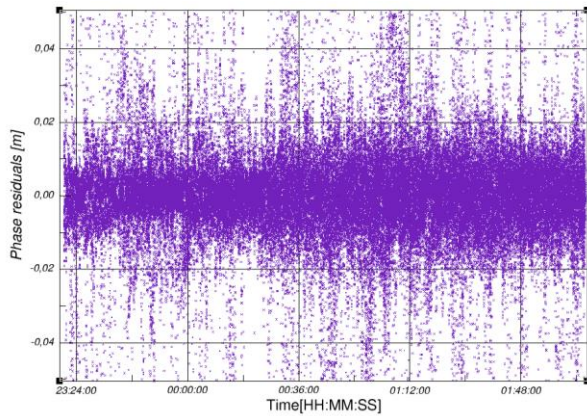


Figure 11 : Les résidus sur les mesures de phase pour le vol OUESSANT

Le logiciel GINS emploie la méthode des moindres carrés. Par conséquent, à la suite du calcul, des informations comme les résidus sur les observations apparaissent. Ceux obtenus pour le vol OUESSANT sont présentés sous la forme d'un graphique à la figure 11. Pour la grande majorité, ils sont compris entre -2 cm et 2 cm. Le RMS (Root Mean Square ou écart quadratique à la moyenne),

précisé dans le fichier *listing*, est de 0.9 cm. Les valeurs sont ainsi relativement peu dispersées et en dessous du seuil du centimètre, ce qui traduit une bonne cohérence de la trajectoire avec les orbites des satellites.

La composante de hauteur ellipsoïdale h , qui nous intéresse plus particulièrement ici car elle définit la mesure SSH permettant de valider les produits de SWOT, peut également être évaluée par le biais de la matrice de covariance. Cette dernière est en effet fournie pour chaque nouvelle position calculée et accompagne les coordonnées du point (système ITRF2014) dans le fichier *solution*⁹. Les moyennes des écart-types sur h pour les trois vols traités sont proches des RMS sur les observations de phase (1 +/- 0.5 cm), confirmant ainsi la bonne précision verticale de chaque position toutes les secondes (voir tableau 4).

	Positionnement de l'antenne GNSS de l'avion		Géoréférencement des mesures LiDAR
Nom du vol	RMS sur les observations de phase (cm)	Moyenne des écarts-types sur h issus de la matrice de covariance (cm)	Écart-type sur les valeurs de dz avec des points au sol (cm)
OUESSANT	0.9	0.8 +/- 0.5	/
SWOT1	1.0	0.9 +/- 0.4	5.7
SWOT3	1.1	1.2 +/- 0.4	6.9

Tableau 4 : Les résultats pour les vols traités en mode iPPP cinématique

À la suite du calcul iPPP de la trajectoire, désormais connue à moins de 2 cm, les nuages de points LiDAR sont géoréférencés. Pour cela, ils sont recalculés à partir de la trajectoire de l'antenne GNSS corrigée entre autres de l'effet de *boresight*¹⁰. En effet, cette

⁹ Voir annexe 12

¹⁰ Voir annexe 13

trajectoire finale résulte du couplage entre les positions de l'antenne calculées par iPPP et les données de l'IMU tout en appliquant le bras de levier entre l'antenne et le capteur. D'autres compensations avec des points au sol affinent la calibration et permettent d'estimer la précision des mesures LiDAR. La position des points de calibration est déterminée par méthode DGPS et connue avec une précision de moins d'1 cm (Serthelon, 2020 ; Roguet, 2022). L'ensemble de ces points forme alors une surface 3D interpolée ensuite comparée à la surface 3D déduite des mesures LiDAR obtenues après calibration. C'est pourquoi il est primordial de fixer la zone de calibration sur un terrain relativement plat pour éviter d'importantes erreurs causées par l'interpolation.

La dernière colonne du tableau 4 présente les écarts entre ces deux surfaces pour les vols SWOT1 et SWOT3. D'une part, ceux-ci sont conformes à la précision annoncée par le constructeur pour des vols à ces altitudes, soit entre 5 et 8 cm (voir figure 7). D'autre part, ces résultats confirment les précisions obtenues par Romain Serthelon (2020) lors de travaux accomplis préalablement au lancement de SWOT. Ses recherches avaient permis de constater un écart-type de 3.6 cm sur la composante verticale des points d'un nuage géoréférencé à partir d'une trajectoire calculée par technique iPPP. Les écarts sont légèrement plus importants concernant ceux présentés dans cette étude. Cela peut provenir de multiples facteurs comme l'état de la mer au moment de l'acquisition ou encore l'altitude du vol. Avec cet intervalle de précision, la technique reste tout de même parfaitement envisageable pour l'étalonnage du satellite.

Grâce au géoréférencement des mesures LiDAR, des mesures de SSH *in-situ* peuvent être extraites. C'est à partir de ces valeurs que le produit principal de SWOT, à savoir la hauteur ellipsoïdale de la surface de l'eau pour une zone donnée, est calibré puis validé. Nous tenterons ainsi de réaliser cette validation avec les premières mesures de l'altimètre KaRIn de SWOT (voir partie II.4.2). Laetitia Roguet a notamment mis en œuvre une méthode de buffers permettant de faire correspondre les produits du satellite Sentinel-3A avec des mesures LiDAR de hauteur ellipsoïdale moyennée et applicable à ceux de SWOT. Cette stratégie a fait ressortir l'existence d'un biais entre les mesures LiDAR et les mesures altimétriques supérieur à 5 cm (Roguet, 2022 ; Zlinszky, 2017). Il a cependant été prouvé que celui-ci diminue à moins d'1 cm lorsque les acquisitions sont parfaitement synchronisées et éloignées des terres (Roguet, 2022). En outre, l'état de la mer pourrait également être une des causes de ce biais. C'est pourquoi l'outil que j'ai développé dans la partie suivante fait partie des solutions envisagées pour améliorer l'étalonnage de SWOT.

II.3 Création d'un outil d'analyse : le spectre directionnel de vagues

Les vagues jouent un rôle important dans la calibration d'un altimètre et SWOT est capable de les décrire jusqu'à une certaine longueur d'onde. Des produits dérivés comme la mesure de la Sea Wave Height (SWH) ou le calcul précis du Sea Surface Bias (SSB) doivent être validés (NASA, 2018). Et le meilleur outil pour obtenir une mesure de SWH et de ses paramètres associés est le spectre directionnel de vagues. Les spectres directionnels obtenus par LiDAR offriront ainsi la possibilité d'améliorer la mesure de vagues de faibles longueurs d'onde. La conception d'un spectre de vagues au laboratoire M2C a été initiée par Paul Ternon (2019) et se poursuit au cours de ce travail.

II.3.1 Les données LiDAR exploitées

Pour parvenir à l'obtention d'un spectre 2D à partir d'un nuage de points 3D, j'ai dans un premier temps décidé de procéder à une rasterisation sur le logiciel CloudCompare (voir figure 12). De cette opération résulte une image 2.5D composée de pixels carrés auxquels est attribuée une valeur d'altitude moyennée entre les points à l'intérieur d'un même pixel ou à une altitude interpolée si aucun point n'est présent dans l'emprise du pixel. Le format d'image que j'ai choisi est le GeoTIFF car il conserve les coordonnées des pixels. Un spectre qui naît de cette image est donc directement géoréférencé et bénéficie d'une orientation parfaitement connue.

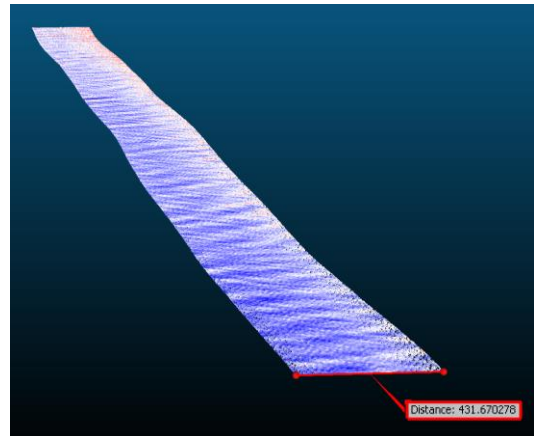


Figure 12 : Exemple d'une bande LiDAR du vol OUESSANT en échelle d'élévation

	<i>Nombre de points</i>	<i>Aire de la bande (m²)</i>	<i>Densité de points (pts/m²)</i>
<i>Avec les bords</i>	5 274 890	4 275 000	1.23
<i>Sans les bords</i>	3 542 308	1 824 000	1.94

Tableau 5 : Informations du calcul de densité d'une même bande avec ou sans les bords

La densité de points fixe la plus petite longueur d'onde visible sur le spectre et définit par la même occasion le pas de rasterisation du nuage conservant le maximum d'informations. D'après le tableau 5, pour une bande entière (avec les bords), une surface de 1 m² détient en moyenne au moins 1 point. J'ai donc fixé le pas de rasterisation à 2 m, le facteur 2 limitant ainsi le risque d'obtenir un trop grand nombre de pixels vides sur les extrémités de la bande. La longueur d'onde minimale découle du critère de Shannon,

énonçant qu'un signal doit avoir sa fréquence maximale échantillonnée sur au moins 2 pixels, et est donc égale à 4 m. Dans la suite du travail, la totalité de la bande est considérée car elle dispose de plus amples informations sur l'état de mer.

II.3.2 Description du spectre

À un instant donné, la surface des océans peut être assimilée à un signal aléatoire multidirectionnel où la variable indépendante est la longueur. C'est pourquoi il existe deux représentations principales favorisant son analyse : soit au moyen de la longueur ou bien à partir du nombre d'onde (Simon, 2007). La transformée de Fourier permet le passage d'une représentation à une autre. Elle décompose le signal en une somme de sinus et de cosinus dans le cas où le signal est périodique sinon la somme est remplacée par une intégrale. Cela revient à appliquer la formule suivante pour un signal 2D ou une image :

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-iux} e^{-ivy} dx dy \quad [2]$$

avec F transformée de Fourier ; f signal spatial ; (u, v) coordonnées fréquentielles ;

(x, y) coordonnées spatiales

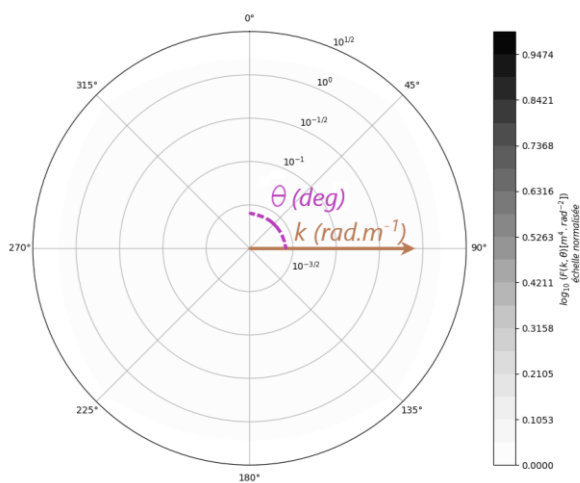


Figure 13 : Les composantes du spectre directionnel

Je suis finalement parvenu à obtenir le spectre en calculant le carré du module de la transformée de Fourier F du signal, ce qui revient ainsi à déterminer sa densité fréquentielle d'énergie. Et pour qu'il soit qualifié de directionnel, je l'ai converti en coordonnées polaires. De forme circulaire, il définit les fréquences du signal 2D au moyen d'un vecteur d'onde désigné par une direction θ (en deg) et un nombre d'onde k (en $rad.m^{-1}$) (voir figure 13) ; k

étant égal à la norme du vecteur d'onde. La densité spectrale est alors exprimée en $m^4.rad^{-2}$.

Au cours de l'élaboration du spectre directionnel de vagues, basé sur des données LiDAR, plusieurs difficultés sont apparues. Nous les détaillerons et aborderons la façon dont elles ont été atténuées voire remédiées dans la partie suivante.

II.3.3 Problèmes rencontrés et solutions apportées

II.3.3.1 L'impact de l'effet Doppler

II.3.3.1.1 Sa correction et son ordre de grandeur

Pour chaque bande LiDAR, l'effet Doppler joue un rôle important et doit ainsi être atténué du mieux possible. L'avion ainsi que les vagues sont en mouvement lors de l'acquisition d'une bande et se déplacent dans des directions différentes. Cela provoque alors des effets directionnels de compression ou de dilatation des fréquences en fonction du différentiel de vitesse des deux systèmes : avion et champ de vagues. La vitesse de l'avion pour le vol OUESSANT est de 60 m.s^{-1} tandis que celle des vagues est de l'ordre de 10 m.s^{-1} dans cette zone. Par conséquent, la formule de correction (équation 3) donnée par Walsh (1985), et reprise par Lenain (2017), est celle que j'applique lors du calcul du spectre. Elle fournit l'écart en nombre d'onde devant être corrigé en fonction de la vitesse de l'avion V et de la relation de dispersion ω :

$$\delta k = \frac{\omega}{V} \quad [3]$$

avec $\omega = \sqrt{gk \tanh(hk)} \approx \sqrt{gk}$; g accélération de la gravité ; k nombre d'onde (variable) ; h profondeur du fond marin

Cette correction est plus ou moins importante selon la longueur d'onde de la vague ainsi que selon sa direction et son sens puisque k est exprimé en rad.m^{-1} sur le spectre. Dans le cas où la direction de la vague est exactement à la perpendiculaire de l'axe de vol, l'effet Doppler devient quasi nul. Au contraire lorsque la direction du capteur LiDAR coïncide avec celle de la vague, l'effet est alors maximal. Le sens de la vague influe ensuite sur l'effet de compression ou de dilation de la fréquence. J'ai notamment pu observer, à travers les différents cas d'étude que nous aborderons par la suite, que cette correction maximale représente environ 20% du nombre d'onde pour les grandes longueurs et moins de 10% pour les plus faibles. C'est notamment ce décalage qui peut permettre de résoudre l'ambiguïté à 180° et donc de rendre le spectre asymétrique (Hwang, 1999). En raison des limites en termes de temps imposées par la durée de ma mission, cette possibilité n'a pas été exploré.

II.3.3.1.2 La problématique du drone LiDAR

Comme nous l'avons vu précédemment, le capteur LiDAR peut se déployer sur différents supports et le drone en fait partie. Quelques acquisitions ont été réalisées, durant

ce travail, au-dessus de la mer afin de connaître sa possible contribution dans la campagne d'étalonnage de SWOT. Cependant, j'ai rapidement constaté que des complications apparaissaient lors du traitement. En effet, plus la vitesse au sol du capteur est faible, plus l'erreur liée à l'effet Doppler est importante¹¹. Il se révèle ainsi complexe de produire un spectre par drone LiDAR compte tenu de sa faible altitude et par conséquent de sa faible vitesse au sol quasi équivalente à celle des vagues. Dans l'optique d'une acquisition par drone, il conviendrait de prendre en compte une erreur angulaire causée par le décalage de l'état de mer entre balayages successifs (voir figure 14).

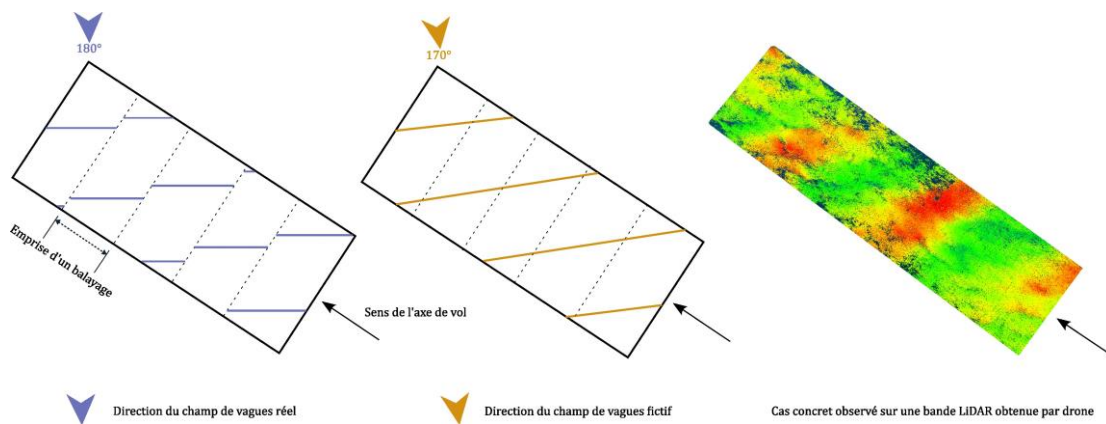


Figure 14 : Erreur angulaire de la direction du champ de vagues pour un vol drone à faible altitude et faible vitesse (schéma simplifié)

II.3.3.2 La construction d'une méthode d'exploitation d'images

II.3.3.2.1 Par découpage en images carrées : une méthode limitée

Pour la transformation d'une image en un spectre, plusieurs possibilités existent. Une première méthode, exploitée par Sutherland (2018) mais également initiée par Ternon (2019) dans son travail, consiste à découper l'image géoréférencée de la bande, de plusieurs kilomètres de long, en images carrées et présentant une éventuelle zone de recouvrement. Dans un premier temps, j'ai donc réemployé cette méthode avec les données du vol OUESSANT. Nous verrons qu'elle connaît en revanche une certaine limite non appropriée en vue de l'étalonnage de SWOT mais qu'elle peut servir à évaluer la cohérence interne de la bande.

Dans un premier temps, la bande, désormais sous la forme d'une image, subit une rotation afin d'aligner l'axe de vol avec l'axe des x et ainsi conserver le maximum d'informations lors du découpage. Le spectre en fréquence de chaque image de la bande est

¹¹ Voir annexe 14

ainsi calculé séparément en utilisant la transformée de Fourier 2D. J'ai par ailleurs appliqué un fenêtrage de Hanning pour atténuer l'effet de discontinuité de chaque spectre (Lenain, 2017; Sutherland, 2018).

Pour le cas OUESSANT, cette stratégie limite les longueurs d'onde observables à moins de 200 m car les images issues de la division possèdent des côtés équivalents à la largeur de la bande. Elle n'est donc pas adaptée à la caractérisation de longueurs d'onde au centre du spectre, soit les grandes longueurs d'onde, mais se révèle intéressante pour la détection des plus faibles longueurs d'onde plus éloignées du centre du spectre (voir figure 15).

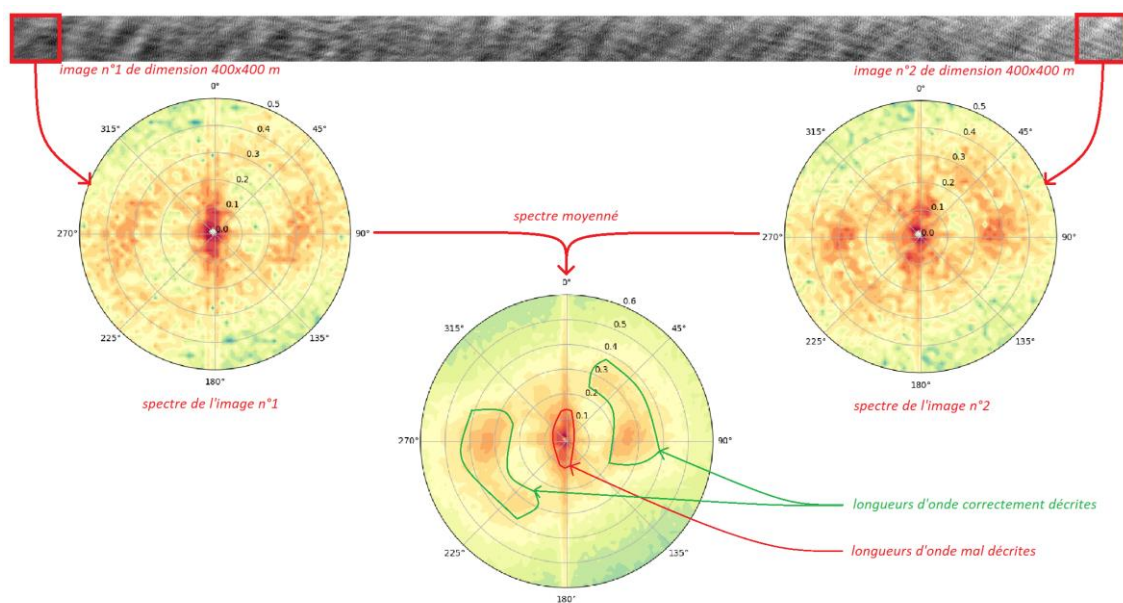


Figure 15 : Schéma de la méthode de découpage en images carrées appliquée au vol OUESSANT

Ce découpage permet en revanche d'analyser l'impact de la distance entre deux spectres décrivant un état de mer au même moment, plus précisément à quelques secondes d'intervalle. Sur la figure 15, les spectres des deux extrémités de la bande sont séparés de 9 km environ. Cela correspond à une distance suffisante pour observer de faibles variations de champ de vagues. Un des intérêts de cette méthode fut donc de vérifier la validité d'un spectre moyenné sur toute la longueur de la bande. Et en comparant ces deux spectres avec leur spectre moyenné, cela demeure approprié de considérer la bande dans sa totalité pour l'obtention d'un spectre global, ce qui sera mis en place dans la méthode qui suit.

II.3.3.2.2 Par zéro-padding : une méthode globale

Afin de pallier ce problème d'exploitation des bandes rasterisées, j'ai élaboré une autre méthode qui est expliquée en détail dans cette partie. Elle favorise la considération de

la bande dans son ensemble et ainsi l'évaluation de la cohérence entre bandes successives. À nouveau, le cas OUESSANT jouera le rôle de cas d'étude. Les bandes de cette acquisition, formant une étoile, ont en effet été obtenues à des instants différents, avec un écart de temps entre la première et la dernière bande de plus d'1h. La mer est un système très instable et peut ainsi, sur certains secteurs, varier considérablement en l'espace de quelques heures seulement. Ainsi, d'importantes différences liées à l'évolution de la mer risquent d'être observées entre deux spectres décrivant la même zone géographique. La méthode dite de *zéro-padding* permet de calculer un seul spectre global d'une bande sans avoir à la découper.

Le principe du *zéro-padding*, ou remplissage en français, se résume au simple ajout de zéros à un signal dans le but d'augmenter sa longueur. Cette technique est principalement utilisée pour élargir la taille d'un signal jusqu'à ce que sa longueur soit égale à une puissance de 2. Par exemple pour 26 échantillons, 6 zéros sont ajoutés pour atteindre le nombre de 32 échantillons ; ce qui correspond à 2^5 . Elle permet de raccourcir le temps de traitement et principalement d'augmenter la résolution du spectre. Cette stratégie semble très avantageuse puisque le traitement de la bande n'est pas contraint par diverses transformations comme la rotation ou le découpage. Il reste cependant à prouver l'emploi de cette méthode pour la réalisation d'un spectre directionnel de vagues.

Nous considérerons dans un premier temps un cas relativement simple conçu dans le but de se rapprocher des conditions de traitement d'une bande caractérisant la surface de la mer. Dans cet exemple que j'ai inventé pour cette étude, la mer est définie par deux signaux sinusoïdaux à un instant donné et pour une certaine surface de forme rectangulaire (voir figure 16a). Des constantes sont appliquées à ces signaux pour se rapprocher au mieux de ceux détectés pour le cas d'étude. En effet, comme nous le verrons par la suite, la méthode *zéro-padding* n'est exploitable que si ces constantes sont éliminées ; il est donc nécessaire qu'elles soient parfaitement connues. L'image rectangulaire est ensuite complétée par des zéros ; ce qui crée une nouvelle image agrandie et disposant de dimensions carrées (voir figure 16b). L'image apparaît plus claire en raison des constantes qui sont attribuées aux deux signaux. Et du fait que ces derniers soient additionnés, les constantes le sont également (voir figure 16c). Le spectre en fréquence calculé à partir de cette image permet de constater l'effet de masque provoqué par la constante (voir figure 16d et 16e). Un des moyens que j'ai trouvé pour l'ôter est de construire une fonction porte de la même taille que l'image agrandie. Une fonction porte équivaut à un filtre composé de 0 et de 1. L'ensemble des 1 est regroupé sur la totalité de l'emprise de l'image rectangulaire initiale de manière à ne considérer que

la partie où est présente la constante (voir figure 16f). L'élimination s'opère finalement par la soustraction de la transformée de Fourier de la fonction porte F_p , elle-même multipliée par la moyenne m des valeurs auxquelles doit être enlevée la constante, à celle de l'image carrée non corrigée F_{ncorr} :

$$F_{corr} = F_{ncorr} - mF_p \quad [4]$$

avec $F_p = t_0 \text{sinc}(\pi f t_0)$; t_0 dimension de la fonction porte ; f fréquence (variable)

Le pic central est désormais nul et les pics en fréquence des deux signaux apparaissent clairement (voir figure 16g). Les deux pics parfaitement symétriques sont donc séparés d'une distance égale à deux fois la période du signal associé. Leurs intensités sont également conservées. Par conséquent, le signal 1D ne présente plus de discontinuités (voir figure 16h).

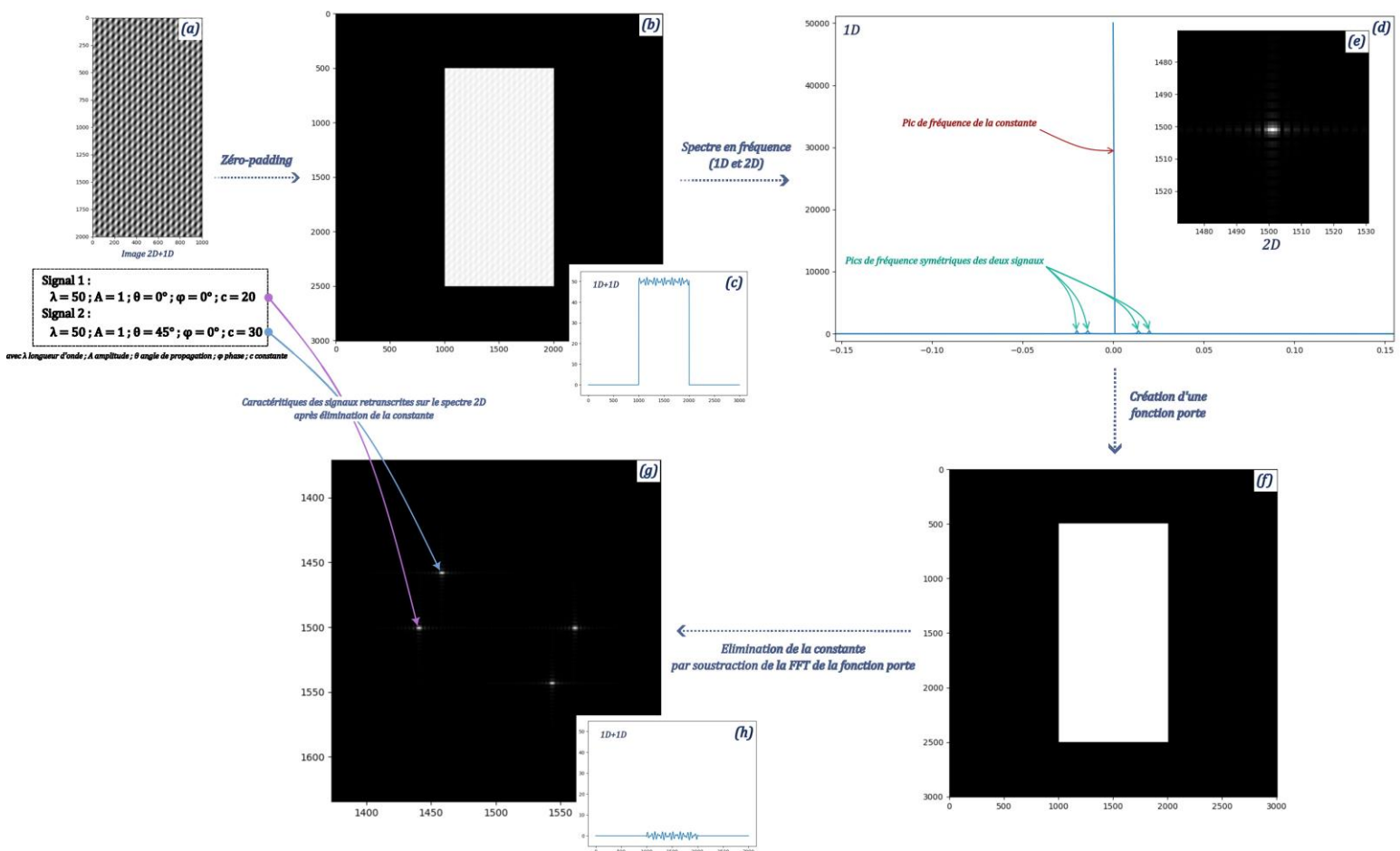


Figure 16 : Schéma de la méthode zéro-padding appliquée à un cas simplifié

L'efficacité de cette technique s'avère prouvée dans un cas théorique. Cette stratégie permet ainsi de mieux estimer les grandes longueurs d'onde situées au centre du spectre ; ce qui n'était pas le cas pour la méthode de division de la bande en images carrées (voir partie II.3.3.2.1). Une prochaine et future étape consistera tout de même à déduire une mesure de hauteur de vagues à partir des données de densité spectrale en s'inspirant par exemple de la méthode adoptée par Roshandel (2021).

Il est désormais intéressant de mettre en œuvre cette technique d'exploitation d'images pour les bandes LiDAR obtenues lors des acquisitions au-dessus de la mer d'Iroise (vol OUESSANT) et de la Manche (vols SWOT). Pour ces différents vols, les mêmes étapes mises en place pour le cas théorique sont suivies. Cette méthode rencontre néanmoins une problématique liée cette fois à la direction du champ de vagues.

II.3.3.3 Orientation des vagues et état de mer

II.3.3.3.1 L'incidence sur le domaine de définition du spectre

D'un nombre d'onde est déduite une longueur d'onde de vague. Le spectre possède ainsi un domaine de définition bien précis. Il est nécessaire de le connaître pour délimiter le champ de comparaison avec SWOT. Le domaine de définition dépend à la fois de la longueur du signal mais aussi de son échantillonnage. Par analogie, cela correspond pour une image à son emprise et à la taille de ses pixels.

La longueur d'onde maximale dépend de l'emprise de la bande ainsi que de l'angle du champ de vague par rapport à l'axe de vol. La longueur de la bande étant largement supérieure à sa largeur, il est évident que sa direction joue un rôle très important dans le domaine de définition du spectre. En appliquant le critère de Shannon, la longueur d'onde maximale d'une bande de l'acquisition du vol OUESSANT se situe autour de 4800 m dans le cas précis où la direction de cette bande correspond exactement à celle de la vague (voir figure 17). En conséquence, les grandes longueurs d'onde sont très rarement percevables sur le spectre d'une seule bande peu large.

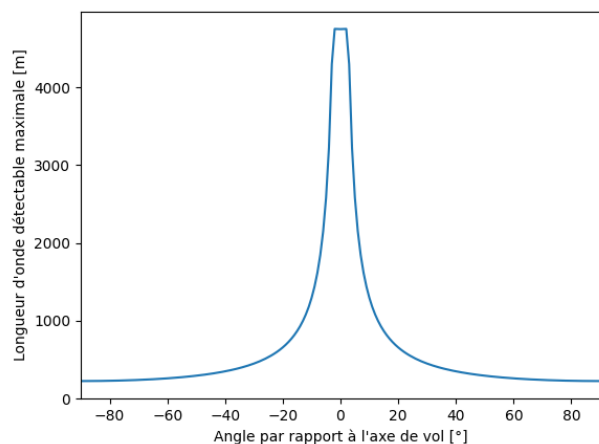


Figure 17 : Longueur d'onde maximale en fonction de l'angle séparant la direction de la vague de celle de la bande

II.3.3.3.2 L'intérêt de la forme de l'acquisition

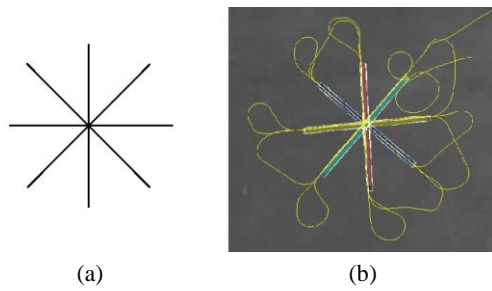


Figure 18 : Forme théorique de l'acquisition (a) et son application concrète sur le vol OUESSANT (b)

Pour tenter de comprendre et de remédier aux problématiques liées à la direction du champ de vague, une stratégie d'acquisition lors du vol OUESSANT a été mise en place. En effet, l'idée est de réaliser un vol en forme d'étoile et ainsi de limiter l'impact lié à la direction d'une bande sur le spectre (voir figure 18). Ce plan de vol a également été envisagé par

Ken Melville et Luc Lenain, de l'Institut océanographique SCRIPPS, en utilisant le système MASS LiDAR et qui sert de principal outil de validation pour l'étalonnage de SWOT (Melville, 2018). Trois passages sont effectués pour chacune des directions dans les deux sens, soit un aller-retour et un passage supplémentaire pour un total de 12 bandes. Ces aller-retours permettent en principe de lever l'ambiguïté à 180° concernant le sens de propagation des vagues par analyse de l'effet Doppler (voir partie II.3.3.1.1).

<i>Bande</i>	<i>Heure (UTC)</i>	<i>Direction axe de vol (deg)</i>	<i>Direction principale du champ de vagues estimée (deg)</i>	<i>Angle entre axe de vol et direction de vague (deg)</i>	<i>Écart à la moyenne de la direction de vague (deg)</i>
<i>B1</i>	12:59:40	45	283	122	17
<i>B2</i>	13:05:02	270	305	35	5
<i>B3</i>	13:10:43	135	311	176	11
<i>B4</i>	13:16:26	0	287	73	13
<i>B5</i>	13:21:37	180	309	129	9
<i>B6</i>	13:37:45	315	305	10	5
<i>B7</i>	13:43:38	90	292	158	8
<i>B8</i>	14:00:24	225	307	82	7
<i>Moyenne</i>			299,9		9,4

Tableau 6 : Directions principales des champs de vagues pour huit bandes du vol OUESSANT

J'ai donc réalisé une étude pour les 8 bandes représentant chacune des directions de l'étoile, soit de 0° à 360° avec un intervalle de 45°. À partir des spectres directionnels, calculés à l'aide de la méthode *zéro-padding* (voir partie II.3.3.2.2), une direction principale du champ de vagues est estimée puis comparée entre les différentes bandes (voir tableau 6).

En raison de la symétrie du spectre, une direction principale est déterminée avec une ambiguïté de 180° (voir figure 19). Elle représente la direction du maximum de densité spectrale. Le tableau 6 permet de corrélérer son angle avec l'axe de vol et son écart avec la direction moyenne. En effet, lorsque l'axe de vol possède une direction et un sens proche de ceux du champ de vagues, l'écart à la moyenne est plus faible (en vert sur le tableau 6). Au

contraire, lorsque la direction des vagues est perpendiculaire ou proche de 180°, l'écart augmente. Cela confirme donc l'incidence de l'orientation des vagues sur le domaine de définition du spectre et donc sur la description des grandes longueurs d'onde présentes au centre du spectre. Afin d'amortir ce problème, la solution que j'ai envisagée est d'effectuer une moyenne entre les spectres des 8 bandes (voir figure 19). On retrouve finalement une direction principale moyenne relativement proche de celle du tableau 6 (écart de 5°).

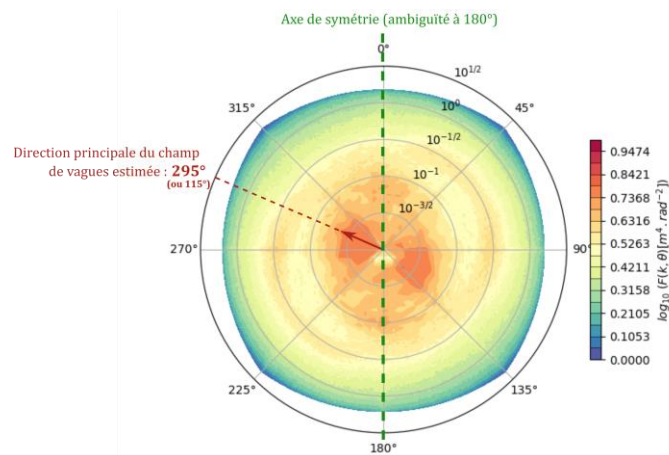


Figure 19 : Spectre moyenné entre les 8 bandes de l'acquisition en étoile du vol OUESSANT

II.4 Validation et mise en place des méthodes de comparaison

II.4.1 Le spectre de vague : validation avec les bouées houlographes

Afin d'assurer la validité d'un spectre calculé à partir de mesures LiDAR, la comparaison avec une bouée houlographe sert de bon indicateur de conformité. Un grand nombre de bouées observe en effet les états de mer et fournit les renseignements permettant de concevoir un spectre de vague à une position bien précise toutes les 3 heures. Les bouées Pierres Noires et D-Day¹², situées non loin des deux zones d'acquisition (vol OUESSANT et vol SWOT1), sont celles recommandées par Martial Boutet, chercheur océanographe au laboratoire M2C, pour la comparaison. Leurs données spectrales sont produites par le Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), relié entre autres à l'Ifremer, et diffusées sur l'outil de visualisation MARC. Les spectres sont fournis toutes les 3h et renseignent la direction principale moyennée sur cet intervalle de temps. La figure 20 met ainsi en parallèle les demi-spectres produits par les deux bouées et ceux déterminés sur la même zone à partir de données LiDAR en employant la méthode *zéro-padding*.

¹² Voir annexes 15 et 16

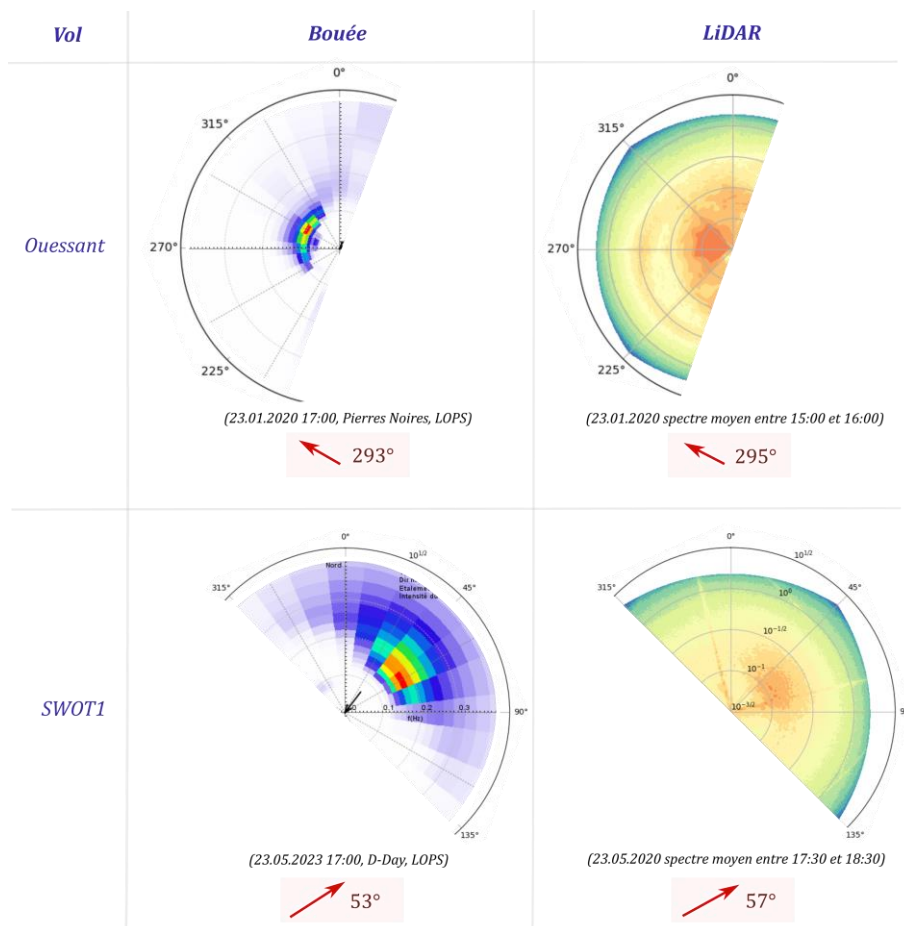


Figure 20 : Comparaison entre spectre provenant d'un houlographe et spectre obtenu par LiDAR

Malgré des décalages à la fois temporels et spatiaux, les spectres présentent globalement les mêmes caractéristiques dans les deux cas. Les directions principales sont similaires à $\pm 5^\circ$ même en présence d'un déphasage pouvant dépasser une heure. Il faut tout de même nuancer ce propos car cet écart dépend en majeure partie du changement de l'état de la mer entre deux instants différents. Comme exprimé précédemment, il arrive parfois que la direction du champ de vagues varie considérablement en l'espace de quelques minutes. De la même façon, le choix approprié de la bouée servant de comparaison est capital car certains secteurs relativement proches peuvent être de nature très différente. Dans les deux cas étudiés, ces variations ne sont que très faiblement observées ; ce qui facilite ainsi la validation des spectres LiDAR. La comparaison entre ces deux instruments de mesure *in situ* tend alors à valider cet outil qui sera par la suite mis en place pour la calibration de SWOT et ce, malgré un défaut de synchronicité de plusieurs minutes.

II.4.2 Le calcul de SSH : mise en place de la méthode avec les produits de SWOT

Un accès aux premiers produits de SWOT a pu être obtenu au cours du mois de juillet 2023. Celui-ci intervient avant même la diffusion de la version bêta prévue pour le 23 août.

De ce fait, l'étude que j'ai réalisée n'est qu'exploratoire et les résultats diffèrent très probablement de ceux qui apparaîtront dans les prochains mois.

Les données analysées correspondent aux valeurs de SSH collectées par l'altimètre KaRIn et dotées d'une résolution de 2 km destinées aux océans (voir figure 21). Comparées aux données LiDAR acquises au même moment et sur la même zone, elles constituent le moyen d'évaluation principal de la précision des données altimétriques. En raison du court délai dont j'ai disposé, je n'ai pas pu confronter les produits spectraux du satellite aux spectres de vagues LiDAR. Afin de comparer les valeurs de SSH, j'ai repris la méthode mise en place par Laetitia Roguet (2022) mais cette fois avec les mesures de SWOT.

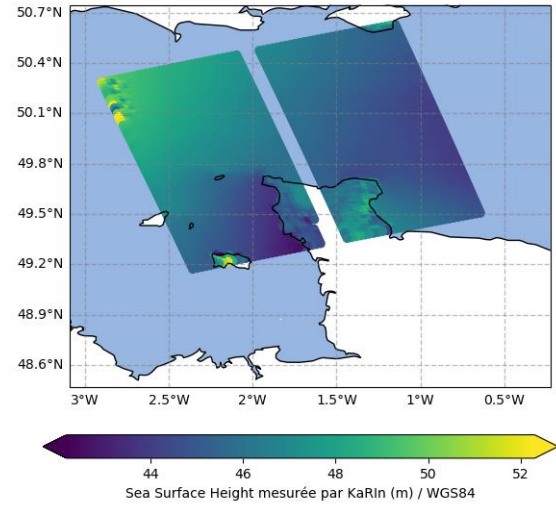


Figure 21 : Données préliminaires SSH Low Resolution (2x2 km) de l'altimètre KaRIn de SWOT lors du vol LiDAR SWOT3

Afin de correctement comparer ces deux sources de données, il est tout d'abord essentiel de connaître les informations qu'elles renseignent. Les mesures verticales du capteur LiDAR ne subissent aucune correction liée à l'état de la mer et correspondent finalement à des valeurs instantanées de SSH dotées d'une précision inférieure à 8 cm (voir partie II.2.2.2). Concernant les valeurs fournies par KaRIn, celles-ci sont moyennées et corrigées des valeurs troposphériques provenant du radiomètre *rad_wet_tropo_cor* mais aussi du biais dû à l'état de la mer *sea_state_biais_cor*. La valeur de SSH finale est définie comme suit dans le rapport décrivant les produits de SWOT (NASA, 2020) :

[5]

$$ssh_karin_{finale} = ssh_karin_{moyennée} - sea_state_biais_cor - rad_wet_tropo_cor$$

Ainsi, le calcul du biais entre les valeurs SSH altimétriques et LiDAR s'obtient en ajoutant les corrections de l'équation 5 ; ce qui se traduit mathématiquement de la manière suivante :

[6]

$$biais = ssh_karin_{finale} - ssh_lidar + sea_state_biais_cor + rad_wet_tropo_cor$$

La valeur de *ssh_lidar* provient d'une moyenne entre les points LiDAR contenus à l'intérieur d'une surface d'un certain rayon. Sa position correspond au barycentre de l'ensemble des points de la zone tampon (voir figure 22). Avec un rayon de 2 km, une bande LiDAR comporte en moyenne 12 valeurs SSH comparées à tout autant de valeurs SSH

mesurées par KaRIn. J’ai notamment procédé à des tests avec plusieurs rayons pour la bande la mieux synchronisée du vol SWOT3 afin d’observer leur influence sur le biais moyen et sur la cohérence entre les valeurs d’une même bande (voir figure 23).

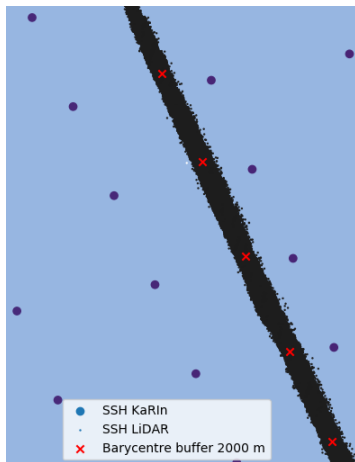


Figure 22 : Méthode de buffer appliquée à une bande du vol SWOT3

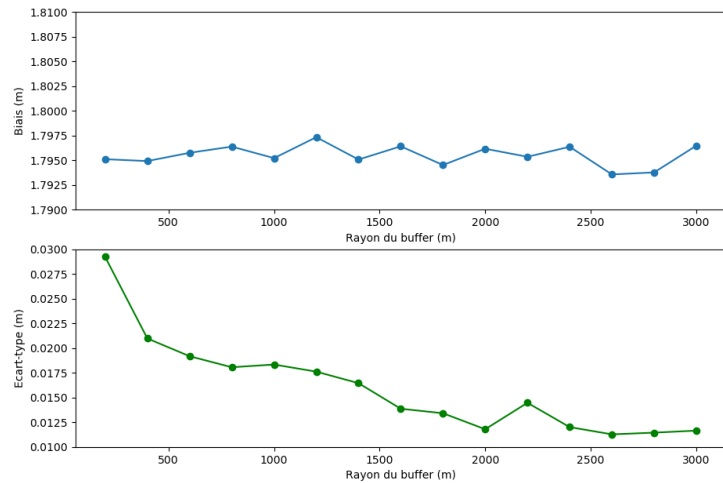


Figure 23 : Biais moyen sur toute une bande entre SSH LiDAR et SSH KaRIn et son écart-type pour différents rayons de buffer

Un biais constant d’un peu moins de 1.8 m apparaît nettement sur le premier graphique de la figure 23. Tandis que sur le second graphique, l’écart-type des différentes valeurs de SSH sur le biais moyen se rapproche du centimètre lorsque le rayon du buffer est équivalent à la résolution de SWOT, soit 2000 m. Différentes pistes ont été explorées pour tenter de trouver l’origine de ce biais. Les données LiDAR ont été reconstruites avec des points connus au sol et ne présentent pas d’écart de cet ordre de grandeur. Également, le référentiel ellipsoïdal est le même entre les deux produits (GRS80). Et toujours dans le but de comprendre ce décalage, j’ai comparé chacune des bandes de l’acquisition SWOT3, plus ou moins désynchronisées avec le passage du satellite, pour des buffers de 2000 m.

<i>Bande</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>Synchronisation avec SWOT (minutes)</i>	-17	-3	8	16	26	37
<i>Biais (m)</i>	1.942	1.794	1.788	1.726	1.555	1.300
<i>Écart-type (m)</i>	0.024	0.012	0.021	0.023	0.045	0.064

Tableau 7 : Analyse de l’effet de la désynchronisation des mesures LiDAR avec le passage du satellite (en vert : bande la mieux synchronisée)

En résumé du tableau 7, la synchronisation des acquisitions LiDAR avec le passage de SWOT affecte à la fois le biais mais aussi son écart-type. Les mesures étant non corrigées de la marée océanique, ce phénomène apparaît clairement dans la variation du biais au cours du temps. Dans l’attente des produits complets et fournis par le CNES à la date du 23 août 2023, ces comparaisons servent de premiers fondements pour les futures études réalisées dans le cadre de l’étalonnage de SWOT.

Conclusion

Les premières images des mesures radars de SWOT sont impressionnantes¹³. Cette très haute résolution laisse promettre de grandes avancées en termes de connaissances hydrologiques et océanographiques dans les années à venir. Le satellite est en effet rentré à partir de juillet 2023 dans sa phase scientifique avec une orbite répétitive de 21 jours, ce qui marque la fin de sa phase d'étalonnage. Le projet de définir l'apport du LiDAR pour la calibration d'un altimètre a été lancé par le laboratoire M2C en 2016. Cette mission a depuis permis de parcourir et d'analyser des techniques de comparaison entre mesures satellitaires et mesures *in situ* par LiDAR aéroporté.

La comparaison par calcul de SSH ayant en grande partie été étudiée par Laetitia Roguet (2022), mon travail s'est donc centré sur la technique de trajectographie employée et sur la description de la topographie de l'océan par spectre de vagues. La qualité de la comparaison avec SWOT dépend en effet principalement de la méthode de calcul de positionnement. La trajectographie par iPPP en mer, évaluée pour plusieurs vols, aura permis de retrouver les mêmes garanties de précision qu'une trajectoire DGPS proches des bases. La précision d'une mesure d'élévation par LiDAR est ainsi comprise entre 5 et 8 cm. Ce mode de positionnement convient donc largement à l'étalonnage de SWOT qui possède une précision instantanée annoncée à 50 cm. Le spectre directionnel de vagues obtenu à partir de mesures LiDAR aéroportées devrait quant à lui favoriser l'élimination du biais lié à l'état de mer et pouvant atteindre jusqu'à 30 cm en fonction de la résolution de la donnée. Par ailleurs, la caractérisation spectrale de la topographie de l'océan par drone LiDAR reste envisageable mais nécessite une étude plus approfondie.

L'étude comparative de SWOT par le laboratoire s'appuie sur les vols réalisés au cours des mois de mai et juin 2023. La synchronicité des acquisitions avec le satellite et les informations qu'elles renseignent ont permis de recueillir de premiers résultats. Ceux-ci sont bien sûr encore exploratoires et devront faire l'objet d'un travail plus approfondi. La reprise des moyens de comparaison développés dans ce travail afin de les confronter aux produits finaux de SWOT devrait assurément signer l'aboutissement d'un travail préparatoire de longue haleine. Cela marquera également le début de l'adoption du LiDAR pour les futures campagnes d'étalonnage d'altimètre.

¹³ Voir annexe 17

Bibliographie

Ouvrages imprimés

DUFOUR JP., 2001. Introduction à la géodésie. Hermès Science Publications, Paris (France), 334 p.

DUQUENNE F., BOTTON S., PEYRET F. et al, 2005. GPS localisation et navigation par satellites. Hermes Science Publications - Lavoisier, Paris (France), 330 p.

STAMMER D., CAZENAVE A., 2017. Satellite Altimetry over Oceans and Land Surfaces. CRS Press, Boca Raton (États-Unis), 643 p.

Chapitre dans un ouvrage imprimé

PURKIS SJ., BROCK JC., 2013. LiDAR Overview. In : GOODMAN JA., PURKIS SJ., PHINN SR., Eds. Coral Reef Remote Sensing. Springer, Dordrecht (Pays-Bas), 436 p.

Travaux universitaires

LION C.. Simulation des données SWOT haute résolution et applications à l'étude de l'estuaire de l'Amazone, [en ligne]. Disponible sur : <<https://theses.hal.science/tel-00932791>>. (consulté le 14/04/2023). Thèse Hydrologie spatiale, Toulouse (France) : Université Toulouse III, 2012, 243 p.

POULLAIN E.. Exploitation de l'intensité du signal LASER d'un LiDAR topographique aéroporté des environnements littoraux sableux, [en ligne]. Disponible sur : <<https://theses.hal.science/tel-00924649>>. (consulté le 02/05/2023). Thèse Terres solides et enveloppe superficielle, Caen (France) : Université de Caen Normandie, 2013, 194 p.

ROGUET L.. Étalonnage du futur altimètre spatial NASA/CNES SWOT LiDAR aéroporté : trajectographie iPPP et analyse du champs de vagues, [en ligne]. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/DUMAS/dumas-04053918v1>>. (consulté le 28/03/2023). Travail de Fin d'Études, Le Mans (France) : École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes, 2022, 71 p.

SERTHELON R.. 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, [en ligne]. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03268346>>. (consulté le 30/03/2023). Travail de Fin d'Études, Le Mans (France) : École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes, 2020, 79 p.

SHI J., Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks, [en ligne]. Disponible sur : <<https://prism.ucalgary.ca/items/f614ed2b-c377-4efb-b6aa-b705d931848d>>. (consulté le 20/05/2023). Thèse Ingénierie Géomatique, Calgary (Canada), 2012, 171 p.

TERNON P.. Spectre de vagues par LiDAR aéroporté comparé aux mesures satellitaires, [en ligne]. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02959277/document>>. (consulté le 29/03/2023). Travail de Fin d'Études, Le Mans (France) : École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes, 2019, 53 p.

Rapports institutionnels

HWANG PA., KRABILL WB., WALSH EJ. et al, 1999, Airborne Scanning Lidar Measurement of Ocean Waves, NRL/MR/7332--99-8221, 21 p.

NASA, 2017, SWOT Project Mission Performance and Error Budget, JPL D-79084, 117 p.

NASA, 2018, SWOT Calibration/Validation Plan (Initial Release), JPL D-75724, 152 p.

NASA, 2020, SWOT Product Description (L2_LR_SSH), JPL D-56407, 78 p.

Articles de périodiques imprimés

FU LL., UBELMANN C.. *On the Transition from Profile Altimeter to Swath Altimeter for Observing Global Ocean Surface Topography*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, N°31, p. 560-568

FUND F., MOREL L., MOCQUET A.. *Modélisations des retards troposphériques pour les observations GPS et impacts sur l'estimation de la hauteur ellipsoïdale*. Revue XYZ, 2010, N°123, p. 27-32

LENAIN L., MELVILLE WK.. *Measurements of the Directional Spectrum across the Equilibrium Saturation Ranges of Wind-Generated Surface Waves*. Journal of Physical Oceanography, 2017, N°47, p. 2123-2138

LOYER S., PEROSANZ F., MERCIER F. et al. *Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS analysis center*. Journal of Geodesy, 2012, N°86, p.991-1003

MELVILLE WK., LENAIN L., CAYAN DR. et al. *The Modular Aerial Sensing System*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, N°33, p. 1169-1184

MOREL L., FUND F., LEGROS R., et al. *PPP, la maturité ?*. Revue XYZ, 2014, N°138, p. 42-50

SUTHERLAND P., BROZENA J., ROGERS WE. et al. *Airborne Remote Sensing of Wave Propagation in the Marginal Ice Zone*. Journal of Geophysical Research : Oceans, 2018, N°123, p. 4132-4152

WALSH EJ., HANCOCK III DW., HINES DE. et al. *Directional Wave Spectra Measured with the Surface Contour Radar*. Journal of Physical Oceanography, 1985, N°15, p. 566-592

Articles de périodiques électroniques

CNRS. *Le satellite TOPEX – Poséidon, premières observations*. La lettre du changement global, [en ligne], 1995, N°2. Disponible sur : <<https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/rechfran/4theme/roledelocean/satellitetopex.html>>. (consulté le 13/04/2023)

CNRS. *SWOT : un satellite pour cartographier le cycle de l'eau sur Terre*. [en ligne], 2022. Disponible sur : <<https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/swot-un-satellite-pour-cartographier-le-cycle-de-leau-sur-terre>>. (consulté le 17/04/2023)

FERNANDES MJ., LAZARO C., VIEIRA T.. *On the role of the troposphere in satellite altimetry*. Remote Sensing of Environment, [en ligne], 2021, N°252. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112149>>. (consulté le 24/05/2023)

FERNANDEZ-DIAZ JC., CARTER WE., SHRESTHA RL. et al. *Understanding Airborne Mapping LiDAR Collection and Data Product Generation for Archaeological Research in Mesoamerica*. Remote Sensing MDPI, [en ligne], 2014, N°6. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/rs6109951>>. (consulté le 05/05/2023)

GUO J., ZHANG H., LI Z. et al. *On Modelling Sea State Bias of Jason-2 Altimeter Data Based on Significant Wave Heights and Wind Speeds*. Remote Sensing MDPI, [en ligne], 2023, N°15. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/rs15102666>>. (consulté le 05/06/2023)

MORROW R., FU LL., ARDHUIN F. et al. *Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean (SWOT) Mission*. Frontiers in Marine Science, [en ligne], 2019, N°6. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232>>. (consulté le 12/05/2023)

ROSHANDEL S., LIU W., WANG C. et al. *3D Ocean Water Wave Surface Analysis on Airborne LiDAR Bathymetric Point Clouds*. Remote Sensing MDPI, [en ligne], 2021, N°13. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/rs13193918>>. (consulté le 13/04/2023)

VILLAS BOAS AB., LENAIN L., CORNUELLE BD. et al. *A Broadband View of the Sea Surface Height Wavenumber Spectrum*. *Geophysical Research Letters*, [en ligne], 2022, N°49. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1029/2021GL096699>>. (consulté le 03/05/2023)

ZLINSZKY A., BOERGENS E., GLIRA P. et al. *Airborne Laser Scanning for calibration and validation of inshore satellite altimetry : A proof of concept*. *Remote Sensing of Environment*, [en ligne], 2017, N°197. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.027>>. (consulté le 21/04/2023)

Sites web

CNES. Aviso+ Satellite Altimetry Data, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.aviso.altimetry.fr/fr>>. (consulté le 13/04/2023) (a)

CNES. SWOT Une mission d'hydrologie et océanographie pleine de promesses, [en ligne]. Disponible sur : <<https://swot.cnes.fr/fr>>. (consulté le 23/03/2023) (b)

IGS. Products, [en ligne]. Disponible sur : <<https://igs.org/products/>>. (consulté le 29/05/2023)

NASA JPL. SWOT Surface Water and Ocean Topography, [en ligne]. Disponible sur : <<https://swot.jpl.nasa.gov/>>. (consulté le 23/03/2023)

PIXAIR SURVEY. PixAir Survey [en ligne]. Disponible sur : <<https://pixair-survey.com/>>. (consulté le 09/05/2023)

SWOT-AdAC. SWOT AdAC Consortium, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.swot-adac.org/>>. (consulté le 24/03/2023)

Un peu de vulgarisation : l'altimétrie (2017). In : CNES. [cnes.fr](https://cnes.fr/fr), [en ligne]. Disponible sur : <<https://cnes.fr/fr/un-peu-de-vulgarisation-laltimetrie>>. (consulté le 23/03/2023)

La mission SWOT de topographie des surfaces d'eau océaniques et continentales (2023). In : ASC. [canada.ca](https://www.asc-csa.gc.ca), [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/swot/>>. (consulté le 02/05/2023)

Notices

ASPRS. LAS Specification (v1.2). 2008, 13 p.

LEICA GEOSYSTEMS. Leica ALS60 Airborne Laser Scanner Product Specifications. 2008, 12 p.

Communiqué de presse

CNES, 24/03/2023. *Le satellite SWOT de suivi et de mesure des eaux livre ses premières observations*. CP018-2023 (c)

Communication dans un congrès

BONNEFOND P.. In : 2022 SWOT Science Team Meeting, Chapel Hill (États-Unis) et Toulouse (France), juin 2022

LAURICHESSE D., MERCIER F., BERTHIAS JP.. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results. In : ION GNSS 2010, Portland (États-Unis), septembre 2010

MELVILLE K., LENAIN L.. Broad Range airborne ocean topography measurements : Modular Aerial Sensing System (MASS) in support of SWOT CalVal. In : SWOT CalVal Workshop, Montreal (Canada), juin 2018

PEROSANZ F., LOYER S., MERCIER F. et al. Contribution du GRGS à la campagne REPRO2 de l'IGS : Intérêts pour les traitements GPS statiques et dynamiques en mode iPPP. In : Présentations du Colloque G2 et Célébration des 60 ans de gravimétrie, Strasbourg (France), novembre 2014

PEROSANZ F.. GNSS : une révolution pour le positionnement précis. In : Géolocalisation et navigation dans l'espace et le temps, Paris (France), mars 2018

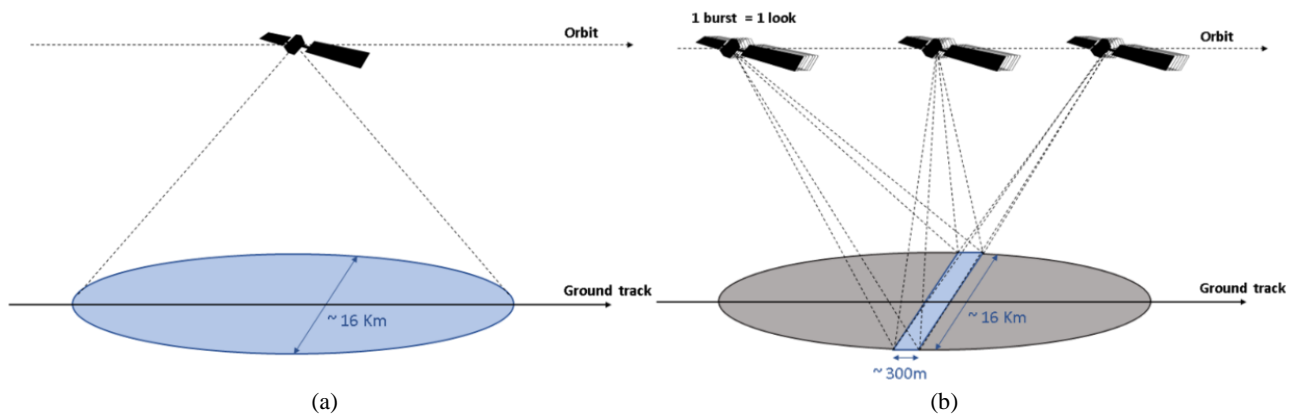
Table des annexes

Annexe 1 Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO ou SAR).....	48
Annexe 2 Le principe de mesure du radar interférométrique KaRIn	49
Annexe 3 Modélisation du FoV maximal (en degrés) par rapport à la configuration de la trappe du Piper PA-31	50
Annexe 4 Plan de vol du laboratoire M2C pour la phase d'étalonnage de SWOT à la date du 1 ^{er} mars 2023	51
Annexe 5 Horaires de passage de SWOT à Cherbourg (pass 16) pour le mois de juin 2023	52
Annexe 6 Trajectoire du vol SWOT1 du 23.05.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc).....	53
Annexe 7 Trajectoire du vol SWOT2 du 24.05.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc).....	54
Annexe 8 Trajectoire du vol SWOT3 du 15.06.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc).....	55
Annexe 9 Trajectoire du vol SWOT4 du 16.06.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc).....	56
Annexe 10 Interface du logiciel GINS-PC.....	57
Annexe 11 Fichier directeur (.yml) pour le vol au large d'Ouessant	58
Annexe 12 Extrait d'un fichier solution (.PPP) et explication du format	59
Annexe 13 La procédure générale d'une acquisition par LiDAR aéroporté	60
Annexe 14 Influence de l'effet Doppler sur un cas simplifié.....	62
Annexe 15 Trajectoire de l'avion et bandes acquises dans le cadre du vol OUESSANT et localisation de la bouée Pierres Noires.....	63
Annexe 16 Trajectoire de l'avion dans le cadre du vol SWOT1 et localisation de la bouée D-Day	64
Annexe 17 Premières images radars traitées de SWOT, application aux fleuves et rivières de Toulouse	65

Annexe 1

Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO ou SAR)

Un type d'altimètre est apparu plus récemment et a pour la première fois été utilisé pour la mission CryoSat-2 en 2010. Il s'agit du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) ou Synthetic Aperture Radar (SAR) en anglais. Les impulsions sont émises à une fréquence bien plus élevée qu'en altimétrie conventionnelle, soit environ 18000 au lieu de 2000 impulsions par seconde, ce qui permet d'améliorer la précision et la résolution (CNES, 2023, a). Bien que cette technique soit plus sensible aux erreurs liées à l'atmosphère, la connaissance enrichie des paramètres de correction, rendue possible grâce au nombre conséquent d'observations déjà réalisées lors des missions précédentes, favorise son exploitation. Et contrairement à un radar pointant au nadir, les impulsions ne sont ici pas nécessairement émises à la verticale. L'angle de diffusion peut varier entre 20 et 50° et va impacter positivement la résolution des mesures dans le sens de déplacement du satellite. La résolution le long de la trace passe en effet de 16 km en ce qui concerne les altimètres conventionnels à 300 m pour les altimètres SAR (voir figure). De ce fait, des observations sur des plus petites structures océaniques peuvent être réalisées (Lion, 2012).



Empreinte au sol et résolution d'un altimètre conventionnel (a) et d'un altimètre SAR (b) (CNES, 2023, a)

Annexe 2

Le principe de mesure du radar interférométrique KaRIn

L'annexe suivante démontre de manière succincte le principe de mesure de hauteur par radar interférométrique.

Comme observé géométriquement sur la figure, une triangulation s'opère entre la ligne de base (B) et le range des deux antennes (r_1 et r_2). La différence entre les distances r_1 et r_2 (Δr) est obtenue en mesurant la différence de phase (Φ) qui est donnée par la relation ci-dessous :

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r, \text{ avec } \lambda : \text{longueur d'onde du radar}$$

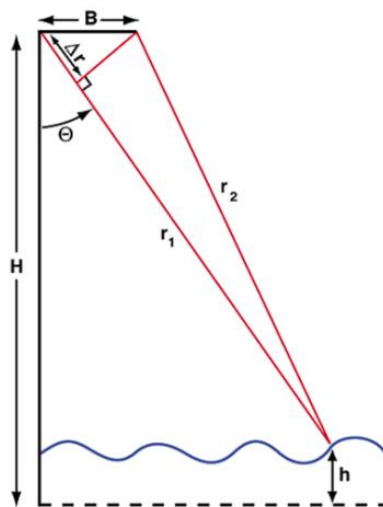
Elle peut également s'écrire de la manière suivante :

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} B \sin \theta, \text{ avec } \theta : \text{angle de visée}$$

La ligne de base (B) correspond à la distance entre les deux antennes et est donc déjà connue, soit environ 10 m. La hauteur de la surface de l'eau (h) est finalement calculée de la manière suivante, faisant intervenir l'angle de visée (θ) :

$$h = H - r_1 \cos \theta, \text{ avec } H : \text{altitude de l'antenne émettrice}$$

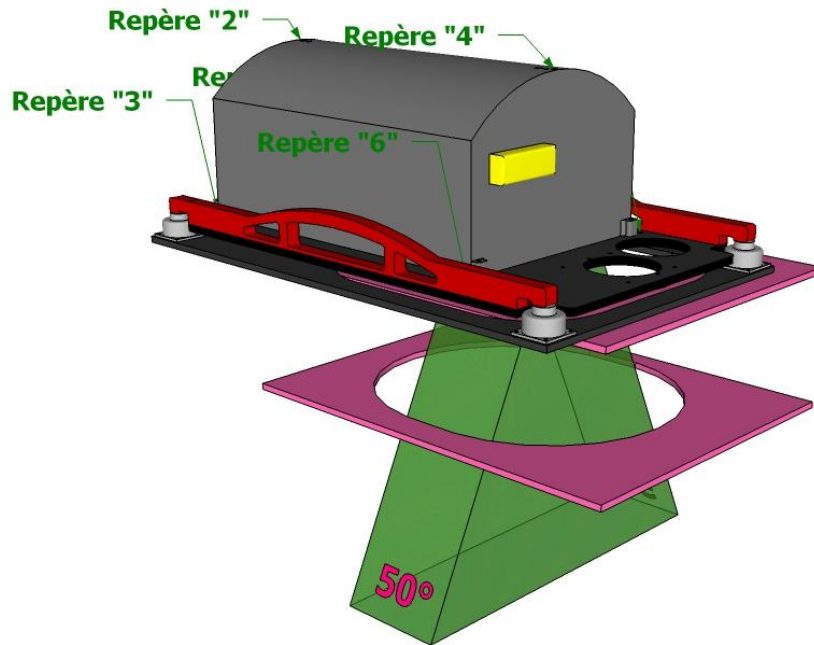
Bien entendu, les formules précédemment évoquées supposent que la surface mesurée reste plate et ne prennent donc pas en compte la courbure de la Terre.



(NASA, 2017)

Annexe 3

Modélisation du FoV maximal (en degrés) par rapport à la configuration de la trappe du Piper PA-31



(L. Benoit, M2C, 2023)

Ci-dessus, le modèle en 3 dimensions simplifié du Leica ALS60 positionné sur sa platine dans l'avion à trappe (en rose) Piper PA-31 de la société PixAir Survey.

Plusieurs angles de FoV entre 75° et 50° ont été testés. Le FoV maximal contraint par la configuration est de 50° . Les repères indiqués sur le modèle correspondent aux points relevés au tachéomètre dans le but de connaître ensuite le bras de levier, propre à chaque avion, entre l'antenne GPS et le capteur LiDAR.

Annexe 4

Plan de vol du laboratoire M2C pour la phase d'étalonnage de SWOT à la date du 1^{er} mars 2023



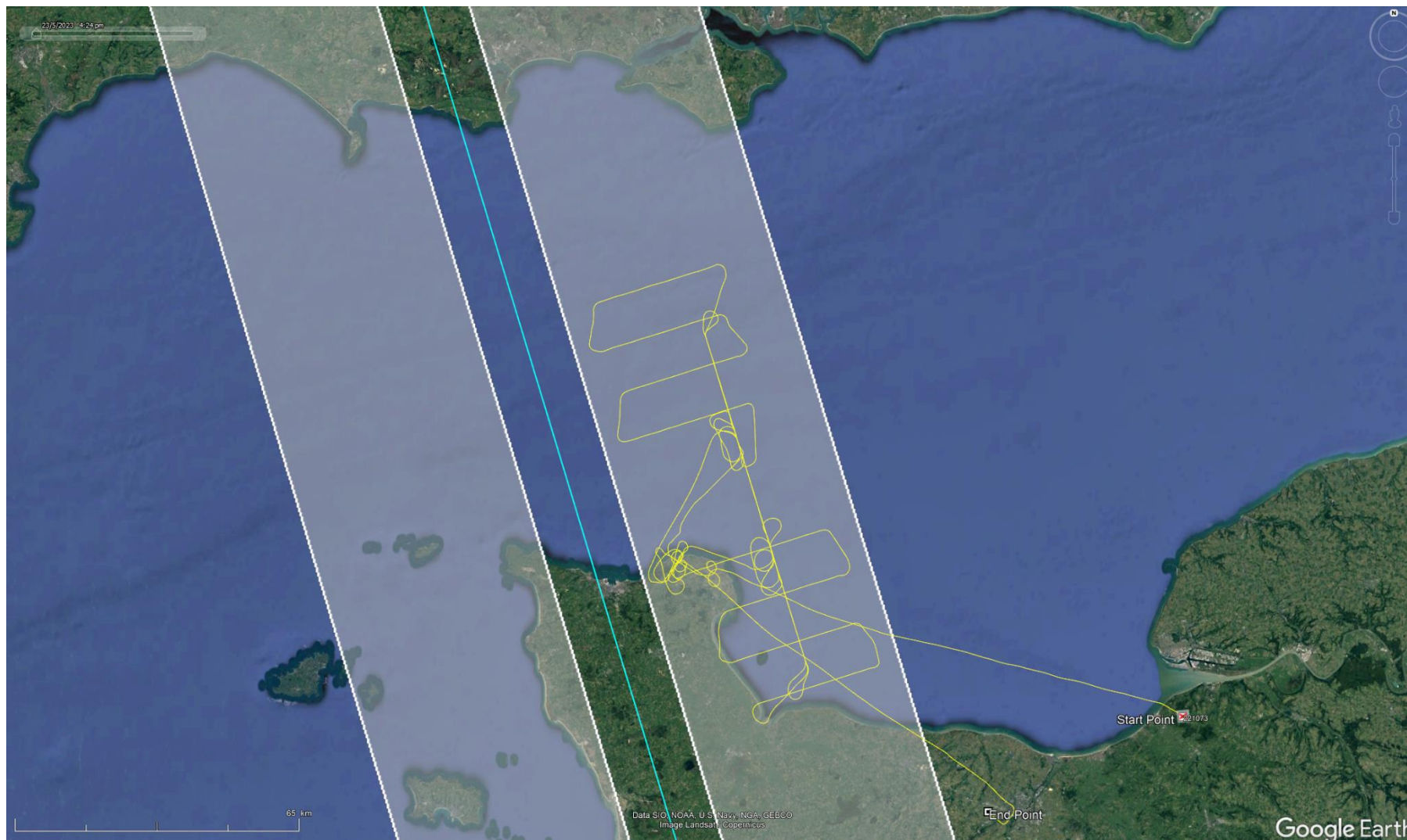
Annexe 5

Horaires de passage de SWOT à Cherbourg (pass 16) pour le mois de juin 2023

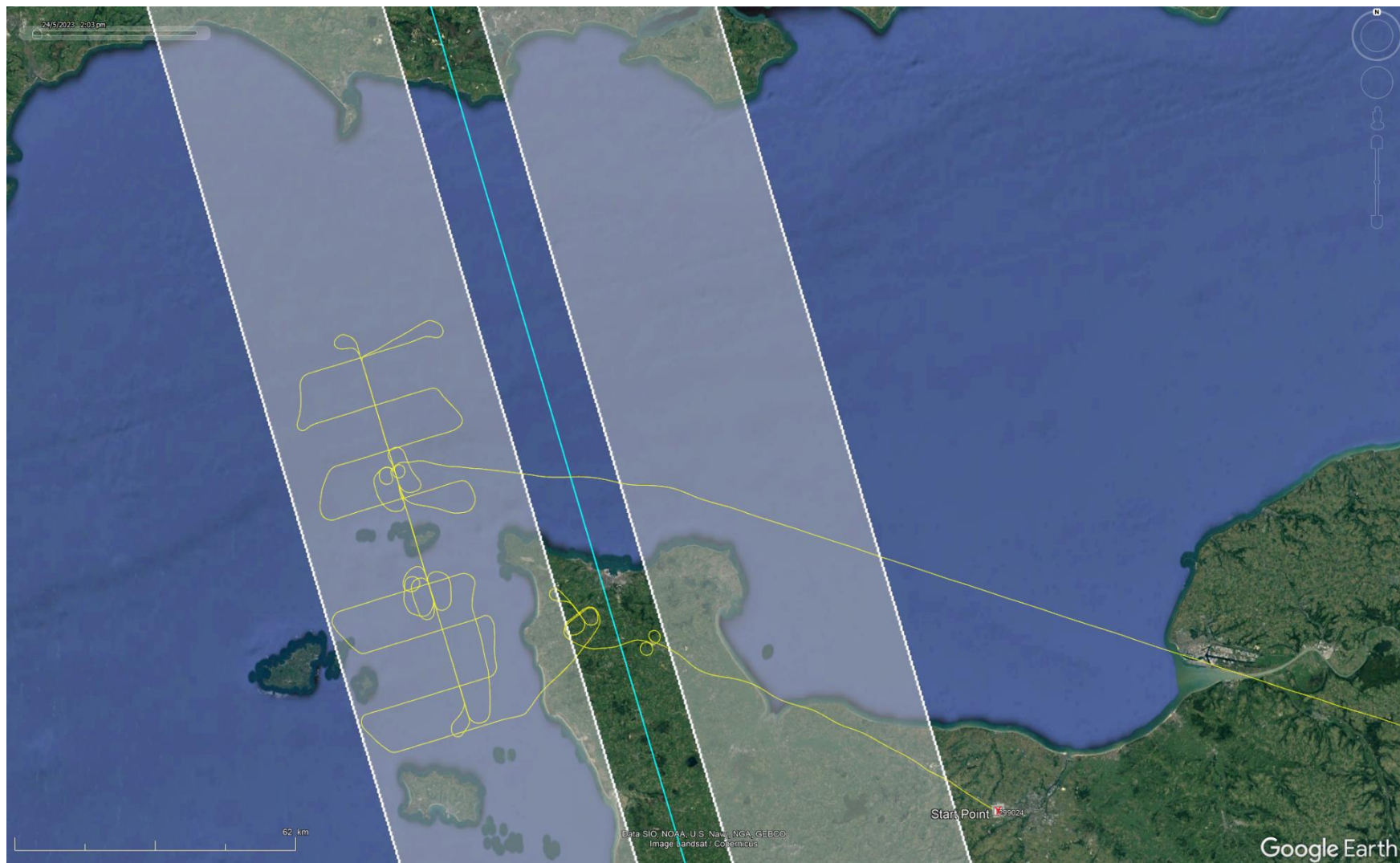
<i>Heure (UTC)</i>		<i>Heure (UTC+2)</i>
03/06/23 00:40	02:00	03/06/2023 02:40
04/06/23 00:31	02:00	04/06/2023 02:31
05/06/23 00:21	02:00	05/06/2023 02:21
06/06/23 00:12	02:00	06/06/2023 02:12
07/06/23 00:03	02:00	07/06/2023 02:03
07/06/23 23:53	02:00	08/06/2023 01:53
08/06/23 23:44	02:00	09/06/2023 01:44
09/06/23 23:34	02:00	10/06/2023 01:34
10/06/23 23:25	02:00	11/06/2023 01:25
11/06/23 23:16	02:00	12/06/2023 01:16
12/06/23 23:06	02:00	13/06/2023 01:06
13/06/23 22:57	02:00	14/06/2023 00:57
14/06/23 22:48	02:00	15/06/2023 00:48
15/06/23 22:38	02:00	16/06/2023 00:38
16/06/23 22:29	02:00	17/06/2023 00:29
17/06/23 22:19	02:00	18/06/2023 00:19
18/06/23 22:10	02:00	19/06/2023 00:10
19/06/23 22:01	02:00	20/06/2023 00:01
20/06/23 21:51	02:00	20/06/2023 23:51
21/06/23 21:42	02:00	21/06/2023 23:42
22/06/23 21:33	02:00	22/06/2023 23:33
23/06/23 21:23	02:00	23/06/2023 23:23
24/06/23 21:14	02:00	24/06/2023 23:14
25/06/23 21:04	02:00	25/06/2023 23:04
26/06/23 20:55	02:00	26/06/2023 22:55
27/06/23 20:46	02:00	27/06/2023 22:46
28/06/23 20:36	02:00	28/06/2023 22:36
29/06/23 20:27	02:00	29/06/2023 22:27
30/06/23 20:18	02:00	30/06/2023 22:18
01/07/23 20:08	02:00	01/07/2023 22:08
02/07/23 19:59	02:00	02/07/2023 21:59
03/07/23 19:49	02:00	03/07/2023 21:49

En bleu, les heures du passage de SWOT au-dessus de la zone de vol pour les deux acquisitions du mois de juin.

Annexe 6
Trajectoire du vol SWOT1 du 23.05.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc)



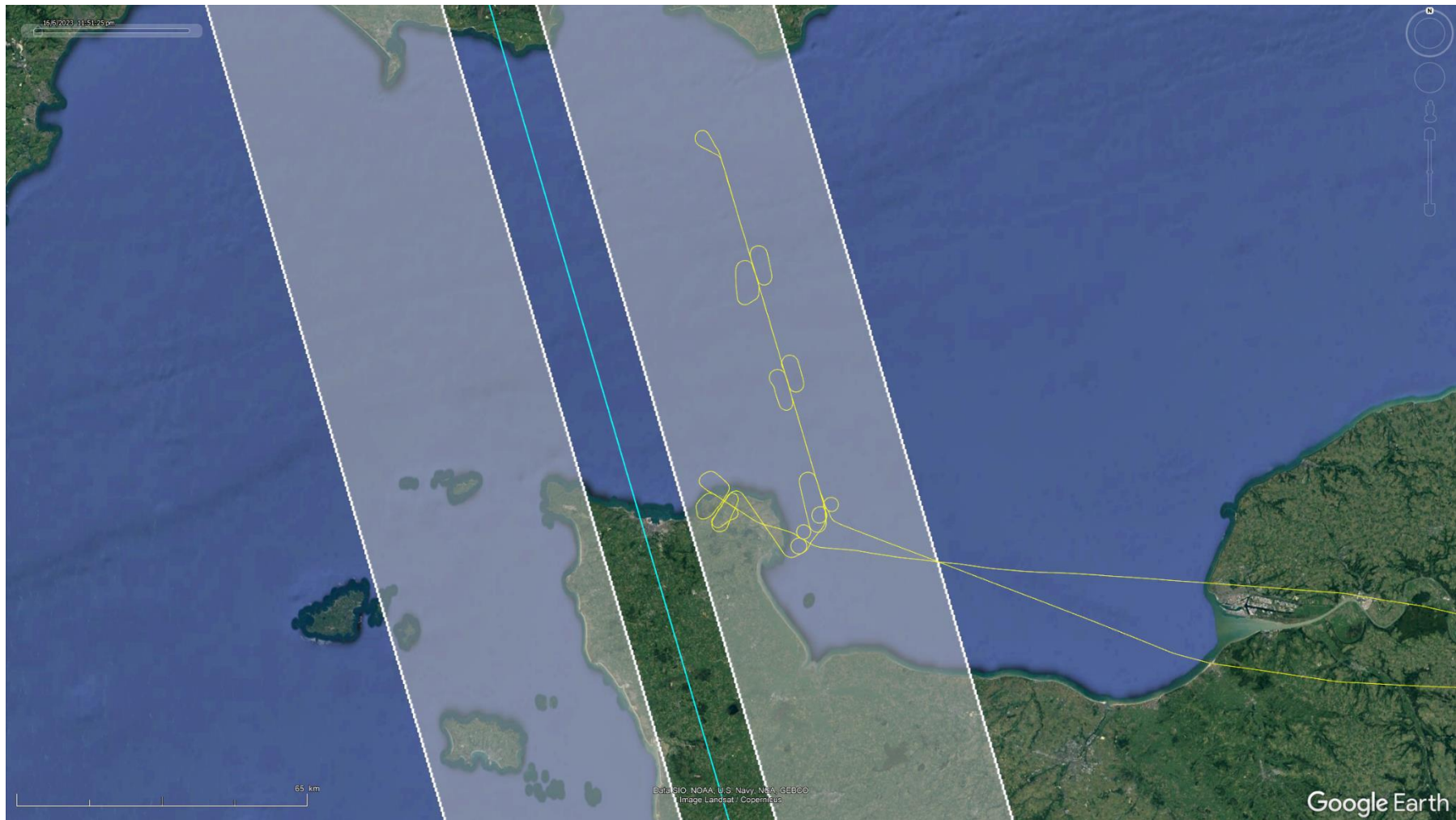
Annexe 7
Trajectoire du vol SWOT2 du 24.05.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc)



Annexe 8
Trajectoire du vol SWOT3 du 15.06.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc)

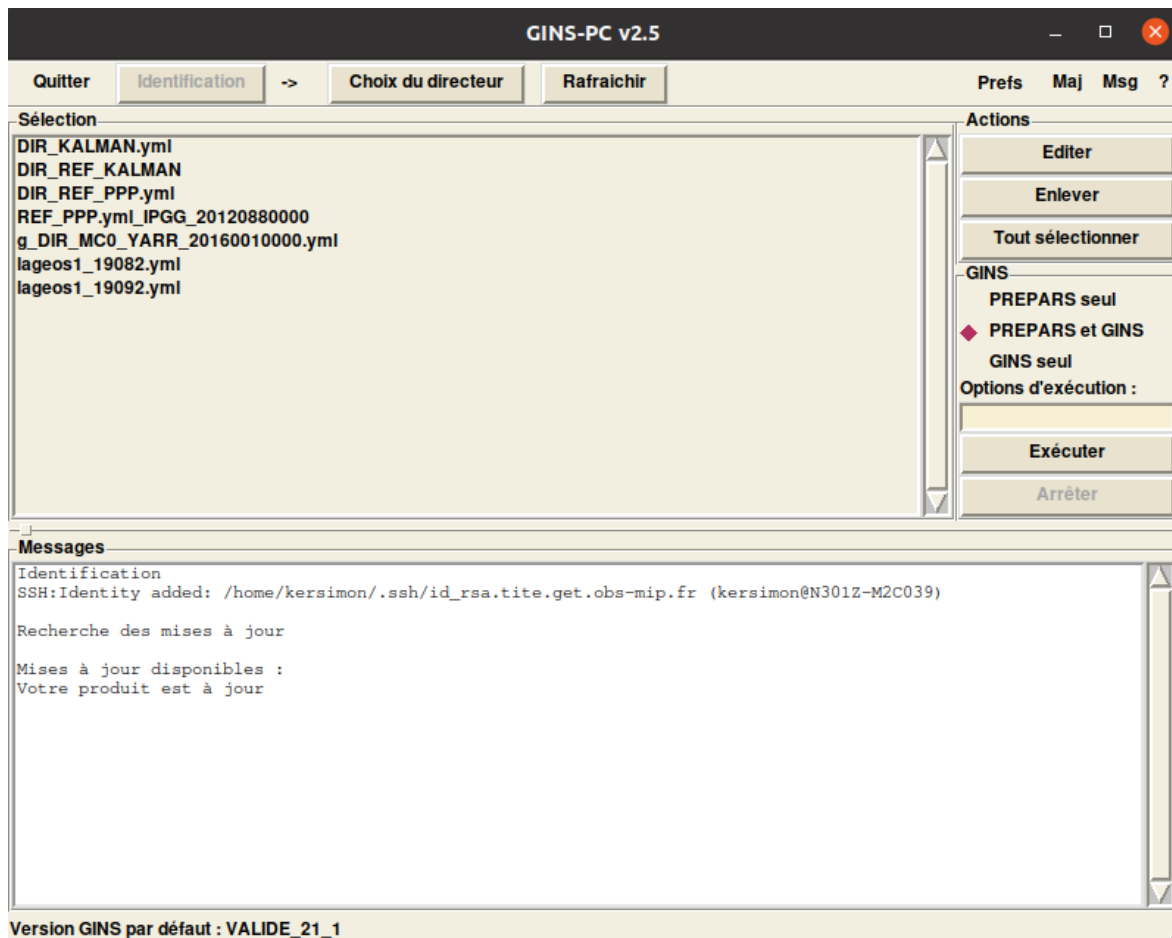


Annexe 9
Trajectoire du vol SWOT4 du 16.06.2023 (en jaune) et la trace du satellite SWOT (en blanc)



Annexe 10

Interface du logiciel GINS-PC



L'interface s'ouvre en lançant la commande `ginspc-ihm.bash` sur le terminal. Après identification (GINS-PC fonctionne avec des comptes nominatifs), un *directeur* est choisi parmi la liste des fichiers `.yml` disposants des paramètres de traitement. L'exécution est lancée soit pour le programme PREPARS (ou GINS) seul, soit les 2. Une fois lancé, un déroulé du traitement s'affiche dans le cadre blanc en bas de l'interface.

Annexe 11

Fichier directeur (.yml) pour le vol au large d'Ouessant

```

1 date :
2 arc_start : [25589, 40762.0]
3 arc_stop : [25589, 50956.0]
4 model :
5 environment :
6 gnss_external_attitude : attitude/GRM/default
7 earth_orientation_parameters : pole/nominal_NRO
8 gnss_antenna : ANTEX/igsR3_2194.atx
9 gnss_clock : horloges/MG3/default
10 ionex_files : ionosphere/igs/default
11 apriori_parameters : EXE_PPP/valap_cinem
12 gnss_preprocessing_options : EXE_PPP/options_prairie_cinem
13 macromodel : macromod/nominal_MG3
14 gravity : unused
15 ocean_tides : unused
16 ocean_pole_tide : unused
17 atmospheric_tides : unused
18 inverse_barometer : unused
19 atmospheric_pressure : unused
20 mean_sea_surface : unused
21 solar_activity : unused
22 thermosphere : unused
23 albedo_ir : unused
24 temporal_nutation : unused
25 trigonometric_nutation : unused
26 planet_ephemerides : lunisolaires/de440bdlf.ad
27 natural_satellite : unused
28 mean_pole :
29 compute_c21_s21_from : potential_model
30 iers_model : 2018.0
31 object :
32 station :
33 station_coordinates : .temp.gin/data/stations/XYZ_2020_25589_RINEX_2
34 ocean_tide_loading : charge/ocean/load_fes2014b_CF_GNSS.dat
35 atmosphere_loading : unused
36 ocean_pole_tide_loading : unused
37 center_of_mass_correction : unused
38 atmospheric_slr_loading_model : unused
39 constellation :
40 - name : GNSS_GPS
41 gnss_center_of_mass : [corrected, corrected, corrected, corrected]
42 force :
43 gravity_field_maximum_degree : not_computed
44 gravity_from_sun_and_planet : not_computed
45 integration_reference_frame : inertial_j2000
46 atmospheric_drag : not_computed
47 thermospheric_wnd : no
48 solar_pressure : not_computed
49 solid_tide : iers_2010_conventions
50 gravity_from_ocean_tides : not_computed
51 relativistic_acceleration : not_computed
52 gravity_from_atmospheric_pressure_variations : not_computed
53 satellite_emission : not_computed
54 accelerometer_attitude_thrust : not_computed
55 observation :
56 removal :
57 minimum_gnss_data_per_pass : 5
58 nsigma_threshold : 5
59 first_iteration_residual_threshold : 0
60 minimum_elevation_threshold : 0
61 data_sampling : 1
62 minimum_laser_raw_data : 0
63 minimum_doppler_data_per_pass : 0
64 interobject_data :
65 - file : orbites/MG3
66 name : GNSS_ephemeris
67 objects : [GNSS_GPS, unknown]
68 type : fixed_ephemeris
69 bodyfixed_ephemerides : yes
70 - file : .temp.20200123.200
71 name : GNSS_measurement
72 objects : [GNSS_GPS, station]
73 type : undifferentiated_gnss
74 tropospheric_correction : [wet, vmf1, gpt2]
75 nb_adjusted_biases_per_day_per_station : 200
76 min_elevation_phase : 8
77 min_elevation_range : 8
78 apriori_obs_stddev : 0.05
79 apriori_model_stddev : 5.0
80 gps_phase_ponderation_law : [0.0035, 0.15, 1.0]
81 gps_code_ponderation_law : [0.6000, 0.15, 1.0]
82 glo_phase_ponderation_law : [0.0350, 0.15, 1.0]
83 glo_code_ponderation_law : [2.0000, 0.15, 1.0]
84 gal_phase_ponderation_law : [0.0052, 0.15, 1.0]
85 gal_code_ponderation_law : [0.6000, 0.15, 1.0]
86 gnss_options :
87 phase_observations_process : yes
88 clock_parameters_globally_solved : yes
89 observation_options : [initialize_from_clock_file, constellation]
90 phase_nsigma_threshold : 5
91 code_nsigma_threshold : 5
92 max_iter_gps_removal : 5
93 phase_rms_threshold_after_iter_max : 0
94 code_rms_threshold_after_iter_max : 0
95 minimum_number_observations_per_pass : 5
96 parameter :
97 algorithm :
98 allow_ellip_at_convergence : yes
99 nb_iter_min_max : [1, 20]
100 convergence_criterion : 0.1
101 type : kalman_qr
102 kalman_options :
103 state_reduction : yes
104 forward_backward : yes
105 adjustment_parameters :
106 stations :
107 adjustment_type : [geodetic_marker, all_stations]
108 coordinates : cartesian_xyz
109 adjustment_frequency : [0, 0, 0, 1]
110 velocity : not_adjusted
111 label_output : middle_of_period
112 pole :
113 adjustment_x_y_t : [not_adjusted, not_adjusted, not_adjusted]
114 love_h2_h2_tilde : [not_adjusted, not_adjusted]
115 love_k2_k2_tilde : [not_adjusted, not_adjusted]
116 nutation_longitude_obliquity : [not_adjusted, not_adjusted]
117 constellation :
118 - name : GNSS_GPS
119 integration :
120 integration_stepsize : 0.0
121 low_inclination_formalism : normal
122 regularization : not_regularized
123 integration_algorithm : none
124 integration_order : 0
125 encke_technique : 0
126 direct_solar_pressure :
127 adjustment_type : not_adjusted
128 initial_value : 0.0
129 apriori_stddev : 0.0
130 nb_days : 0.0
131 surface_to_mass_ratio : 0.0
132 albedo_ir :
133 adjustment_type : not_adjusted
134 adjustment_param : 0.0
135 coefficient : [0.0, 0.0]
136 thermal_reemission :
137 adjustment_type : not_adjusted
138 coefficient : [0.0, 0.0]
139 bias :
140 r_bias : [none, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
141 t_bias : [none, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
142 n_bias : [none, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
143 x_bias : [none, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
144 y_bias : [none, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
145 z_bias : [none, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
146 output :
147 edition :
148 measurement_residuals_print : no
149 normal_matrix_print : no
150 parameters_print : no
151 residuals_station_print : no
152 archiving :
153 orbit : standard_format
154 extrapolated_orbit : 0
155 measurement_file_update : no
156 statistic_file : yes
157 normal_equation : after_convergence
158 non_gravitational_forces : no
159 user_extensions :
160 userext_addition : [PRINT_SOLUTION_FILE, GRADIENTS_TROPO 1, ADMIT_OCELOAD, GPS_HAUTE_FREQ 2020, BIAIS_INTER_FREQ_IDENT,
161 BIAIS_INTER_FREQ_SIGMA 170.00, GALILEO, COMMMT_MNA_EQNA, GPS_HOR_INTERP00030, GPS_SORTIE_MESURES, GPS_QU, GPS_POSTI

```

Les dates de début et de fin introduisent le fichier. Les modèles de correction sont ensuite renseignés suivis des observations. Le traitement souhaité étant cinématique, l'argument *kalman_qr* est attribué au paramètre *type*. La ligne *data sampling* est fixée à 1s, tout comme la dernière valeur de *adjustment frequency*. Enfin, le paramètre *GPS_HOR_INTERP00030* est ajouté dans le *userext_addition* pour le calcul d'interpolation à 1s.

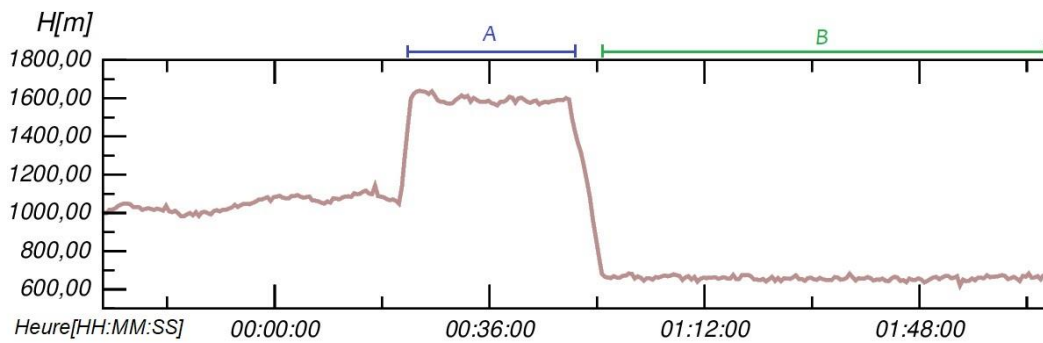
Annexe 13

La procédure générale d'une acquisition par LiDAR aéroporté

L'acquisition de données LiDAR se déroule en deux phases, qui ont chacune leur importance. Une première acquisition de mesures consiste à calibrer le capteur LiDAR (zone A sur les figures). Elle est essentielle car elle permet l'élimination d'erreurs de plusieurs centimètres comme celle due au *boresight*. Cet effet provient d'un décalage laser qui change à chaque installation de l'instrument dans l'avion. Sa correction s'obtient par recalage avec des points saillants au sol mesurés par LiDAR, par exemple des angles de toiture. La seconde partie du vol est ensuite dédiée à la production de bandes de mesures au-dessus de la zone d'étude (zone B sur les figures). L'exemple des deux figures de l'annexe correspond à un vol effectué par anticipation de la phase d'étalonnage de SWOT au cours du mois de janvier 2020 (vol OUESSANT).



Exemple d'une trajectoire pré-traitée (vol OUESSANT du 23.01.2020)



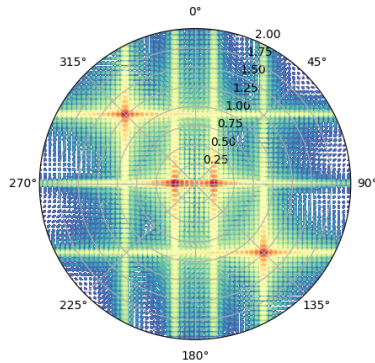
Les variations de l'altitude H de l'avion (vol OUESSANT)

Lors d'une même phase d'acquisition, l'avion tente de conserver une vitesse et une altitude constante. La figure ci-dessus représente le profil altimétrique de l'avion en fonction du temps. Il est ainsi aisé d'observer sur ce graphique une nette différence d'altitude entre la phase consacrée à la calibration (A) et le reste de l'acquisition (B). La hauteur pour l'acquisition de calibration est contrainte par des réglementations de survol au-dessus des villes à environ 1500 m. Cependant, la mesure de l'eau par capteur LiDAR implique très souvent une altitude relativement basse d'environ 600 m pour éviter une trop faible intensité du signal réfléchi dans des conditions de mer calme. La mer se mue alors en une surface qui n'est pas suffisamment rugueuse, ce qui provoque ainsi un effet miroir. Un vol basse altitude permet également de bénéficier de meilleures conditions météorologiques et notamment d'éviter la présence d'un plafond nuageux pouvant occulter le faisceau laser.

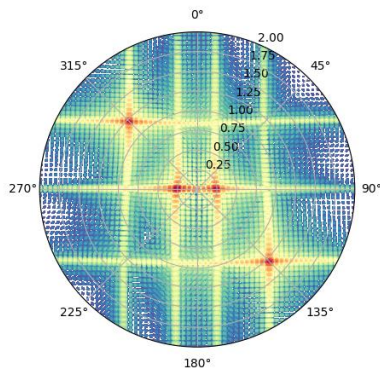
Annexe 14

Influence de l'effet Doppler sur un cas simplifié

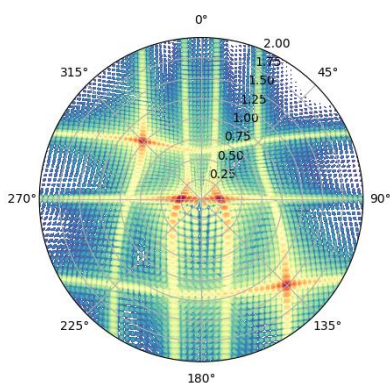
Dans cette annexe, est évaluée l'influence de l'effet Doppler appliquée à un cas simplifié et défini par deux principaux signaux. Deux longueurs d'onde différentes sont représentées. La direction de vol est fixée à 0°.



Spectre sans correction de l'effet Doppler



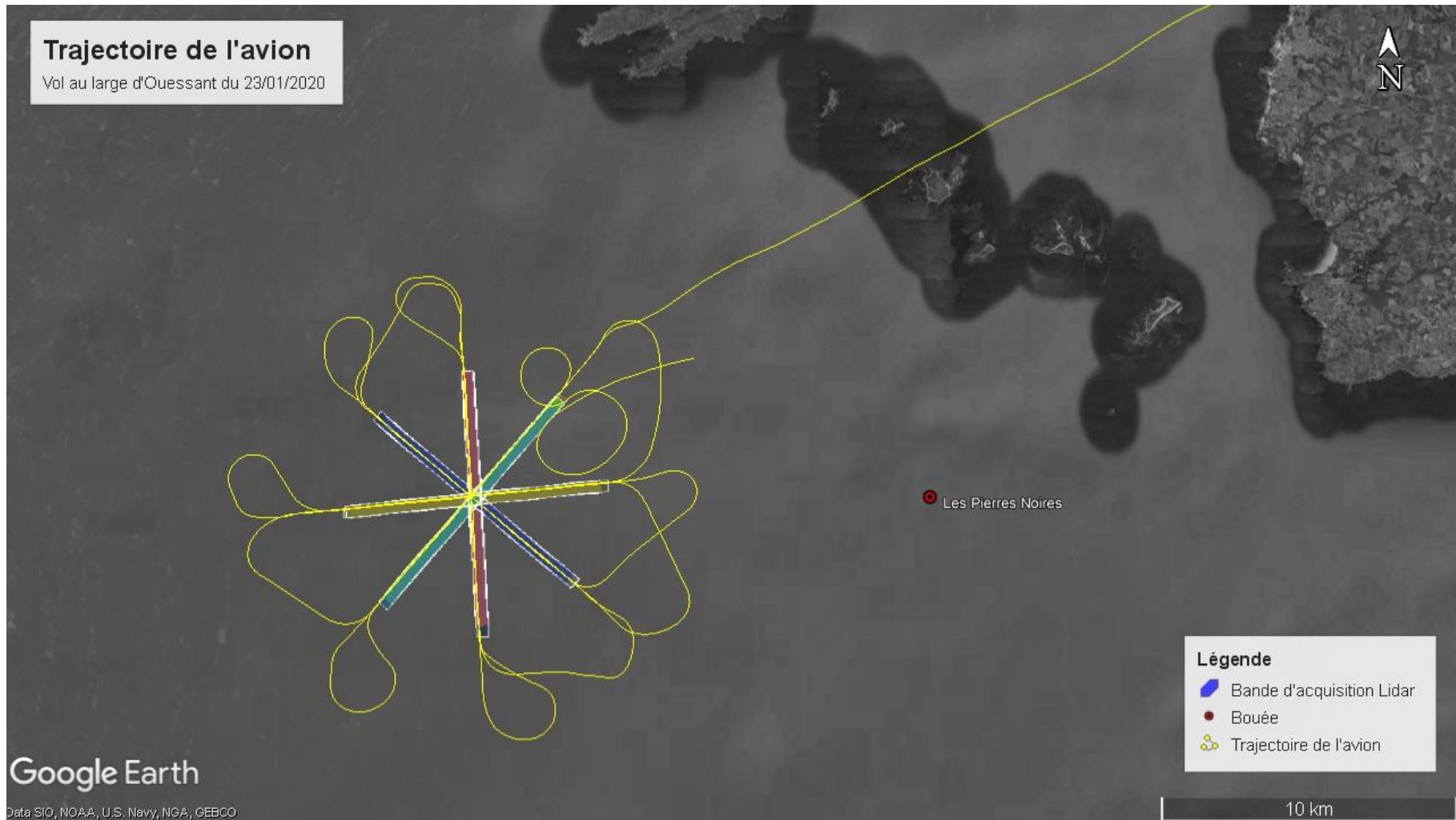
Spectre avec correction Walsh et vitesse de l'avion de 50 m/s (approximativement celle de l'avion) : influence de l'ordre de 20% pour les grandes longueurs d'onde et moins de 10% pour le plus petites dans la direction de l'axe de vol. Les longueurs d'onde perpendiculaires ne sont pas corrigées.



Spectre avec correction Walsh et vitesse de l'avion de 5 m/s (approximativement celle du drone) : influence très forte sur la correction de la fréquence (au-delà de 50%) mais pas sur la direction. A cette vitesse-là, l'effet est trop important et nécessite d'être corrigé d'une autre manière.

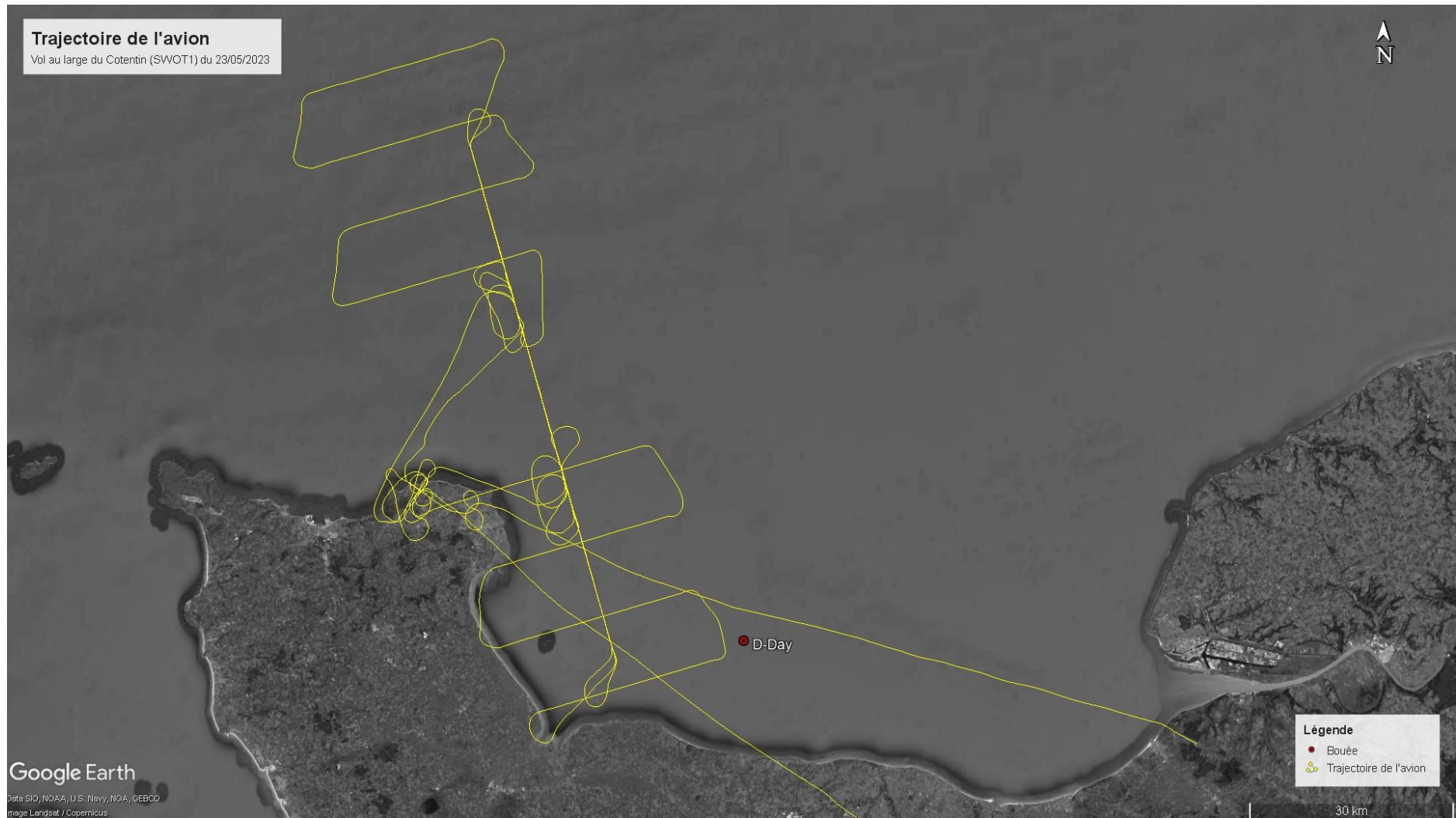
Annexe 15

Trajectoire de l'avion et bandes acquises dans le cadre du vol OUESSANT et localisation de la bouée Pierres Noires

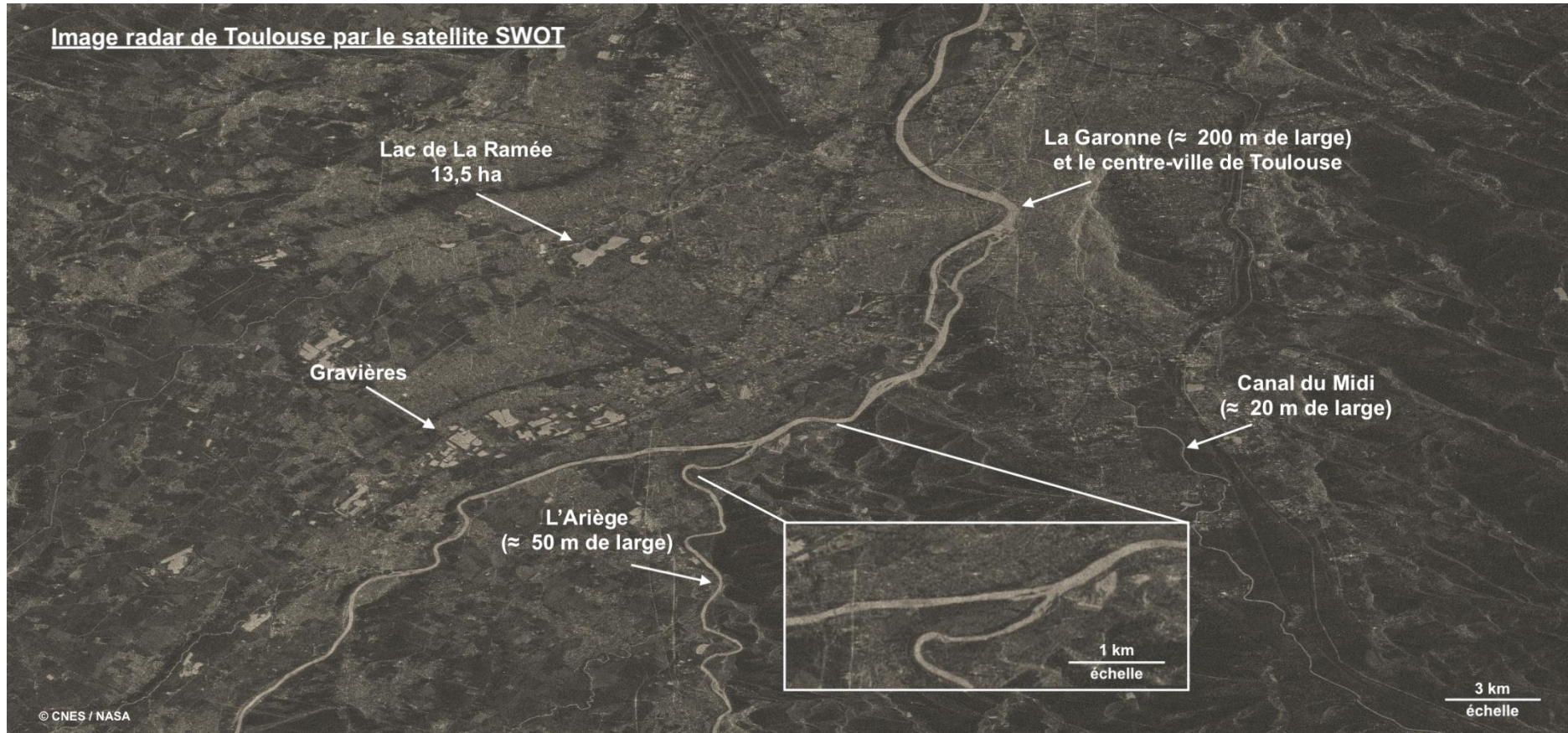


Annexe 16

Trajectoire de l'avion dans le cadre du vol SWOT1 et localisation de la bouée D-Day



Annexe 17
Premières images radars traitées de SWOT, application aux fleuves et rivières de Toulouse



(CNES, mars 2023)

Liste des figures

Figure 1 : Principe général de l’altimétrie satellitaire (ill D.Ducros, CNES).....	10
Figure 2 : Le satellite SWOT et son système interférométrique (CNES, 2023, b)	13
Figure 3 : L’orbite de SWOT lors de la phase d’étalonnage au niveau mondial (a) (NASA, 2023) et au niveau de la France (b) (SWOT-AdAC, 2023).....	15
Figure 4 : Les différents supports du LiDAR et leur échelle de mesure (M2C)	15
Figure 5 : Le fonctionnement du Lidar aéroporté (M2C)	16
Figure 6 : Spectre global de la hauteur de la surface de la mer SSH	18
Figure 7 : La précision absolue de l’ALS60 (en m) avec un FoV à 40° et un positionnement DGPS en fonction de la hauteur de vol (Leica, 2008)	19
Figure 8 : Le Piper PA31 Cheiftain de la société PixAir Survey (a) et sa trappe (b) dans laquelle est installé l’ALS60 (c) (23.05.2023).....	20
Figure 9 : Les étapes de la stratégie de comparaison entre mesures LiDAR et satellitaires	21
Figure 10 : Comparaison entre la précision en positionnement relatif (DD) et absolu (iPPP) en fonction de la longueur de la ligne de base (Perosanz, 2014)	23
Figure 11 : Les résidus sur les mesures de phase pour le vol OUESSANT	26
Figure 12 : Exemple d’une bande LiDAR du vol OUESSANT en échelle d’élévation (CloudCompare).....	28
Figure 13 : Les composantes du spectre directionnel.....	29
Figure 14 : Erreur angulaire de la direction du champ de vagues pour un vol drone à faible altitude et faible vitesse (schéma simplifié)	31
Figure 15 : Schéma de la méthode de découpage en images carrées appliquée au vol OUESSANT	32
Figure 16 : Schéma de la méthode zéro-padding appliquée à un cas simplifié.....	34
Figure 17 : Longueur d’onde maximale en fonction de l’angle séparant la direction de la vague de celle de la bande	35
Figure 18 : Forme théorique de l’acquisition (a) et son application concrète sur le vol OUESSANT (b)	36
Figure 19 : Spectre moyenné entre les 8 bandes de l’acquisition en étoile du vol OUESSANT	37
Figure 20 : Comparaison entre spectre provenant d’un houlographe et spectre obtenu par LiDAR	38
Figure 21 : Données préliminaires SSH Low Resolution (2x2 km) de l’altimètre KaRIn de SWOT lors du vol LiDAR SWOT3.....	39
Figure 22 : Méthode de buffer appliquée à une bande du vol SWOT3.....	40
Figure 23 : Biais moyen sur toute une bande entre SSH LiDAR et SSH KaRIn et son écart-type pour différents rayons de buffer	40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des corrections sur la mesure radar	12
Tableau 2 : Résumé des vols LiDAR effectués durant ce travail pour l’étalonnage de SWOT	22
Tableau 3 : Modèles et paramètres du traitement iPPP utilisés pour le vol OUESSANT et contenus dans le fichier directeur	25
Tableau 4 : Les résultats pour les vols traités en mode iPPP cinématique.....	26
Tableau 5 : Informations du calcul de densité d’une même bande avec ou sans les bords	28
Tableau 6 : Directions principales des champs de vagues pour huit bandes du vol OUESSANT ...	36
Tableau 7 : Analyse de l’effet de la désynchronisation des mesures LiDAR avec le passage du satellite (en vert : bande la mieux synchronisée).....	40

Topographie des océans avec le nouvel altimètre spatial SWOT (NASA/CNES) et le LiDAR aéroporté du laboratoire M2C

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2023

RESUME

Le satellite SWOT fournira des mesures de la topographie des surfaces en eaux de la Terre avec une précision révolutionnaire. Pour assurer cette exactitude, l'altimètre doit connaître une première phase d'étalonnage aussi appelée phase de calibration et de validation (CalVal). Depuis plus de 6 ans, le laboratoire M2C a donc mis en place des stratégies afin d'adopter la technologie LiDAR comme instrument in situ de référence.

Ce travail explore et tente de valider deux techniques de comparaison avec les mesures satellitaires : par la détermination de la Sea Surface Height (SSH) à partir d'un calcul de positionnement avec la méthode integer Precise Point Positioning (iPPP ou PPP-AR) ainsi que la conception d'un spectre directionnel de vagues éliminant le biais dû à l'état de la mer. Les résultats comparatifs attendus devraient permettre de perpétuer l'emploi du LiDAR dans les campagnes de validation des futurs altimètres.

Mots clés : SWOT, étalonnage, CalVal, LiDAR aéroporté, integer PPP, Sea Surface Height, spectre de vagues

SUMMARY

The SWOT satellite will provide measurements of the Earth's water surface topography with revolutionary precision. To ensure this accuracy, the altimeter must undergo an initial calibration and validation phase, also known as CalVal. For over 6 years, the M2C laboratory has implemented strategies to adopt LiDAR technology as an in situ reference instrument.

This work explores and attempts to validate two techniques for comparing with satellite measurements : determining the Sea Surface Height (SSH) through integer Precise Point Positioning (iPPP or PPP-AR) and designing a directional wave spectrum that eliminates the bias caused by sea state. The expected comparative results should enable the continued use of LiDAR in future altimeter validation campaigns.

Key words : SWOT, calibration, CalVal, Airborne LiDAR Scanning, integer PPP, Sea Surface Height, wave spectrum