



HAL
open science

Projet SWALIS : mise en oeuvre d'un système radar aéroporté dans le cadre de la mission spatiale SWOT pour l'analyse de la réflectivité des eaux continentales

Jean-Claude Kokou Koumi

► To cite this version:

Jean-Claude Kokou Koumi. Projet SWALIS : mise en oeuvre d'un système radar aéroporté dans le cadre de la mission spatiale SWOT pour l'analyse de la réflectivité des eaux continentales. Electronique. INSA de Rennes, 2023. Français. NNT : 2023ISAR0010 . tel-04573421

HAL Id: tel-04573421

<https://theses.hal.science/tel-04573421>

Submitted on 13 May 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.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'INSTITUT NATIONAL DES
SCIENCES APPLIQUÉES DE RENNES

ÉCOLE DOCTORALE N° 601

*Mathématiques, Télécommunications, Informatique, Signal, Systèmes,
Électronique*

Spécialité : *Électronique*

Par

Kokou Jean-Claude KOUMI

**Projet SWALIS : mise en œuvre d'un système radar aéroporté
dans le cadre de la mission spatiale SWOT pour l'analyse de
la réflectivité des eaux continentales**

Extension pour la mesure des courants surfaciques océaniques
(projet KaRADOC)

Thèse présentée et soutenue à l'INSA de Rennes, le 30 juin 2023

**Unité de recherche : Institut d'électronique et des technologies du numérique (IETR),
UMR CNRS - 6164**

Thèse N° : 23ISAR 17 / D23 - 17

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Yves DAUVIGNAC Professeur des Universités, Université Côte d'Azur

Charles-Antoine GUÉRIN Professeur des Universités, Université de Toulon

Composition du Jury :

Président : Danièle HAUSER

Examineurs : Jordi CHINAUD

Jean-Yves DAUVIGNAC

Charles-Antoine GUÉRIN

Dir. de thèse : Stéphane MÉRIC

Co-dir. de thèse : Éric POTTIER

Directrice de Recherche émérite

Ingénieur, CNES

Professeur des Universités, Université Côte d'Azur

Professeur des Universités, Université de Toulon

Professeur des Universités, INSA Rennes

Professeur des Universités, Université de Rennes

Invité(s) :

Patrice GONZALEZ Chef de service Instruments RADAR, CNES

REMERCIEMENTS

En premier, je remercie, mes directeurs de thèse, Éric Pottier et Stéphane Méric, de m'avoir accordé la chance de travailler avec eux sur ce sujet très intéressant. Merci pour votre confiance, patience et rigueur. Vos conseils avisés m'ont permis de mener ce projet à bien. Je vous en suis très reconnaissant. Ce fut une aventure enrichissante aussi bien sur le plan scientifique qu'humain.

Je tiens à remercier les membres du jury de m'avoir accordé leur précieux temps. Je remercie la présidente du jury Danièle Hauser pour l'attention apportée à mon travail de thèse. Je remercie également Charles-Antoine Guérin et Jean-Yves Dauvignac pour avoir accepté et assumé jusqu'au bout le rôle de rapporteur. Je remercie également Jordi Chinaud non seulement en tant que examinateur mais aussi pour m'avoir accompagné via nos réunions tout au long de ma thèse. Mes sincères remerciements Patrice Gonzalez d'avoir honoré notre invitation pour la défense de cette thèse.

Je remercie l'ensemble de mes collègues et personnels de l'INSA Rennes spécialement Guy et Gilles (les missions étaient trop sympa avec vous) pour la tente chaude au sommet de mon perchoir, le repas marcaire et les cours de natations. Je n'oublie pas les collègues de l'université de Rennes Noëlle, Cécile et Paul.

J'adresse mes remerciements à tous les thésards que j'ai pu côtoyer durant cette aventure tant les anciens que les nouveaux : Aurelie pour sa grande bonté, Guillaume, Paul, Claire, Matthieu, Othman, Sarah, Andreas, Lisa, Clément, Brahima, M'bisane, Corentin F. et Corentin C., Erwan. Je remercie Diego pour son soutien continu et nos échanges sur les "séminaires" et sur bien d'autres sujets.

Je tiens également à remercier Franck Colombel de m'avoir ouvert la porte sur Rennes et à mes enseignants qui ont suivi mes premiers pas à Rennes, Laurent, Stéphane, Mohamed, Régine.

À vous mes proches, Jérôme, Antoine, Jean-Félix, Dédé, Clarisse, Marianah, Candice, Melaine, Sefofo, je suis reconnaissant de vous avoir à mes côtés. Merci à celle qui m'a accompagné et soutenu durant ces années. Ta présence m'a réconforté et rassuré. Merci à la famille Humbert, Brun, De Poulpique et Berjot.

Enfin, à mes frères, Elpidio, Junior et Espoir (à qui je dois tout), à mes parents Monique

et Jean-Pierre, merci pour votre soutien sans faille. Je ne vous remercierai jamais assez.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près et de loin durant ce long parcours. Merci à vous tous.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	9
1 Contexte du projet	13
1.1 La mission SWOT	17
1.1.1 Définition	17
1.1.2 Capteurs embarqués	20
1.1.3 L'instrument Karin	21
1.2 Le concept SKIM	25
1.2.1 Définition	25
1.2.2 Caractéristiques	26
1.3 Écho radar	27
1.3.1 Généralités	27
1.3.2 Notion de surface équivalente radar (SER)	28
1.3.3 Effet Doppler	31
1.4 Les capteurs SWALIS et KaRADOc	32
1.4.1 SWALIS	32
1.4.2 KaRADOc	33
2 Description des capteurs	35
2.1 Capteur SWALIS	36
2.1.1 Description générale	36
2.1.2 Principes de mesure	38
2.1.3 Constitution du système SWALIS	49
2.2 Capteur KaRADOc	75
2.2.1 Description générale	75
2.2.2 Similitude SWALIS - KaRADOc	75
2.2.3 Particularité de KaRADOc	77

3	Traitements des données	81
3.1	Acquisition et format des données	83
3.1.1	Définition de la mesure	83
3.1.2	Caractéristique d'une rafale	84
3.2	Calibration des capteurs	85
3.2.1	Dispositif de mesure	86
3.2.2	Modèle de calibration	91
3.2.3	Opérations de calibration	94
3.3	Correction de la position de l'empreinte	102
3.3.1	Les angles d'attitude	102
3.3.2	Prise en compte des angles d'attitudes	103
3.3.3	Obtention de l'incidence locale réelle	108
3.4	Détermination de la valeur de σ_0	110
3.4.1	Estimation de la distance de visée	110
3.4.2	Calcul de l'aire	112
3.5	Définition et quantification des postes d'erreur	115
3.5.1	Équation radar et puissance reçue	115
3.5.2	Contribution des différents postes d'erreur	117
3.5.3	Quantification des postes d'erreur	119
3.5.4	Erreur sur la mesure de σ_0	131
4	Analyse des données collectées	135
4.1	Organisation des données	137
4.1.1	Organisation des données initiales (niveau L0)	137
4.1.2	Organisation des données traitées (niveau L1)	138
4.2	Concept SKIM - campagne SUMOS	142
4.2.1	Intégration du système KaRADOC	143
4.2.2	Mesure sur le site de Auch (vol du 11 février 2021)	143
4.3	Mission SWOT - campagne Marmande	146
4.3.1	Configuration de mesure	147
4.3.2	Discrimination et classement des mesures	151
4.3.3	Comparaison de la valeur de σ_0 pour différentes altitudes	154
4.3.4	Angles d'incidence et contraste terre-eau	158
4.4	Comparaison SWALIS/Sentinel-6	168

4.4.1	Données Sentinel-6 : radargramme de puissance	168
4.4.2	Positions SWALIS/Sentinel-6	172
4.4.3	Puissances SWALIS/Sentinel-6	173
Conclusion		179
	Résumé du projet de recherche	180
	Perspectives	182
A Les plates-formes de mesures		185
A.1	Introduction	185
A.1.1	Le plateau technique MERISE	185
A.1.2	Activités scientifiques	185
A.1.3	La Plate-forme PIMA	188
A.1.4	La Plate-forme SAFIRE	194
B Publications personnelles		196
Bibliographie		197

INTRODUCTION

La surface de la Terre, notre planète bleue, est couverte à 70,8 % par l'océan [1] ce qui représente 97,5 % d'eau de de la planète. L'océan intervient directement dans plusieurs secteurs des activités humaines tels que l'alimentation (les différents produit de la pêche), le transport, l'exploitation minière et le loisir. Il est la principale source d'eau qui s'évapore dans le cycle de l'eau. De plus, par la présence de différents courants, il joue le rôle de régulateur thermique de la planète. Depuis quelques décennies, nous assistons à une modification profonde de la constitution et du comportement de ces océans (citons, par exemple, la montée du niveau de ces océans [2] et cela constitue une menace pour certaines parties de la planète).

Sur cette surface de la Terre, se trouve aussi une ressource excessivement sensible qui est l'eau douce. Cette eau douce se trouve être la ressource la plus fondamentale pour l'existence de la population humaine. Contrairement à l'eau salée des océans, l'eau douce ne recouvre que 2,5 % de la surface terrestre [3] dont :

- plus de 69 % sont sous formes solides dans les glaciers et calottes polaires,
- plus de 30 % dans les profondeurs de la terre sous formes d'aquifères,
- moins de 1 % comme eaux de surfaces facile d'accès (lacs, rivières, zones d'inondation, marécages, ...).

L'usage de cette eau douce consommable se répartit dans les différentes activités humaines comme suit :

- agriculture 70 %,
- industries 22 %,
- utilisations domestiques 8 %.

L'eau douce accessible et consommable est donc une ressource essentielle, très limitée, mais aussi vulnérable à cause du réchauffement climatique. Il est nécessaire de recenser toutes les eaux douces de surface et connaître en temps réel les informations quantifiées et précises les concernant afin de mieux comprendre la dynamique de répartition de ces eaux douces.

À l'échelle planétaire, cette observation des eaux de la planète se fait par l'intermédiaire de familles de satellites à différentes échelles correspondant aux phases du cycle de l'eau :

- les altimètres nadir pour mesurer le niveau des océans procurant ainsi des informations sur la hausse de leur niveau :
 - série Jason 1, 2 et 3 [4]-[6],
 - Altika [7],
 - ENVISAT [8],
- les satellites pour mesurer l'évaporation et tout ce qui est relatif à l'humidité des surfaces :
 - SMOS [9] satellite pour la mesure de l'humidité du sol et de la salinité des océans opérant depuis plus d'une dizaine d'années [10],
 - TRISHNA [11], satellite franco-indien pour mesurer le stress hydrique des végétaux afin de permettre l'optimisation de l'irrigation agricole, la répartition et la consommation d'eau,
- les satellites pour mesurer les précipitations :
 - GPM [12], satellite issu de la collaboration en le japon et les états-unis d'amérique tout comme son prédécesseur du TRMM [13]
 - MEGHA-TROPIQUES [14], satellite franco-indien pour l'étude du cycles de l'eau,
- les satellites qui permettent de suivre le niveau des glaciers et calottes polaires :
 - ICESat 1 et 2 [15],
 - CryoSat-2 [16],
- les satellites gravimétriques qui permettent de fournir une information sur les nappes d'eau souterraines :
 - GRACE [17],
 - ...

Ces listes, non exhaustives, donnent un aperçu des différentes familles de satellites dédiées à l'étude de chacune des phases du cycles de l'eau.

Le travail lié à cette thèse a donc pour cadre la mesure de cette répartition et du comportement des eaux (océans et eaux continentales) à la surface de la Terre. Cette mesure est fondamentale afin de pouvoir fournir des informations permettant des synthèses sur l'évolution des systèmes à grande échelle [18].

Plus précisément, notre document de thèse présente un élément lié à la chaîne permettant de disposer de données satellitaires fiables. En effet, lors du choix d'une mission satellitaire, deux phases sont importantes et qui se situent en amont et en aval d'une mission satellitaire.

Dans une première phase, il s'agit de valider à une échelle raisonnable (temps et coût) les concepts qui sont proposés pour mesurer tel ou tel variable avec un satellite. Il s'agit de la phase amont. Lors de cette phase, une expérimentation, le plus souvent aéroportée, est proposée pour créer les conditions de mesure imaginées pour le satellite. Dans le cas d'une mesure radar, un système aéroporté est créé permettant cette mesure radar dans des conditions (fréquence, angle d'incidence, entre autres) proches de celles de la configuration géométrique du satellite. Les données alors mesurées doivent permettre de valider (ou d'invalidier) le concept imaginé pour la mesure d'un paramètre géophysique.

Dans une seconde phase, une fois que la mission satellitaire est conçue et que le satellite est envoyé dans l'espace, il s'agit de valider et de calibrer les données fournies par le satellite. Dans l'étape de validation, pour un satellite embarquant un capteur radar, le système radar aéroporté utilisé dans la phase amont, est à nouveau sollicité pour vérifier que les mesures effectuées par le satellite sont conformes avec la vérité terrain mesurée simultanément pendant le passage du radar satellitaire et du système radar aéroporté. Cette étape est plutôt considérée comme une étape de qualification. Dans le même temps, une opération de calibration est réalisée en confrontant quantitativement les données radar satellite, les données radar aéroportées et les données mesurées sur le terrain (données in-situ). Au besoin, des coefficients de calibration sont apportés aux mesures radar satellitaires afin de les faire correspondre aux données terrain en prenant comme référence la donnée radar aéroportée.

C'est dans ce cadre d'opérations de calibration/validation que le capteur SWALIS (*Still Water Low Incidence Scattering*) est développé et qui est le propos de notre travail de thèse. Ce capteur SWALIS est dédié à la mission spatiale SWOT pour la mesure de réflectivité. Au-delà, du développement de SWALIS, une extension est effectuée pour la réalisation du capteur KaRADOC (*Ka RADAR for Ocean measurements*) dans le cadre de la phase amont d'un concept de mesure de comportement des océans. Ce capteur KaRADOC est développé pour le concept SKIM afin de mesurer les courants de surface des océans.

Dans le chapitre 1, nous introduisons la mission SWOT *Surface Water and Ocean Topography* qui a pour but non seulement de recenser toutes les eaux de surfaces mais aussi de mesurer de manière régulière les différents changements qui les impactent. Nous évoquons aussi le concept SKIM *Sea Surface Kinematics Multiscale monitoring* qui est une proposition d'une mission satellitaire pour explorer les courants de surfaces et les spectres de vagues, impactant le bilan thermique des océans.

Le chapitre 2 décrit les capteurs développés par l'IETR (*Institut d'Électronique et des Technologies du numéRiques*) en collaboration avec le CNES (*Centre National d'Études Spatiales*). Dans ce chapitre, nous décrivons d'abord de manière générale le capteur SWALIS dont le point de fonctionnement se rapproche de celui de SWOT et qui concerne la mesure de réflectivité des zones eau. Nous voyons en détails les différents sous-systèmes qui composent le capteur SWALIS. Nous caractérisons sa chaîne d'émission et celle de réception. Nous décrivons également le capteur KaRADOC, système radar ayant la même architecture que SWALIS. Nous pointons leurs similitudes et la particularité de KaRADOC.

Les capteurs une fois décrits, le chapitre 3 s'attelle à la présentation des différents traitements mis en œuvre pour l'obtention du coefficient de rétrodiffusion (réflectivité). Dans cette optique, nous décrivons comment s'effectuent les acquisitions, la définition des configurations de mesures et la description des données brutes en sortie des capteurs. Ensuite nous montrons le protocole, puis les résultats de calibration des capteurs et aussi les estimations des erreurs pouvant entacher la mesure du coefficient de rétrodiffusion.

Enfin, dans le chapitre 4, nous présentons les données collectées lors de nos différentes campagnes de mesure effectuées avec les capteurs. Nous présentons succinctement les mesures faites avec le capteur KaRADOC dans le cadre de la campagne SUMOS et les phénomènes rencontrés mis en évidence. Nous présentons également et plus précisément, la campagne menée avec le capteur SWALIS au-dessus de la Garonne (Marmande, juillet 2022). Nous analysons les données de cette dernière dans le but de mettre en évidence le contraste terre-eau et l'indépendance du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la hauteur de mesure. Pour terminer ce chapitre, nous faisons également une comparaison qualitative et comportementale des données SWALIS avec celles du satellite Sentinel-6. Les données radar SWALIS sont aussi celles qui sont obtenues pendant la campagne Marmande 2022.

Ce mémoire de thèse se termine par une conclusion de l'ensemble des travaux portant sur l'élaboration de capteurs aéroportés ainsi que sur leurs performances et leur utilisation. À la suite, des perspectives sont dressées en vue d'une exploitation des capteurs mais aussi de l'amélioration des produits fournis.

CONTEXTE DU PROJET

Sommaire

1.1	La mission SWOT	17
1.1.1	Définition	17
1.1.1.1	Sigle et attendus	17
1.1.1.2	Apport de la mission SWOT	19
1.1.2	Capteurs embarqués	20
1.1.3	L'instrument Karin	21
1.1.3.1	Description	21
1.1.3.2	Caractéristiques	22
1.2	Le concept SKIM	25
1.2.1	Définition	25
1.2.2	Caractéristiques	26
1.3	Écho radar	27
1.3.1	Généralités	27
1.3.2	Notion de surface équivalente radar (SER)	28
1.3.2.1	Équation radar : cas d'une cible ponctuelle	28
1.3.2.2	Équation radar : cas d'une cible distribuée	28
1.3.3	Effet Doppler	31
1.4	Les capteurs SWALIS et KaRADOc	32
1.4.1	SWALIS	32
1.4.2	KaRADOc	33

Introduction

La télédétection (ou *Remote Sensing*) consiste en l’obtention des informations sur une cible (objet ponctuel ou non) située à une distance donnée, plus ou moins grande (sans interaction mécanique entre la cible et le capteur). Elle est utilisée pour l’observation tant terrestre qu’extra-terrestre afin d’étudier des phénomènes mesurables par les capteurs de télédétection. La nature de cette observation est multiple (visible, infra-rouge, etc).

Dans notre travail de thèse, le cadre des mesures est limité à la télédétection micro-onde (radar) et aux phénomènes associés. Ces phénomènes sont essentiellement liés aux interactions physiques entre les ondes et la matière et tiennent compte des caractéristiques de l’émission, la transmission, la diffusion, l’absorption et la réflexion. Les capteurs de télédétection micro-onde sont scindés en deux grandes classes (figure 1.1) à savoir :

- les capteurs de télédétection passifs appelés *radiomètres* (exemples : capteur SMMR sur Seasat [19] en 1978, TMI [20] en 1997, WindSat [21] en 2003, aquarius [22] en 2011, ...)
- les capteurs de télédétection actifs appelés *radar*.

La radiométrie est une télédétection passive dans le sens où les capteurs radiométriques ne comportent qu’une antenne et une chaîne de réception contrairement aux capteurs radar qui disposent en plus d’une chaîne d’émission d’ondes électromagnétiques. Ainsi faire de la radiométrie revient à faire l’acquisition des signaux provenant d’un rayonnement « naturel » (exemple des signaux cosmiques, du soleil pour les images optiques, ...).

Le radar (pour *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) a pour but premier de détecter la présence d’une cible, et d’estimer sa distance par le biais des ondes électromagnétiques comme l’indique l’acronyme. A l’origine, il a été développé pour la détection des navires en mer et fut extrêmement utilisé lors de la seconde guerre mondiale. Grâce aux progrès techniques de ces dernières décennies, le radar intervient maintenant dans plusieurs domaines comme l’automobile, la navigation, la géolocalisation, l’observation de la terre, l’agriculture, la météorologie, etc... De nouvelles applications ne cessent de voir le jour (exemple de Biomass [24] pour l’évaluation du volume global de la biomasse tropicale prévu pour 2024).

Les capteurs radar sont classés en deux grandes familles en fonction de leur type d’ouverture [23]. Nous distinguons :

- la famille des systèmes radar à ouverture réelle (RAR *Real Aperture Radar*) qui contient :

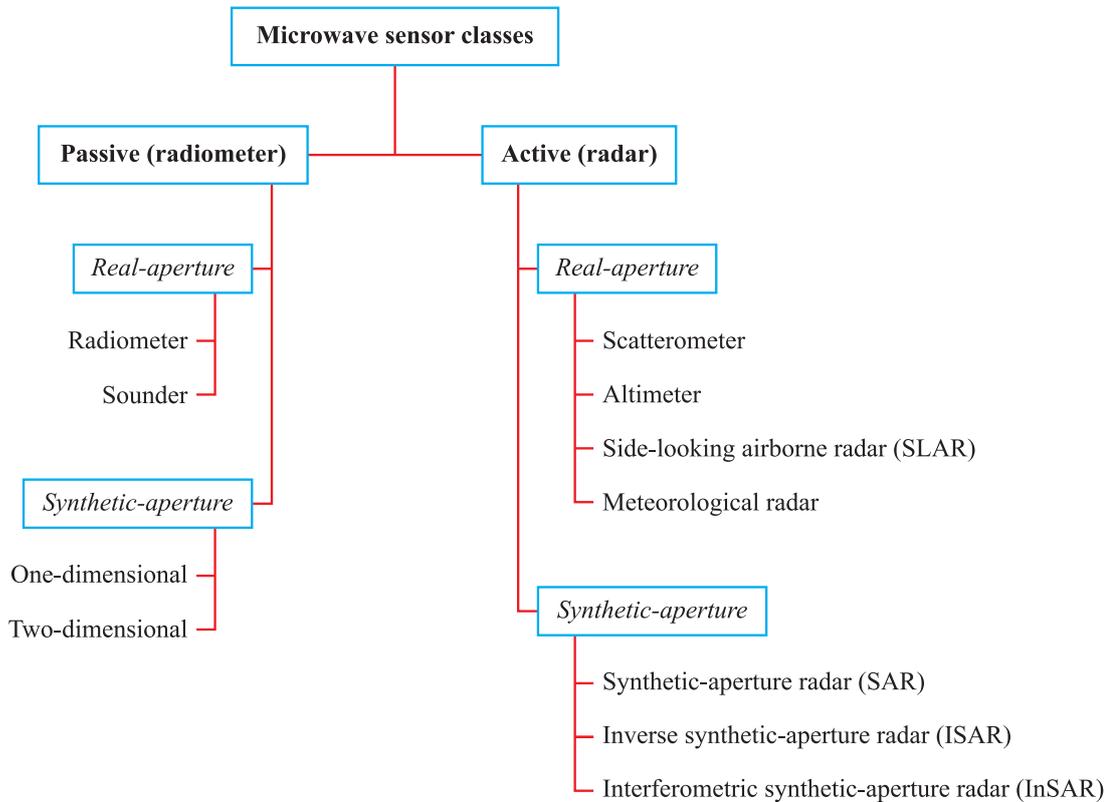


FIGURE 1.1 – Classes et sous classes de capteurs de télédétection [23]

- les diffusiomètres : NSCAT [25], SeaWinds [26], ESCAT[27], ASCAT [28]
- les altimètres : TOPEX/POSEIDON [29], SARAL/Altika [7], ENVISAT [8],
- les systèmes radar à visée latérale (*SLAR Side-Looking Airborne Radar*),
- les systèmes radar météorologiques,
- la famille des systèmes radar à synthèse d’ouverture (SAR *Synthetic Aperture Radar*) ou radar imageurs qui contient :
 - les systèmes radar à synthèse d’ouverture (SAR *Synthetic Aperture Radar*) : TerraSAR-X [30],
 - les systèmes radar à synthèse d’ouverture inverses (ISAR *Inverse Synthetic Aperture Radar*),
 - les systèmes radar à synthèse d’ouverture interférométriques (InSAR *Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

Il est à noter que l’avancée technologique permet de mettre en place des altimètres à synthèse d’ouverture et également des altimètres interférométrique.

Les systèmes radar utilisent une gamme variée de fréquences (figure 1.2). Elle s’étend

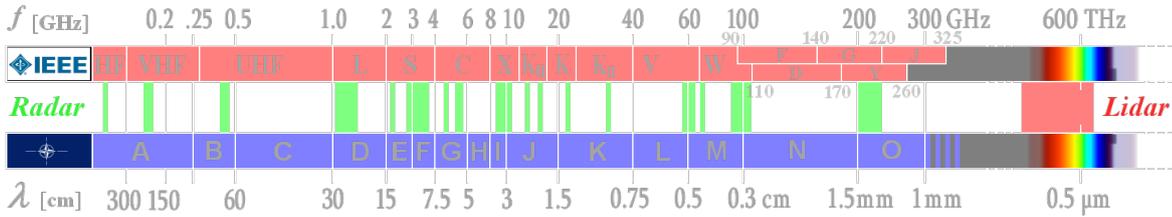


FIGURE 1.2 – Spectre électromagnétique (source : *www.radartutorial.eu*)

de 100 MHz à 300 GHz et subdivisée en bandes. Chaque bande est désignée par une lettre (bande X correspondant aux fréquences comprises entre 8 - 12 GHz comme le satellite allemand TerraSAR-X pour la télédétection radar [30] [31]) ou un ensemble de lettres (bande Ku correspondant aux fréquences comprises entre 12 - 18 GHz comme le satellite sino-français CFOSAT pour la mesure des vents et spectre de vagues océaniques [32]). Par convention, la télédétection **micro-onde** (radiomètre et radar) présente une plage de fréquences comprises entre 0,3 MHz et 300 GHz (soit une longueur d'onde comprise entre 1 m à 1 mm). Pour les applications spatiales, il faut prendre en compte l'atténuation atmosphérique (figure 1.3). Cette remarque est surtout valable pour les radiomètres, puisque en radar on utilise de la bande Ka (35 GHz) à la bande L (1 GHz). Ainsi, le choix est guidé par les compromis entre bande de fréquence autorisée, taille de l'antenne, puissance, . . . Trois grandes fenêtres se présentent alors pour les applications spatiales radar d'observation de la terre. L'application visée induit le choix de la bande de fréquences. Par exemple, dans [33]-[38], la plupart des études liées à la végétation se font principalement en bandes P ou L car les longueurs d'ondes correspondantes pénètrent mieux le couvert végétal. Dans ce chapitre, nous évoquerons succinctement dans une première partie les grandes missions, mais aussi les concepts qui ont motivé les travaux de cette thèse. Ainsi nous introduirons la mission spatiale SWOT (collaboration CNES et NASA), ses objectifs, son intérêt par la communauté scientifique et surtout la technologie innovante embarquée. Dans une seconde partie nous présenterons le concept SKIM (Collaboration CNES, IFREMER et ESA). Nous introduirons également quelques notions et grandeurs radar mesurables. Enfin, nous finirons ce chapitre en présentant les capteurs SWALIS et KaRADOC qui entrent en partie dans le processus de validation de SWOT en ce qui concerne SWALIS et de la préparation amont de SKIM pour KaRADOC.

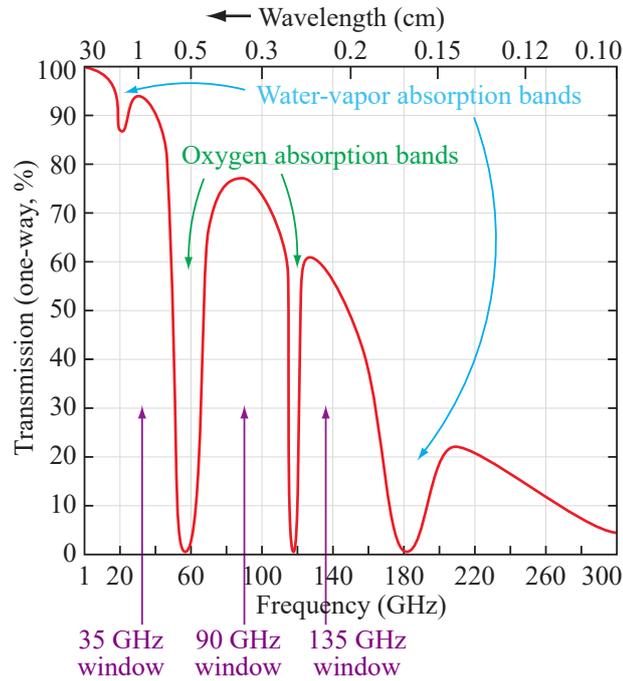


FIGURE 1.3 – Transmission (en pourcentage) à travers l’atmosphère terrestre suivant la direction verticale par temps clair (source : [23])

1.1 La mission SWOT

1.1.1 Définition

1.1.1.1 Sigle et attendus

La mission SWOT [39] [40] (figure 1.4) *Surface Water and Ocean Topography* est une mission altimétrique spatiale internationale impliquant la NASA *National Aeronautics and Space Administration* et le CNES *Centre National d’Études Spatiales* avec la participation de la CSA *Canadian Space Agency* et de la UKSA *UK Space Agency*.

La mission SWOT est lancée le 16 décembre 2022 pour une durée nominale de trois ans et sera sur une orbite longitudinale, d’inclinaison de 77.6° , de période 102.8 minutes, située à une altitude de 891 km. Son cycle de répétition est de 21 jours, comme illustré par la figure 1.5.

Comme son nom l’indique, la mission SWOT donnera une topographie des océans et eaux de surface jusque là très peu imagées par les satellites radar à cause de leur petite taille. Cette capacité est essentiellement attribuée à la visée de SWOT au proche-nadir.

La mission SWOT, comme toutes les missions de télédétection spatiale, embarquent

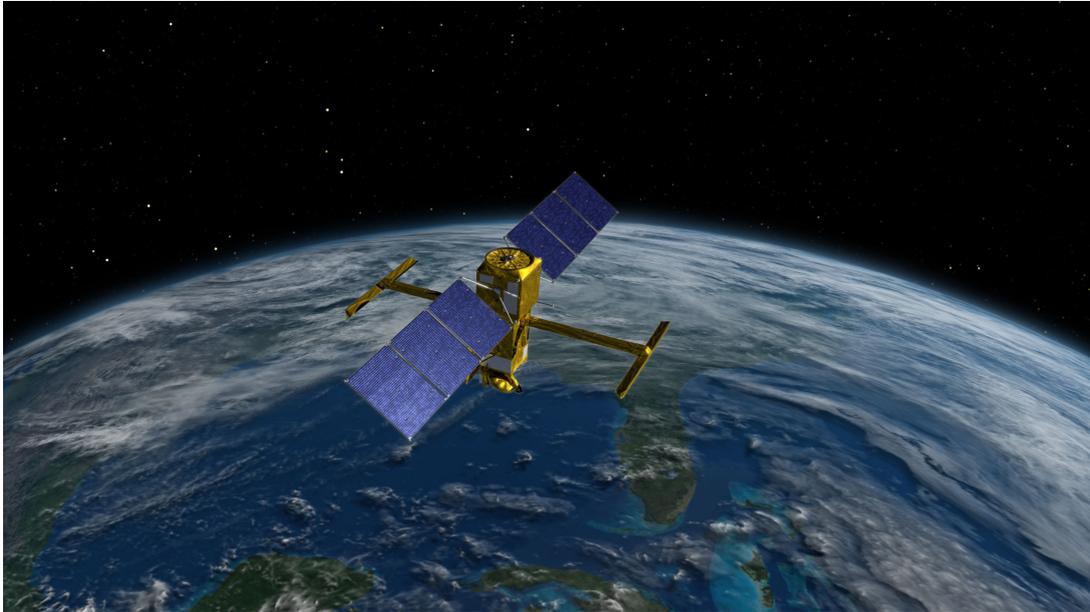


FIGURE 1.4 – Une vue d'artiste de SWOT (source : JPL/NASA)

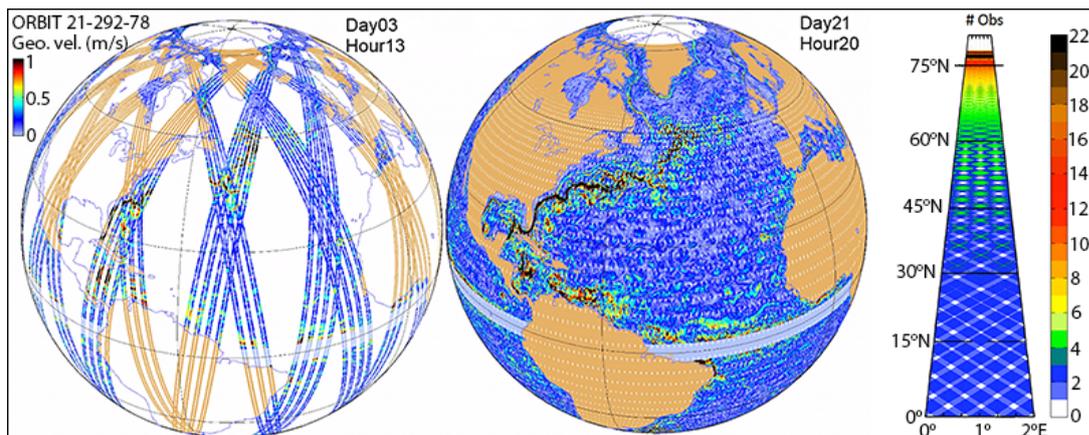


FIGURE 1.5 – Illustration de la couverture par cycle complet : partielle après trois jours (gauche) et totale après 21 jours (droite) (source : JPL/NASA)

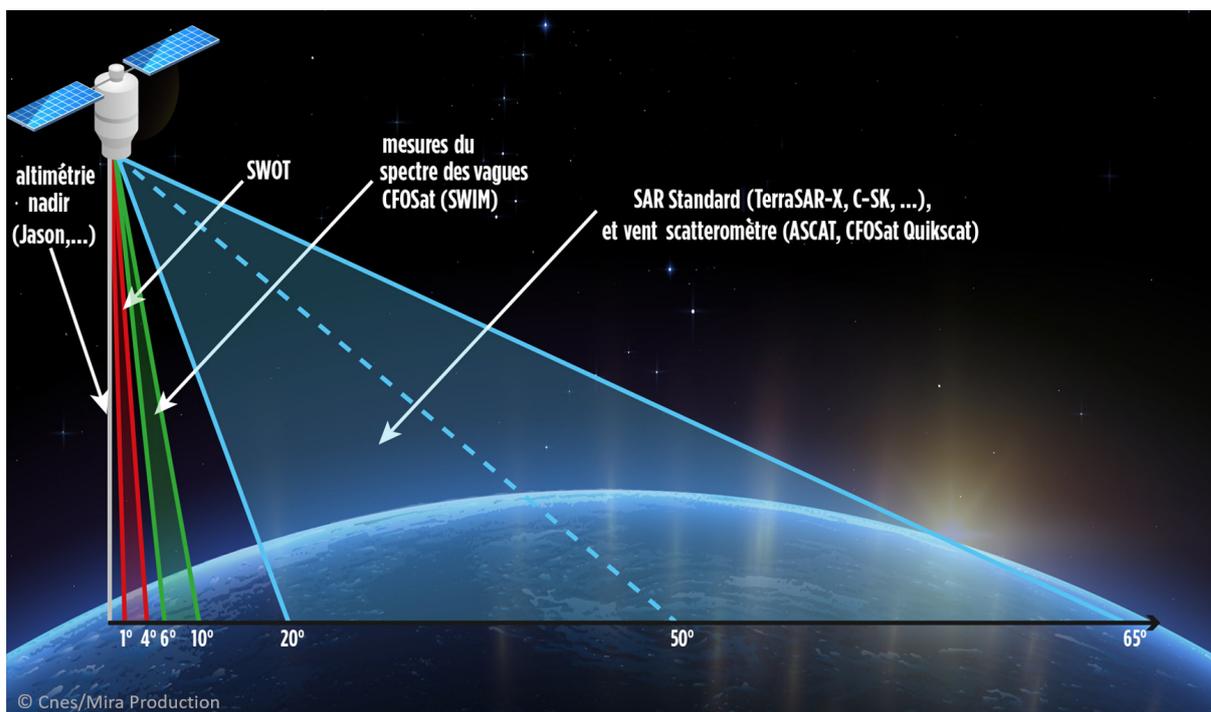


FIGURE 1.6 – Angles d’incidence SWOT comparés aux autres missions © Cnes/Mira Production

plusieurs instruments pour son fonctionnement nominal mais aussi pour d’autres champs d’activités scientifiques. Elle fournira les mesures suivantes :

- champs d’humidité atmosphérique,
- géodynamiques, magnétiques et de gravité,
- la topographie terrestre,
- l’hydrologie continentale,
- courants océaniques/topographie de l’océan,
- vents de surfaces océaniques,
- hauteurs et spectres de vagues océaniques.

Pour notre étude, nous nous intéressons aux applications d’hydrologie continentales essentiellement.

1.1.1.2 Apport de la mission SWOT

Une particularité de la mission SWOT est son fonctionnement autour des angles d’incidence très faibles avec une fauchée allant de 0,6° à 3,9°, comme l’illustre la figure 1.6.

Contrairement aux altimètres nadir dont l'incidence est quasi-nulle, SWOT a l'avantage d'avoir une plus large fauchée car l'angle de visée n'est pas nul. Cette fauchée demeure cependant faible comparée à celle des SAR conventionnels (voir figure 1.6).

Ainsi, grâce au traitement radar (compression d'impulsions) à faibles incidences, la mission SWOT propose une résolution spatiale (entre 10 mètres et 60 mètres dans l'axe distance) adaptée à l'hydrologie continentale et jusque là pas atteinte par satellite. La mission SWOT a donc pour objectifs de :

- faire l'inventaire de toutes les masses d'eaux terrestres de surfaces supérieures à 250 m² et les rivières de largeurs supérieures à 100 m,
- caractériser les mouvements océaniques et transfert d'énergie à méso-échelle avec des résolutions spatiales de 15 km,
- mesurer le changement de stockage global dans les masses d'eau de surface terrestres (pour les réservoirs artificiels, le stockage total) à des échelles de temps sous-mensuelles, saisonnières et annuelles,
- estimer le changement global du débit des rivières à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle.

Le capteur AirSWOT, une version aéroportée de la mission SWOT, conçu par la NASA, a permis avec ses résultats de reproduire avec précision l'élévation de la surface de l'eau le long des rivières et les variations spatiales de la pente pour les analyses hydrologiques et études de modélisation des inondations [41]-[43].

1.1.2 Capteurs embarqués

La mission SWOT, comme toutes missions de télédétection spatiales, embarquent plusieurs instruments pour son fonctionnement nominal mais aussi pour d'autres champs d'activités scientifiques. Elle embarque, selon le CEOS *Committee on Earth Observation Satellites* [44] :

- le radiomètre AMR-S - *AMR-S Two-Beam Microwave Radiometer* pour les mesures de champs d'humidité atmosphérique,
- l'instrument DORIS-NG *Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite-NG* pour la détermination précise de l'orbite, la détermination temps réel de l'orbite à bord (navigation avec une précision de 1 cm,
- l'instrument GPSP - *Global Positioning System Payload* pour la détermination précise de l'orbite,
- l'instrument LRA - *Laser Retroreflector Array* pour la détermination précise de



FIGURE 1.7 – Ensemble des instruments embarqués par la mission SWOT © TAS

- l'orbite et aussi pour la calibration des biais des altimètres,
- l'altimètre POSEIDON-3C pour faire de l'altimétrie nadir,
- l'instrument KaRIN - *Ka-band Radar interférometer*, à la pointe de la technologie, et qui est le capteur principal de la mission SWOT

La figure 1.7 illustre les différents instruments ci-dessus sur le satellite.

1.1.3 L'instrument Karin

1.1.3.1 Description

L'instrument KaRIN [45] [46] est un système radar interférométrique à synthèse d'ouverture (InSAR) fonctionnant en bande Ka. Les systèmes InSAR [23] sont des systèmes radar combinant les techniques radar d'imagerie 2D (SAR) et l'interférométrie afin de reconstruire une image 3D d'une scène. En effet, sur la figure 1.8 (illustrant le principe de l'interférométrie où $R_2 = R_1 + \Delta R$), il est à remarquer que les échos de tous les

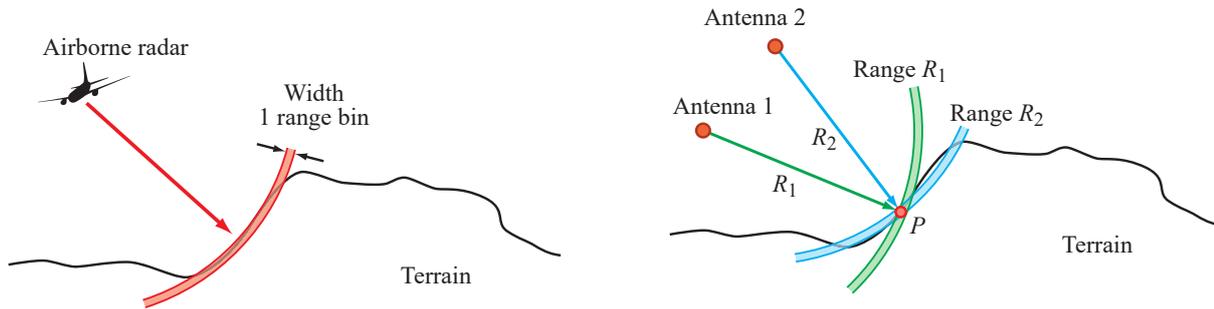


FIGURE 1.8 – Principe de l'interférométrie [23]

points de la pente montante du terrain parviennent en même temps au radar car situé à la même distance de l'antenne de réception. C'est l'illustration de la notion d'ambiguïté de la hauteur. Pour lever cette ambiguïté, on place une seconde antenne de réception à une distance de la première (appelée « baseline »). Même si les distances par rapport à la première antenne sont identiques, celles par rapport à la seconde antenne ne le sont pas. En analysant les deux données acquises, on peut déduire la variation de phase donc les discriminer et retrouver par la même occasion la variation de la hauteur entre les deux cibles. C'est ce principe qui est appliqué pour SWOT avec deux antennes de dimensions 5 mètres de long par 0,25 mètre de large, distantes de 10 mètres (« baseline ») en bande Ka de l'instrument KaRIN (figure 1.9). L'utilisation de la bande Ka permet de réduire la distance entre les deux antennes pour l'interférométrie.

1.1.3.2 Caractéristiques

L'antenne 2 (figure 1.10) émet des impulsions de manière alternée (de part et d'autre de la trace nadir) afin de produire deux images radar (obtenues avec le principe de radar à synthèse d'ouverture SAR largement décrit dans [47]) d'environ 50 km de large de part et d'autre de la trace nadir [46]. Les échos des impulsions pour une fauchée donnée sont captés par les antennes 1 et 2. Un traitement interférométrique de ces échos permet de dégager l'information sur la hauteur donnant ainsi la topographie de la surface illuminée. La fauchée est illuminée d'un côté en polarisation V et de l'autre côté en polarisation H afin de déterminer le côté vers lequel a pointé l'antenne d'émission [48].

La polarisation, correspond à l'orientation du champ électrique de l'onde émise, et peut être elliptique, circulaire ou linéaire (horizontale ou verticale) [49]. Toute polarisation peut être décomposée en une composante verticale et en une composante horizontale. Nous rappelons quelques paramètres essentiels de l'interféromètre KaRIN [48] :

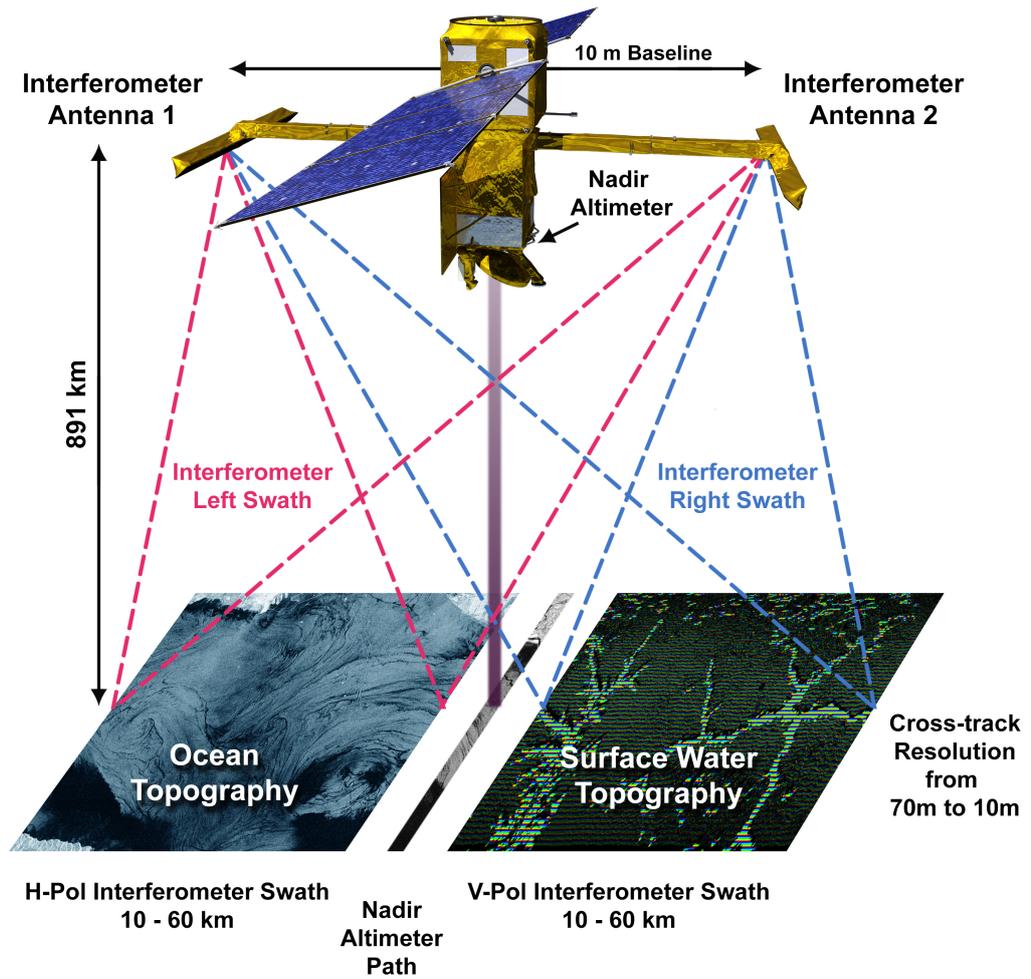


FIGURE 1.9 – Diagramme de collectes de données SWOT par les deux interféromètres et l'altimètre nadir [43]

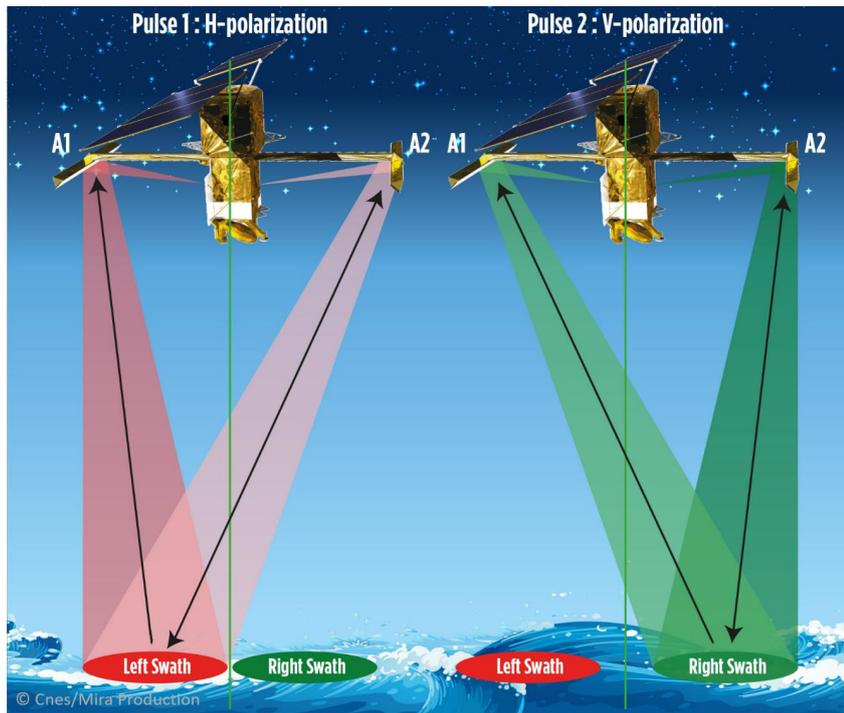


FIGURE 1.10 – Configuration d'émission de capteur KaRIn [48]

- Fréquence de la porteuse : 35,75 GHz
- Largeur de bande en émission : 200 MHz pour haute résolution dans la direction de visée,
- Durée du pulse émis : 4,5 μ s
- Fréquence de répétition des impulsions (*Pulse Repetition Frequency*, PRF) : 2 x 4420 Hz
- Longueur du mât : 10 m
- Taille des antennes : 5 m \times 0,25 m
- Angle de vue : 0,6° à 3,9° de part et d'autre du nadir

La taille du pixel de KaRIn, illustré à la figure 1.11 est de 2,5 mètres le long de la trace et varie de 60 à 10 mètres quand croit l'angle d'incidence. À faible angle d'incidence, la rétrodiffusion est spéculaire ou quasi-spéculaire favorable à la détection d'eau comme le montre Valenzuela dans [50].

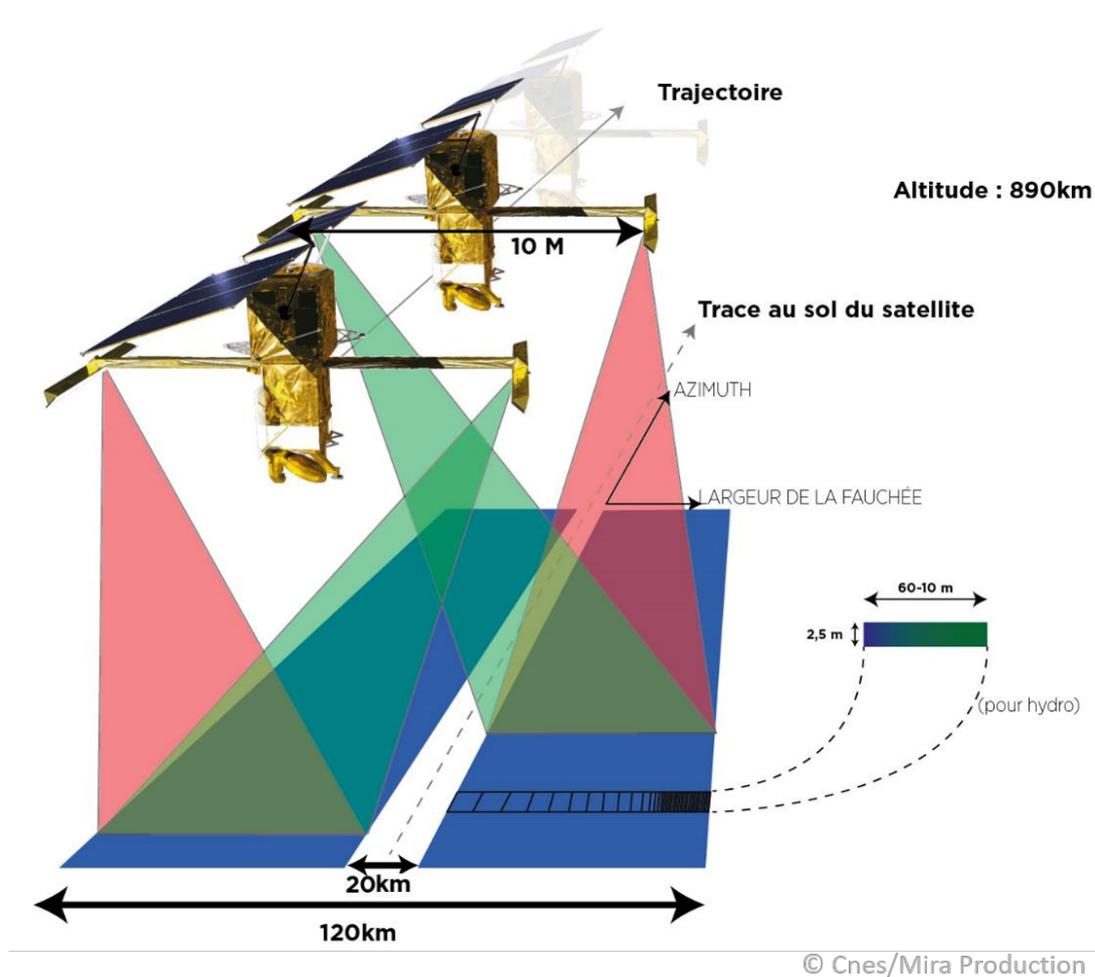


FIGURE 1.11 – Configuration d'émission de capteur KaRIn [48]

1.2 Le concept SKIM

1.2.1 Définition

Le concept SKIM *Sea surface Kinematics Multiscale monitoring* est une mission satellitaire émanant d'une proposition française du LOPS *Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale*, et est un nouveau radar multifaisceaux à large balayage, exploitant la bande Ka [51]. Elle est conçue pour explorer les courants de surfaces et de spectres de vagues. Cela inclut les courants tropicaux, notamment les modèles de divergence mal connus et leur impact sur le bilan thermique de l'océan, et la surveillance de l'Arctique émergeant jusqu'à 82,5°N. Le concept SKIM propose également des mesures directes des courants forts, des courants de frontière au courant circumpolaire antarctique, et de leur

interaction avec les vagues océaniques, avec des impacts attendus sur les flux air-mer et les vagues extrêmes. Pour la première fois, SKIM avait comme objectif de mesurer directement le vecteur de courant de surface de l’océan depuis l’espace [52] [53].

1.2.2 Caractéristiques

L’instrument principal de SKIM est un altimètre/diffusiomètre radar Doppler multi-faisceaux à balayage conique en bande Ka qui comprend un faisceau nadir de pointe (comparable à l’instrument Poseidon-4 de Sentinel 6 [54] [55]). La technique éprouvée du type « *Doppler pulse-pair* » [56] [57], donne une vitesse de dérive de surface représentative du mètre supérieur de l’océan, après avoir soustrait une importante contribution induite par les vagues. Les composantes horizontales de la vitesse seraient obtenues avec une précision supérieure à 7 cm/s pour des longueurs d’onde horizontales supérieures à 80 km et des résolutions temporelles supérieures à 15 jours, avec un temps de revisite moyen de 4 jours pour 99% des océans du globe. Cela fournirait des mesures uniques et innovantes et qui permettent de mieux comprendre les transports dans la couche supérieure de l’océan, distribuant en permanence la chaleur, le carbone, le plancton et les matières plastiques. Le concept SKIM bénéficierait également de mesures co-localisées de la vapeur d’eau, du taux de précipitation, de la concentration de la glace de mer et des vecteurs de vent fournis par le satellite opérationnel européen MetOp-SG(B) [58], permettant de nombreuses analyses conjointes.

Des campagnes de mesures ont été conduites pour valider le concept de SKIM [59]. Deux capteurs aéroportés, KuROS [60] [61] utilisé pour la calibration et validation du satellite CFOSAT en bande Ku et KaRADOC projet IETR/CNES dédié à SKIM, ont effectué des missions en collaboration avec l’IFREMER sur la plateforme SAFIRE *Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement* (voir annexe A.1.4), fournissant des données pour alimenter les modèles de simulations comportementales de surface de l’eau.

La proposition du concept SKIM fut l’une des deux missions satellites candidates développées pour l’ESA Earth Explorer 9. L’autre candidat était FORUM (Far infrared Radiation Understanding and Monitoring). La sélection finale a été annoncée en septembre 2019. Le concept FORUM [62] a été retenu et le principe de SKIM, vivement recommandé par le conseil de sélection, reste un principe fort pour le développement d’autres missions satellitaires exploitant le doppler des surfaces océaniques. En particulier, le principe ODYSEA [63] utilise cette notion de doppler pour retrouver des informations sur la dynamique

des océans dans un mode d'observation de type diffusiomètre (large incidence, moyenne résolution).

L'ensemble des missions et concepts décrits jusqu'à présent ne traite pas du phénomène d'interaction entre l'onde et la matière. Ce phénomène est maintenant abordé pour décrire les mécanismes de rétrodiffusion qui sont d'un intérêt primordial pour notre travail.

1.3 Écho radar

1.3.1 Généralités

Une onde électromagnétique de longueur d'onde λ_e émise à la puissance P_e est transmise par une antenne de gain G_e (figure 1.12) dans la direction d'une cible. Cette cible peut être ponctuelle (ou constituée d'un certain nombre de points brillants) ou étendue pour le cas d'une cible distribuée. La cible en question réfléchit l'onde incidente, et une

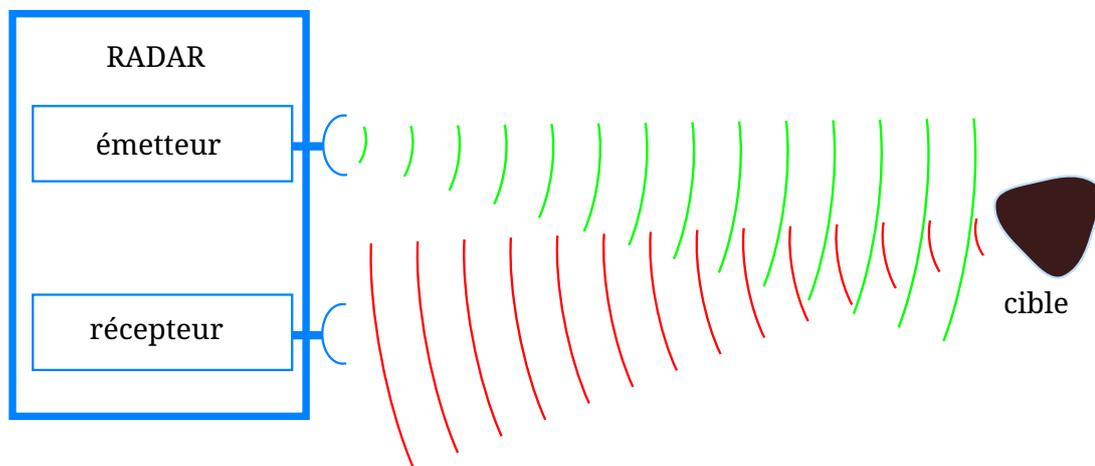


FIGURE 1.12 – Principe radar : onde émise (vert), onde réfléchie (rouge)

partie de cette onde réfléchie est captée par l'antenne de réception de gain G_r (figure 1.12). Les signaux de retour captés provenant d'une cible observée sont appelés échos. Le radar est dit monostatique si l'émetteur et le récepteur sont colocalisés et utilisent le même système antenne. Sinon la configuration radar est bistatique si l'émetteur et le récepteur sont éloignés l'un de l'autre.

1.3.2 Notion de surface équivalente radar (SER)

1.3.2.1 Équation radar : cas d'une cible ponctuelle

La puissance reçue à la sortie d'un récepteur radar, dans le cas de l'illumination d'une cible fixe située à une distance R est donnée par la formule [23] :

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r \lambda_e^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \sigma \quad (1.1)$$

La grandeur σ est la SER *Surface Équivalente Radar* (ou RCS *Radar Cross Section*) et caractérise la réponse électromagnétique de la cible. La SER est liée à la géométrie de la cible (taille, forme, orientation), à sa composition (matériau, texture, etc...), à la longueur d'onde incidente et aussi à l'angle de visée. La SER d'un objet correspond à la fraction de puissance rayonnée par cet objet après avoir été illuminé par une onde électromagnétique incidente. Ainsi la SER peut être considérée comme la signature radar d'un objet (figure 1.13). La grandeur L désigne l'ensemble des pertes provenant du milieu de propagation et du récepteur. Il est à noter que le signal à la sortie d'un récepteur peut être décrit par son amplitude (détection d'enveloppe) ou par une partie dite en phase et une autre en quadrature. Dans ce cas, il est possible de construire le signal reçu sur la forme d'une grandeur complexe : le carré du module de cette grandeur définit la puissance et son argument donne la phase.

1.3.2.2 Équation radar : cas d'une cible distribuée

Pour une cible distribuée, la notion de SER est remplacée par la SERN (Surface Équivalente Radar Normalisée) (ou NRCS pour *Normalized Radar Cross Section*). Cette grandeur est assimilée à un coefficient de rétrodiffusion noté σ_0 . C'est donc la SER d'une zone donnée normalisée par l'aire A de cette zone.

$$\sigma_0 = \frac{1}{A} \langle \sigma \rangle \quad (1.2)$$

où $\langle . \rangle$ désigne l'opérateur « moyenne ». La puissance reçue est donc la moyenne intégrée de puissance rétrodiffusée par élément de surface dA et s'écrit comme suit :

$$P_r = \iint_A \frac{P_e G_e G_r \lambda_e^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \sigma_0 dA \quad (1.3)$$

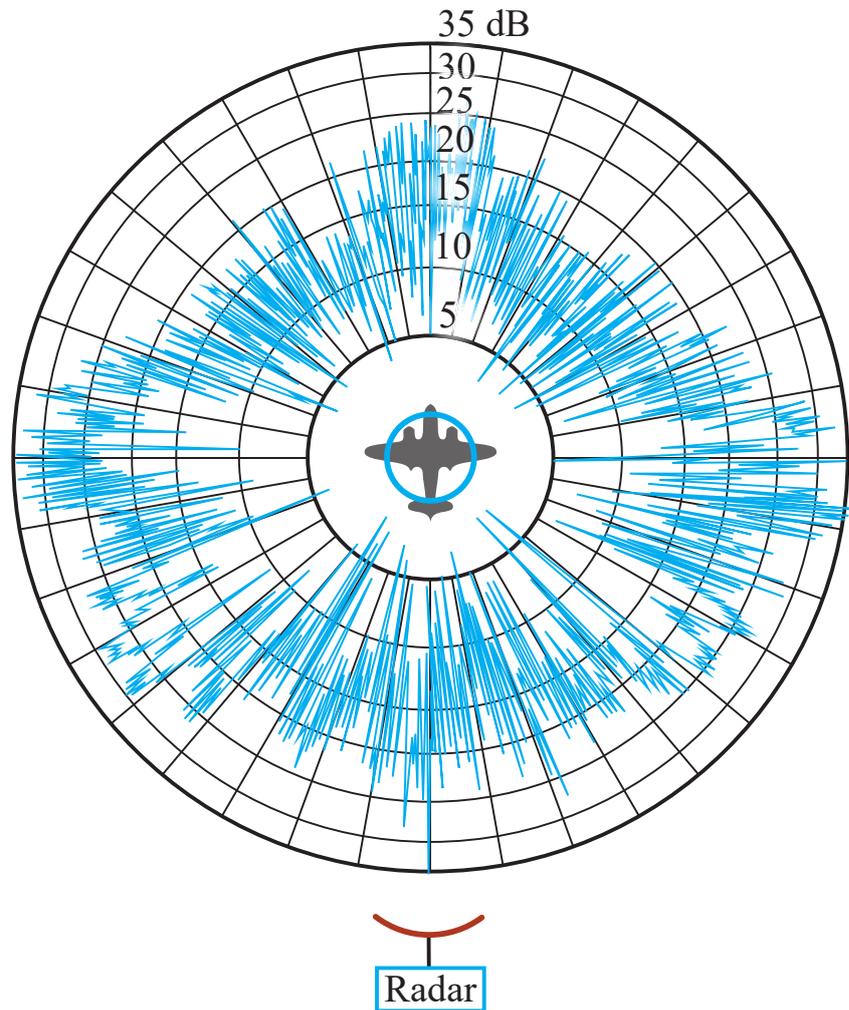


FIGURE 1.13 – Notion de SER : mesure de diagramme azimutal du signal rétrodiffusé par un avion B-26 à 10 cm de longueur d’onde [23])

La figure 1.14 illustre les différents scénarios entre différents angles d’incidence et différents états de surface. Le coefficient de rétrodiffusion permet donc d’avoir une idée de l’état de surface (lié essentiellement aux vent pour les océans et lacs, et aussi à l’écoulement dans le cas des rivières) et de la mesurer. Ainsi, il est possible de déduire les vents à la surfaces par des modèles existants. En bande Ka, la mesure du coefficient de rétrodiffusion σ_0 est peu documentée pour les études de la rugosité des surfaces d’eau générée par le vent [64]-[69] comparée à celle en bande Ku (données SeaWinds [26], C (données ESCAT [27]), X [70], surtout pour l’hydrologie continentale.

Toutefois, dans le cadre de la mission SWOT, quelques études ont permis d’avoir le profil σ_0 à faibles angles d’incidence et ont également permis de tester des modèles de

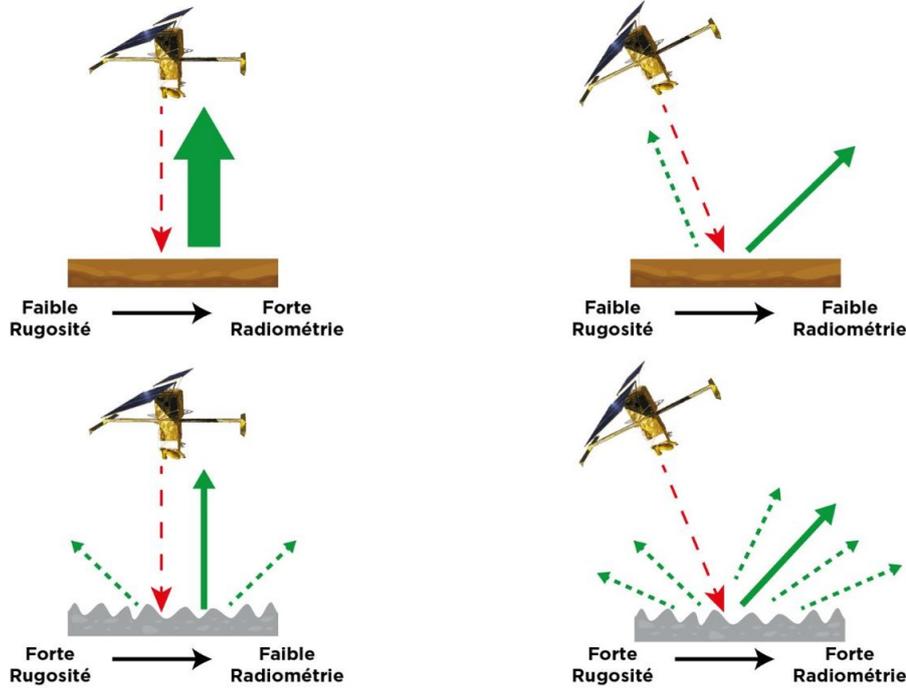


FIGURE 1.14 – Aperçu de la réflectivité en fonction de l’état de la surface (lisse ou rugueuse) et de l’angle d’incidence [48].

rétrodiffusion dans ces conditions.

Dans cette optique, le système DRIVE/BUSARD (BUSARD est un motoplanneur et DRIVE est un SAR bistatique en bande Ka avec une configuration de baseline variable) réalise, en condition proche-nadir, les premières acquisitions interférométriques en bande Ka [46]. Sur les images acquises, le contraste terre(champ)-eau du σ_0 est très élevé, typiquement de 10 à 20 dB et augmenté de 5 dB entre la végétation (arbres) et l’eau. Nous retrouvons également dans cette étude, des mesures en bande Ka, indoor en champ proche, faite au LASIF (*Large Air-Sea Interaction Facility*) à Luminy en France, à des angles d’incidence compris en 0° et 7° , avec des vitesses de vent allant de 0 à 10 m/s. Ces mesures permettent d’établir des profils σ_0 suivant les conditions de vents et d’angles d’incidences précités. Par exemple, pour un vent de 4 m/s, la valeur de σ_0 décroît de 18 dB à 8 dB pour un angle d’incidence allant de 0° à 7° . Ces profils de σ_0 sont décrits par Nouguiet et al. dans [71], pour les surfaces océaniques et basés sur les données de la mission GPM (*Global Precipitation Measurement*).

De même, l’étude décrite dans [72] combinant les observations dans un grand bassin

à vent et la modélisation de la diffusion radar en bande Ka à partir de la surface de l'eau, propose une analyse électromagnétique très détaillée des océans et lacs pour cette gamme de fréquence. Cette mesure en bassin permet de définir également un profil du coefficient de rétrodiffusion σ_0 . Par exemple, pour un vent de 3 m/s, la valeur de σ_0 décroît de 19 dB à 10 dB pour un angle d'incidence allant de 0° à 10° . Ainsi, partant donc d'expériences bien contrôlées (en particulier, bonne maîtrise de la mesure dans le bassin) et de modèles physiques, une description appropriée des propriétés statistiques de la rugosité de la surface de l'eau à petite échelle et de la rétrodiffusion radar est proposé. Un modèle empirique de spectre de vagues (combiné avec les modèles de diffusion de l'optique physique *PO* et de l'optique géométrique *GO* et *GO4* [73]) pour les vagues gravitationnelles et capillaires est alors utilisé en entrée d'un modèle électromagnétique pour simuler la réponse en σ_0 .

1.3.3 Effet Doppler

L'effet Doppler est le décalage fréquentiel f_D dû à un déplacement (rapprochement ou éloignement) radial de la cible ou de la scène à une vitesse radiale v_r . Ainsi il est aisé de retrouver la vitesse de la cible quand ce décalage Doppler est mesuré par la formule :

$$v_r = \frac{\lambda_e f_D}{2}$$

où $\lambda_e = c/f_e$ est la longueur d'onde émise qui peut varier en fonction du temps et en fonction du type de modulation du signal émis. Ce décalage Doppler se retrouve en étudiant la variation de la fréquence instantanée f_i qui est une dérivée la phase Φ :

$$f_i(t) = f_e(t) + f_D(t) = \frac{d\Phi(i)}{dt}$$

Une autre méthode utilise la différence de phase entre de deux impulsions reçues consécutives [74] comme illustrée sur la figure 1.15. Cette dernière méthode est appelée la méthode « Doppler Pulse-Pair (DPP) ». Dans le cadre d'un radar fixe, la vitesse déterminée est uniquement celle de la scène. A l'inverse, quand le radar est mobile (embarqué sur un porteur), il faut estimer et prendre en compte la composante radiale de la vitesse du porteur ; ce qui devient très compliqué si l'on ne dispose pas de l'information de la vitesse du porteur d'une impulsion à l'autre.

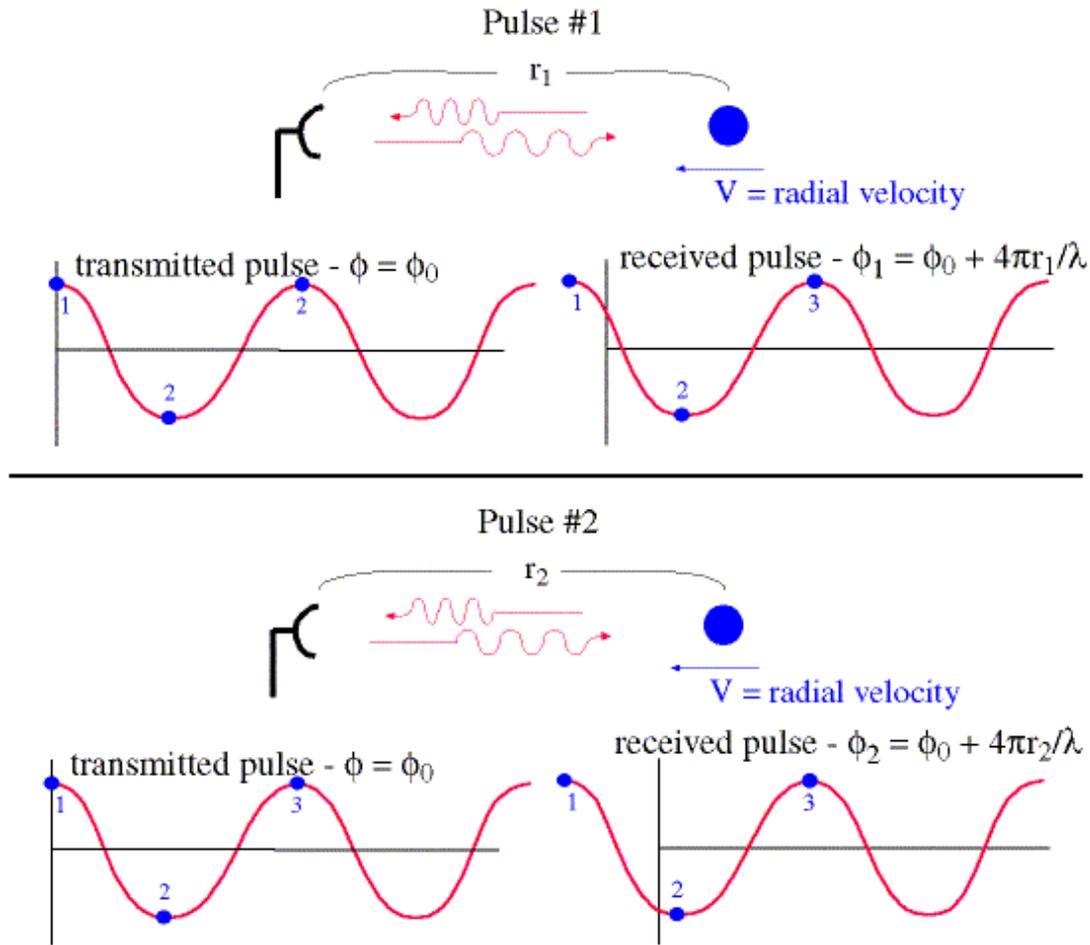


FIGURE 1.15 – Illustration de la méthode du Doppler Pulse-Pair (source : [74])

1.4 Les capteurs SWALIS et KaRADOC

Deux capteurs radars aéroportés sont développés par l' IETR (Institut d'Électronique et des Technologies du numérique) en collaboration avec le CNES dans le cadre des missions évoquées aux sections 1.1 et 1.2 : les capteurs SWALIS (*Still Water Low Incidence Scattering*) pour les configurations SWOT et KaRADOC (*Ka RADar for Ocean Current*) pour celle de SKIM. Ces capteurs font l'objet du travail de cette thèse.

1.4.1 SWALIS

Le système SWALIS a pour but premier d'alimenter les simulateurs et analyses de performances en données les plus représentatives des terrains d'expérimentation dans le cadre de la mission SWOT. Il faut donc associer les mesures radar à des données précises

des paramètres physiques des zones illuminées dans les conditions similaires à celles de l'instrument spatial. Le capteur SWALIS doit donc :

- opérer en bande Ka,
- faire des acquisitions à faibles angles d'incidence (proche nadir) comme SWOT,
- fournir des mesures de rétrodiffusion σ_0 des zones illuminées.

Les conditions de mesures visées sont liées à des cas de non homogénéités de rugosité de surfaces hydrologiques, à des cas de « dark water » (voir ci-après) pour les gammes d'incidence de SWOT, à des cas de contrastes de rétrodiffusion entre l'eau et les berges et à des cas de zones humides (milieux partiellement couverts). Le phénomène de « dark water » apparaît quand la surface de l'eau est tellement lisse (aucune rugosité c'est à dire pas de vent), au point qu'elle se comporte comme un miroir. Ainsi la totalité du champ incident est réfléchi dans la direction « opposée » à celle du champ incident. Le point important est d'obtenir des mesures simultanées (ou quasi-simultanées) au nadir et à faible incidence pour des surfaces très spéculaires. Le capteur doit survoler plusieurs zones afin d'étudier et d'analyser finement les phénomènes physiques observables. Les principaux types d'études attendues pour SWALIS sont les suivantes :

- étude des cas de *Dark Water* : survol des plans d'eau par vent calme (< 3 à 4 m/s) voire par absence de vent. Ces zones seront interprétées comme une absence d'eau et ce qui est problématique pour les processus automatique de détection de l'eau,
- étude des berges et milieux partiellement inondés permettant d'évaluer le contraste en σ_0 entre eaux et berges.

Il est à noter que SWALIS se concentre essentiellement sur l'hydrologie continentale : fleuve, retenue d'eau, etc. À partir de la dynamique attendue de la mesure, il est possible de mesurer des rétrodiffusions des zones autres que les surfaces d'eau et les berges. Avec la connaissance de la géométrie de mesure, il est aussi possible de développer des traitements permettant d'extraire les hauteurs des zones survolées, dans les cas d'incidence au nadir comme dans les cas d'incidence faible.

Le capteur SWALIS, embarqué sur PIMA (voir A.1.3) sera utilisé dans le cadre de la mission SWOT dans le processus de validation et aussi dans d'autres projets de mesure de rétrodiffusion en bande Ka.

1.4.2 KaRADOC

Tout comme le capteur SWALIS, le capteur KaRADOC opère en bande Ka et réalise des mesures de rétrodiffusion. Il a été conçu dans le cadre de la mission SKIM et

se concentre essentiellement sur la mesure des surfaces des mers et océans. Le capteur KaRADOC opère à des angles plus élevés d'incidences locales (autour de la valeur de 10°) et il est embarqué sur la plateforme ATR-42 (voir A.1.4).

Les mesures effectuées avec le système KaRADOC sont basées sur un traitement dit *pulse pair* et ont pour objectif la connaissance de la rétrodiffusion des surfaces de l'océan (vagues, houles, courant). Ces mesures sont des données incontournables pouvant renseigner sur les états de surface de mer et évolutions des courants sur le long terme.

Conclusion

Dans le contexte climatologique actuel il est très important de suivre avec précision les phénomènes liés aux différentes réserves d'eaux dont dispose la planète (océans, fleuves, lacs et autres retenues d'eaux). Ces réserves ont, en partie, pour fonction la régulation de la température de la planète.

Due à la grande taille des pixels de la plupart des satellites imageurs qui orbitent autour de la terre, l'investigation de l'hydrologie continentale a souvent été moins approfondie en comparaison de l'étude des océans.

La mission SWOT embarque l'interféromètre KaRIN pouvant apporter une très bonne résolution spatiale et permettant d'imager une grande partie des lacs et fleuves terrestres de moindres dimensions jusqu'à présent indiscernables par des missions satellitaires précédentes. Cette mission permettra de produire des données sur ces zones, permettant ainsi d'alimenter des bases de données, de faire évoluer les modèles de rétrodiffusion et de faire une analyse plus fine des débits de cours d'eaux terrestres.

Nous avons brièvement introduit les capteurs SWALIS et KaRADOC. Ces deux capteurs font l'objet d'une description technique plus affinée dans le chapitre 2.

DESCRIPTION DES CAPTEURS

Sommaire

2.1	Capteur SWALIS	36
2.1.1	Description générale	36
2.1.2	Principes de mesure	38
2.1.2.1	Description des paramètres géométriques	39
2.1.2.2	Description des paramètres d'acquisition	40
2.1.2.3	Simulation des traces au sol	42
2.1.2.4	Acquisition des données	46
2.1.3	Constitution du système SWALIS	49
2.1.3.1	Ensemble antennaire	50
2.1.3.2	Segment RF	62
2.1.3.3	Système d'acquisition	66
2.1.3.4	Autres équipements	71
2.2	Capteur KaRADOc	75
2.2.1	Description générale	75
2.2.2	Similitude SWALIS - KaRADOc	75
2.2.3	Particularité de KaRADOc	77
2.2.3.1	Segment RF	77
2.2.3.2	Utilisation de l'antenne dans le cadre de KaRADOc	78

Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons les éléments entrants dans la constitution du banc de mesure SWALIS. Ce radar doit apporter des mesures de référence pour la mission SWOT et en particulier pour les mesures de σ_0 . Ce chapitre est composé de plusieurs parties.

Dans un premier temps, nous revenons sur le cahier des charges [75], [76] qui a permis d'établir le système et donnons un aperçu général de SWALIS. Ensuite, nous décrivons le principe de mesure du système d'acquisition et déterminons exactement les traces au sol de l'antenne à partir des caractéristiques de vol, d'enregistrement et du capteur SWALIS. Ces simulations sont paramétrables et rendent compte de l'évolution de l'éclairement au sol en fonction du temps et des différentes configurations de mesure. Puis, nous abordons la description du système SWALIS en débutant par la partie antenne pour ensuite décrire le segment radio-fréquence et enfin la partie création de la forme d'onde ainsi que l'acquisition du signal reçu. L'ensemble de ces éléments est abordé sous l'angle de ses performances. Pour terminer, les autres parties de SWALIS nécessaires au fonctionnement optimal du capteur sont aussi décrites et analysées.

Pour le capteur KaRADOC, le principe est très proche de celui de SWALIS mis à part le besoin de mesurer une fréquence Doppler et donc de s'assurer d'un rapport signal à bruit suffisant pour l'extraction de la variation de phase. Les éléments qui diffèrent sont les angles d'incidence locaux ainsi que la partie émission/réception du segment radiofréquence.

2.1 Capteur SWALIS

2.1.1 Description générale

Le choix de la structure du système SWALIS [77] comme décrit à la section 1.4.1, est effectué pour fournir des données représentatives de terrains d'expérimentation dans le cadre de la mission SWOT (essentiellement des données liées aux valeurs de σ_0). Pour cela il doit opérer dans les conditions quasi-similaires à SWOT à savoir :

- assurer des mesures aéroportées tout en assurant de manière électronique une modification du dépointage de l'antenne radar bande Ka en configuration proche nadir (de 0° à 4°) pour l'étude des océans et hydrologie continentale,
- effectuer des mesures d'ondes réfléchies et les associer à une surface de rétrodiffusion (position et surface effective).

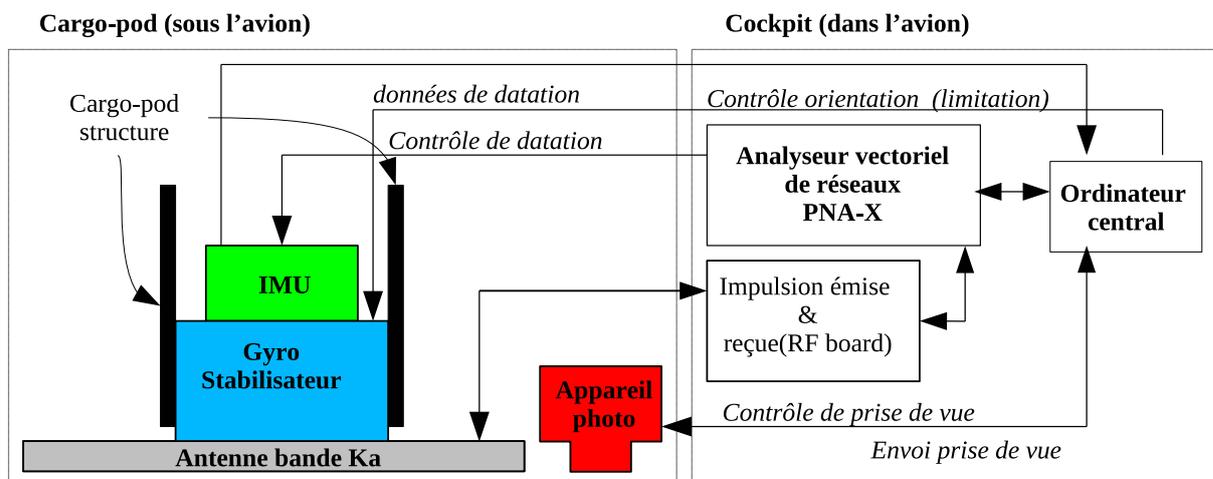


FIGURE 2.1 – Description générale : vue d'ensemble sur les éléments formant le système SWALIS et leur agencement sur PIMA.

De plus, le système SWALIS est un capteur destiné à être embarqué sur une plateforme aéroportée. Dans notre cadre de travail, cette plateforme est PIMA et décrite à l'annexe A.1.3. Nous décidons donc de partager le système SWALIS en deux parties principales :

- une partie située dans le cargo-pod au dessous de l'aéronef et qui embarque l'antenne et les composants liés à l'antenne à savoir :
 - une nacelle stabilisatrice permettant de maintenir une stabilité horizontale de l'antenne afin de compenser les mouvements du porteur,
 - une centrale inertielle (IMU) fournissant les données positions et attitudes de l'antenne,
 - un appareil photo permettant l'acquisition d'une image optique de la scène survolée à intervalle de temps régulier pendant le vol.
- une partie située dans la cabine de l'aéronef et qui embarque le segment radiofréquence (RF) émission/réception du système ainsi que les commandes de synchronisation des différents éléments du segment RF. De plus, nous associons au segment RF :
 - un analyseur vectoriel de réseaux codifiant les formes d'onde émises, leurs fréquences et puissances ainsi que l'échantillonnage et stockage des signaux reçus,
 - un organe de commande central sous la forme d'un PC/tablette d'expérimentation et permettant de contrôler les paramètres de configuration de l'analyseur de réseaux ainsi que les données de datation de la centrale inertielle.

La figure 2.1 propose cette description globale du système. Comme indiqué, la gestion

des différents éléments de SWALIS s’effectue avec un ordinateur central en parallèle avec l’analyseur de réseaux. Une application (SWALIS) ¹ a été développée et permet d’effectuer

1. le choix des configurations de chaque mesure radar,
2. la gestion des différents organes du système SWALIS,
3. l’enregistrement des données radar (sur disque dur interne).

Cet ordinateur central gère aussi les fonctions de commande suivants :

- envoi à la centrale inertielle de la commande de récupération des données d’attitude de la nacelle stabilisatrice,
- de manière synchrone, transmission d’un ordre de prise de vue à un appareil photo.

Il faut noter que cet appareil photo est solidaire du cargo-pod et suit donc les attitudes de l’avion.

Nous allons maintenant décrire plus précisément chaque élément du système SWALIS décrit sur la figure 2.1 et qui permettent l’acquisition de données radar liées à la rétrodiffusion des zones éclairées. Dans un premier temps, nous donnons les grands principes de mesure et les paramètres d’acquisition associés à ces mesures.

2.1.2 Principes de mesure

Dans cette partie, nous décrivons les différents paramètres d’acquisition et leurs influences sur la physique de l’acquisition pour permettre de les configurer au mieux en fonction des zones qui sont illuminées. En début de projet, ces paramètres de mesures ont été établis afin que SWALIS fasse des mesures dans des conditions aussi proches que celle de SWOT.

Les performances attendues du système d’acquisition sont d’avoir une trace au sol de la zone illuminée par l’antenne entre 10 m et 20 m (qui correspond environ à la taille du pixel des images SWOT [46]). Pour ce travail, nous fixons l’objectif à 10 m de trace au sol, ce qui correspond à un angle d’ouverture de l’antenne d’environ 1° pour une altitude du porteur d’environ 500 m. Ce sont les ordres de grandeur que nous choisissons. Un autre paramètre correspond au balayage dans l’axe distance de la surface éclairée. Ce balayage est assuré par un dépointage du diagramme de l’antenne durant le vol et qui est obtenu avec l’utilisation d’une antenne à fente (« leaky-wave antenna » [78]) alimentée par un signal dont la bande de fréquence permet ce dépointage. Nous proposons des simulations

1. Application informatique et permettant de gérer par l’intermédiaire d’interfaces graphiques le capteur SWALIS ; application déployée l’équipe POLARIS de l’IETR

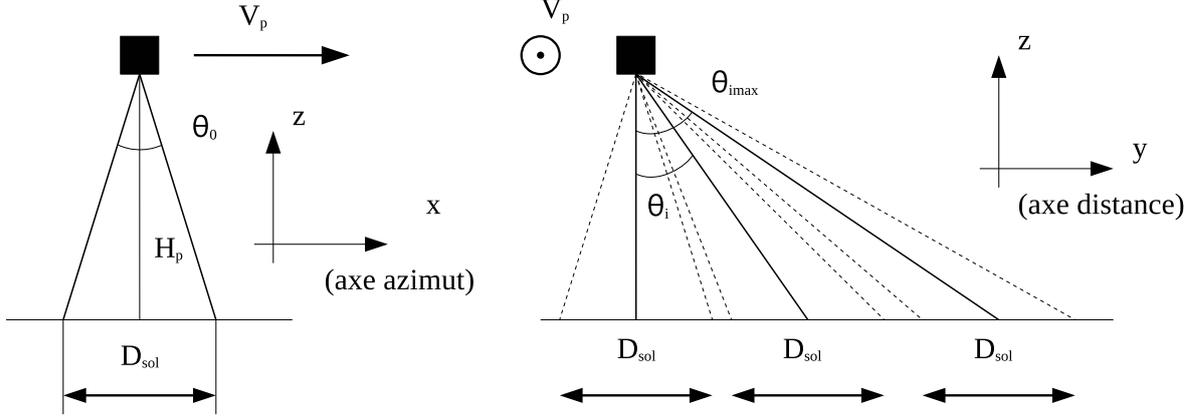


FIGURE 2.2 – Géométrie de prise de vue : ouverture, trace au sol et dépointage

de traces au sol de l'antenne en fonction des paramètres de vols. Nous développons deux approches des contraintes et paramètres du système : approche temporelle et approche volume de données.

2.1.2.1 Description des paramètres géométriques

L'évolution temporelle et la taille des traces au sol de l'antenne dépendent d'abord des paramètres géométriques. Nous simulons ici ces traces au sol en tenant compte des différents paramètres géométriques liés à l'acquisition (voir figure 2.2) :

- la hauteur du porteur H_p ,
- l'angle d'ouverture de l'antenne (à 3 dB) θ_0 ,
- la variation d'angle d'incidence θ_i (pas de dépointage selon l'axe distance (Ox)),
- le nombre N_i d'angles en incidence selon l'axe distance (Oy),
- l'incidence maximale $\theta_{i_{\max}}$ souhaitée pour la mesure.

La géométrie induite par ces paramètres ainsi que la vitesse du porteur V_p est décrite sur la figure 2.2. Nous pouvons donc décrire les formulations nous permettant d'obtenir la trace au sol au nadir.

$$D_{\text{sol}} = 2 H_p \tan \left(\frac{\theta_0}{2} \right)$$

Dans notre configuration, les angles d'incidence sont faibles et nous considérons que les traces au sol pour les angles θ_i sont identiques à celle du nadir. Nous avons alors pour le pas de dépointage

$$\theta_i = \frac{\theta_{i_{\max}}}{N_i}$$

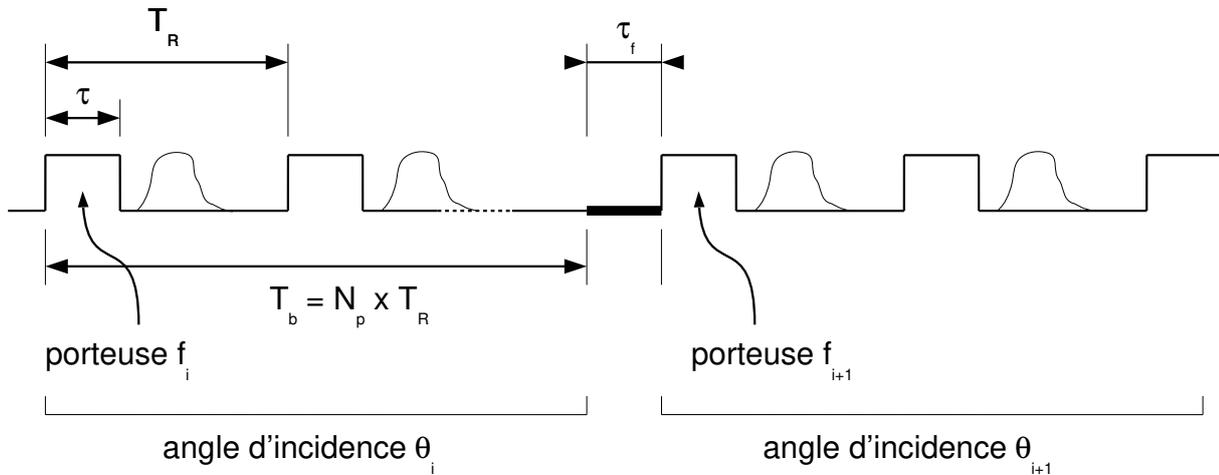


FIGURE 2.3 – Forme d'onde : impulsion, salve et fréquence porteuse d'émission

Il est donc utile de décrire l'évolution du porteur défini par sa vitesse V_p le long d'une trajectoire parfaitement rectiligne et le rythme d'évolution de dépointage de l'antenne avec la forme d'onde.

2.1.2.2 Description des paramètres d'acquisition

Pour pouvoir établir l'évolution de la trace au sol de l'antenne, la forme d'onde utilisée doit être entièrement décrite :

1. La forme d'onde est de type impulsionnelle : durée de l'impulsion égale à τ et période de répétition égal à $T_R = 1/f_R$.
2. La fréquence f_i de l'onde contenue dans chaque impulsion émise correspond à l'angle de dépointage de l'antenne d'émission suivant l'axe (Ox)- principe de l'antenne « leaky-wave ».
3. Le nombre d'impulsions N_p utilisées pour un angle d'incidence (nous verrons que l'augmentation de N_p permet de diminuer la variance du bruit de mesure).

De plus, il faut compter le temps de commutation τ_f entre 2 fréquences (nécessaire pour effectuer le dépointage) et qui correspond à la modification de la fréquence des synthétiseurs de fréquence. L'ensemble des grandeurs liées aux paramètres d'acquisition sont utilisées ici pour dimensionner la distance parcourue pendant le balayage de l'antenne.

Nous décrivons la forme d'onde globale utilisée pour effectuer les mesures, sur la figure 2.3. Une salve est donc constituée d'une moyenne de N_p impulsions (salve) pour la reconstruction d'une réponse de la surface éclairée par l'antenne et correspond à 1 pixel.

Chaque salve définit une trace au sol pour une incidence donnée par la fréquence porteuse f_i . Ainsi, le temps nécessaire T_b pour obtenir le signal d'un pixel est déduit du nombre d'impulsions dans une salve soit

$$T_b = N_p \times T_R = \frac{N_p}{f_R}$$

Nous pouvons aussi définir l'étalement du pixel x_{T_b} correspondant au déplacement du porteur et au nombre d'impulsions défini dans une salve

$$x_{T_b} = V_p T_b$$

et cet étalement se décrit par rapport à la trace au sol de l'antenne sur 1 impulsion ce qui donne

$$\Delta x(\%) = 100 \times \frac{x_{T_b}}{D_{\text{sol}}}$$

Le temps τ_f est aussi à prendre en compte dans le chronogramme de balayage de la zone éclairée. Nous avons alors un décalage de l'empreinte au sol décrite avec la grandeur Δx_{τ_f} où

$$\Delta x_{\tau_f} = V_p \tau_f$$

Il est important de noter que la valeur temporelle τ_f de changement de fréquence est « aléatoire ». En effet, le fonctionnement du PNA-X est basé sur un système d'exploitation et son comportement ne correspond pas à un système typiquement temps réel. Il faut donc prendre en compte une valeur minimale et une valeur maximale. Ce temps dépend du nombre de points et d'impulsions constituant les enregistrements radar. Dans l'ensemble de nos expérimentations (exemple de la campagne de SUMOS/SKIM de février-mars 2021), nous estimons que ce temps τ_f est compris entre 30 ms et 150 ms. De plus, lorsque qu'une série de salves est terminée c'est-à-dire le nombre d'angles d'incidence parcouru, le temps de transfert des données s'ajoute au temps de commutation des fréquences. Pour la campagne SUMOS/SKIM, nous avons une estimation de ce temps entre 100 ms et 600 ms.

Dans la direction de l'axe distance, le balayage de la surface se fait par le dépointage de l'antenne. Le décalage d'un angle d'incidence θ_i en θ_{i+1} s'effectue par une variation de la fréquence du signal émis Δf . Nous avons donc (figure 2.3) :

$$f_{i+1} = f_i + \Delta f$$

De plus, il est possible d'obtenir la valeur de θ_i en fonction de la valeur maximale de dépointage attendue $\theta_{i\max}$ et le nombre de pas d'angle d'incidence N_i . De plus, la bande de fréquence Δf_{\max} nécessaire pour assurer le dépointage maximal de l'antenne est donnée par

$$\Delta f_{\max} = \frac{\theta_{i\max}}{S_i}$$

où S_i est la sensibilité de dépointage, décrite en degré/hertz (ou radian/hertz). Il est aussi possible d'obtenir ce dépointage en utilisant la sensibilité S_i de dépointage de l'antenne avec :

$$\theta_i = \Delta f \times S_i$$

Il en vient que le décalage spatial Δy_i balayant la surface suivant l'axe de distance s'exprime suivant :

$$\Delta y_i = H_p \tan(i \theta_i)$$

Cette grandeur peut être comparée à l'empreinte au sol de l'antenne D_{sol} dans l'axe distance afin de détecter les zones de recouvrement entre les différents angles d'incidence.

Dans la direction de l'axe azimut, lors de l'évolution du porteur à la vitesse V_p , le balayage de la surface éclairée évolue en fonction du temps et donc du nombre d'impulsions N_p nécessaires pour obtenir la réponse correspondant à un angle d'incidence. Si nous limitons l'analyse à l'angle d'incidence au nadir, la taille du pixel au sol selon l'axe azimut est donné avec :

$$D_{\text{az}} = D_{\text{sol}} + V_p T_b = D_{\text{sol}} + V_p N_p T_R$$

De plus, lorsque les angles de dépointage sont balayés jusqu'à la valeur de θ_{\max} , l'angle de dépointage revient au nadir. La distance alors parcourue par le porteur est égale à :

$$D_{\text{nad}} = N_i V_p (N_p T_R + \tau_f)$$

Cette grandeur peut être comparée à l'empreinte au sol de l'antenne D_{sol} dans l'axe azimut afin de détecter les zones de recouvrement entre les mêmes angles d'incidence mais à une valeur de temps différente.

2.1.2.3 Simulation des traces au sol

Afin de se rendre compte de la couverture de la zone éclairée par le radar, nous faisons la simulation de la trace au sol de l'antenne pendant l'évolution du radar avec les paramètres

vitesse du porteur	V_p	40 m.s ⁻¹
hauteur du porteur	H_p	800 m
nombre d'impulsions (par angle d'incidence)	N_p	30
angle d'ouverture de l'antenne (à 3 dB)	θ_0	1,2 ° (0,021 radian)
sensibilité de dépointage	S_i	1 °.GHz ⁻¹
nombre d'angles en incidence	N_i	4
incidence maximale	θ_{imax}	4 ° (0,07 radian)
temps de changement de fréquence	τ_f	20 ms (min.) et 80 ms (max.)

TABLE 2.1 – Paramètres de simulation fixés pour l'expérimentation

empreinte sol (antenne)	$D_{sol} = 2 H_p \tan(\theta_0/2)$	16,75 m
temps d'étalement (pour 1 incidence)	$T_b = N_p/f_R$	0,0075 s
distance d'étalement (pour 1 incidence)	$x_{T_b} = V_p T_b$	0,3 m
étalement total (azimut et 1 incidence)	$D_{az} = D_{sol} + V_p T_b$	17,05 m
fraction d'étalement (pour 1 incidence)	$\Delta x(\%) = 100 (x_{T_b}/D_{sol})$	1,8 %
décalage azimut (entre incidence)	$\Delta x_{\tau_f} = V_p \tau_f$	3,2 m
décalage azimut (nadir à nadir)	$D_{nad} = N_i V_p (N_p T_R + \tau_f)$	14 m
pas de dépointage	$\theta_i = \theta_{imax}/N_i$	1 °
largeur de bande	$\Delta f_{max} = \theta_{imax}/S_i$	4 GHz
décalage de dépointage i (axe distance)	$\Delta y_i = H_p \tan(i \theta_i)$	13,96 m

TABLE 2.2 – Paramètres déduits pour la simulation (avec le tableau 2.1) avec $N_p = 30$ et $\tau_f = 80$ ms.

du tableau 2.1. Il est donc possible de déterminer les paramètres d'éclairement qui se déduisent des paramètres de l'expérimentation. Ils sont décrits dans le tableau 2.2. Nous analysons ici 4 traces dans le sens de l'axe distance (nadir, 1°, 2° et 3°) et nous retrouvons sur la figure 2.4 les grandeurs décrites dans les tableaux 2.1 et 2.2. Le signal utilisé pour reconstruire la réponse d'un pixel est en trait plein épais (ou trait pointillé épais) pour le début de la trace au sol (le signal provenant du retour de la première impulsion de la salve) et trait fin pour la fin de la trace au sol (le signal provenant du retour de la dernière impulsion de la salve). De plus, nous considérons ici que les autres éléments du système (antenne, nacelle et acquisition) ont un comportement idéal à savoir une antenne avec un angle d'ouverture maîtrisé, une nacelle permettant de parfaitement corriger les mouvements du porteur et une acquisition des données permettant une mise à disposition

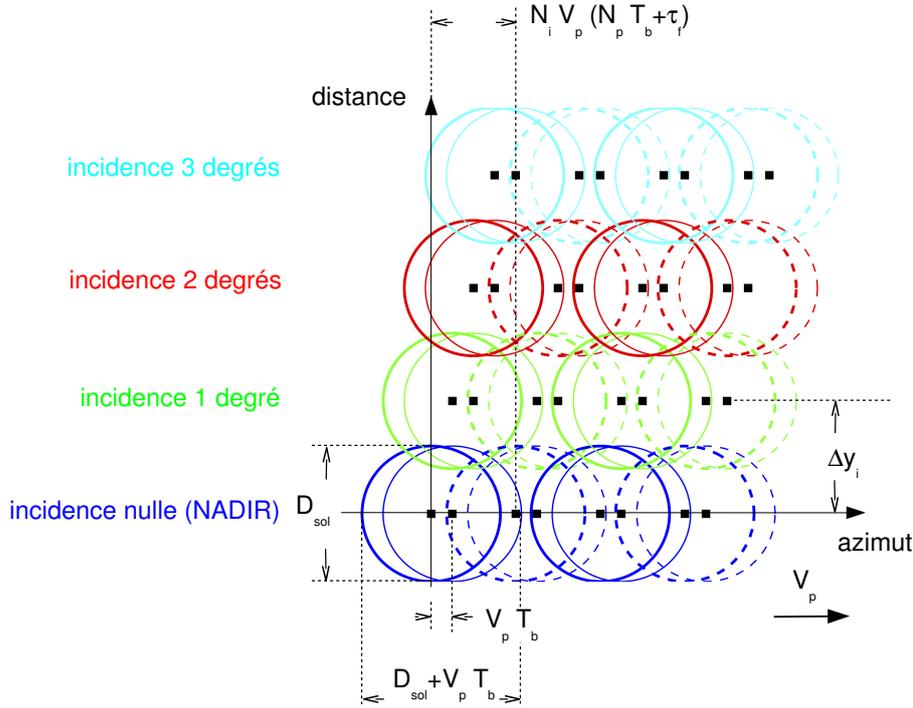
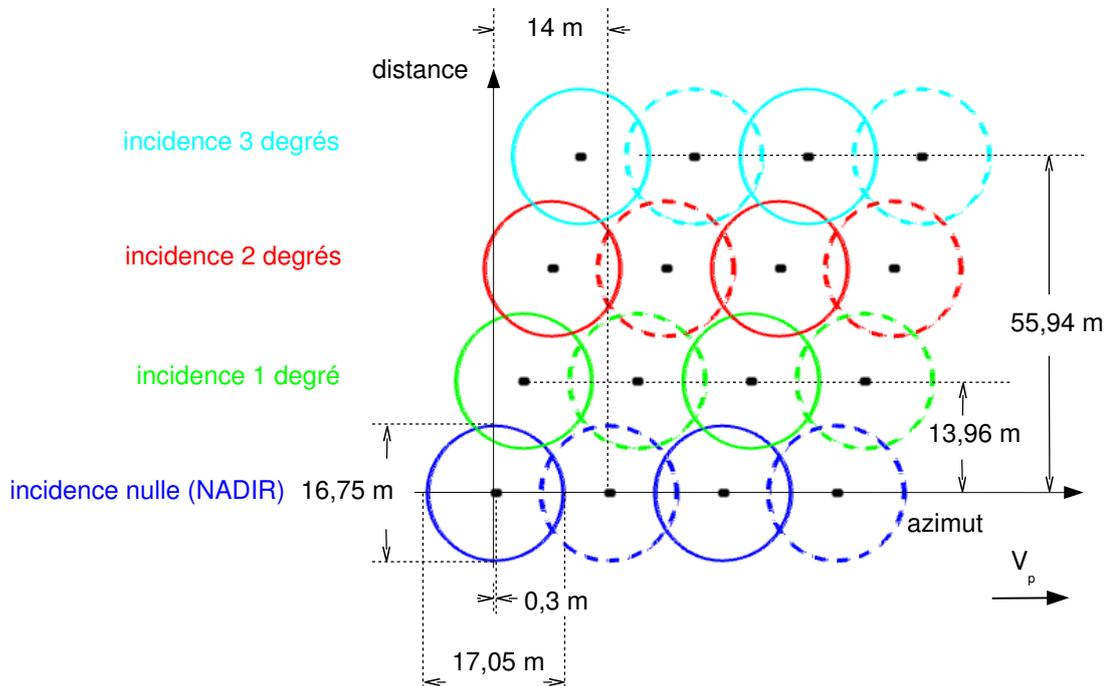
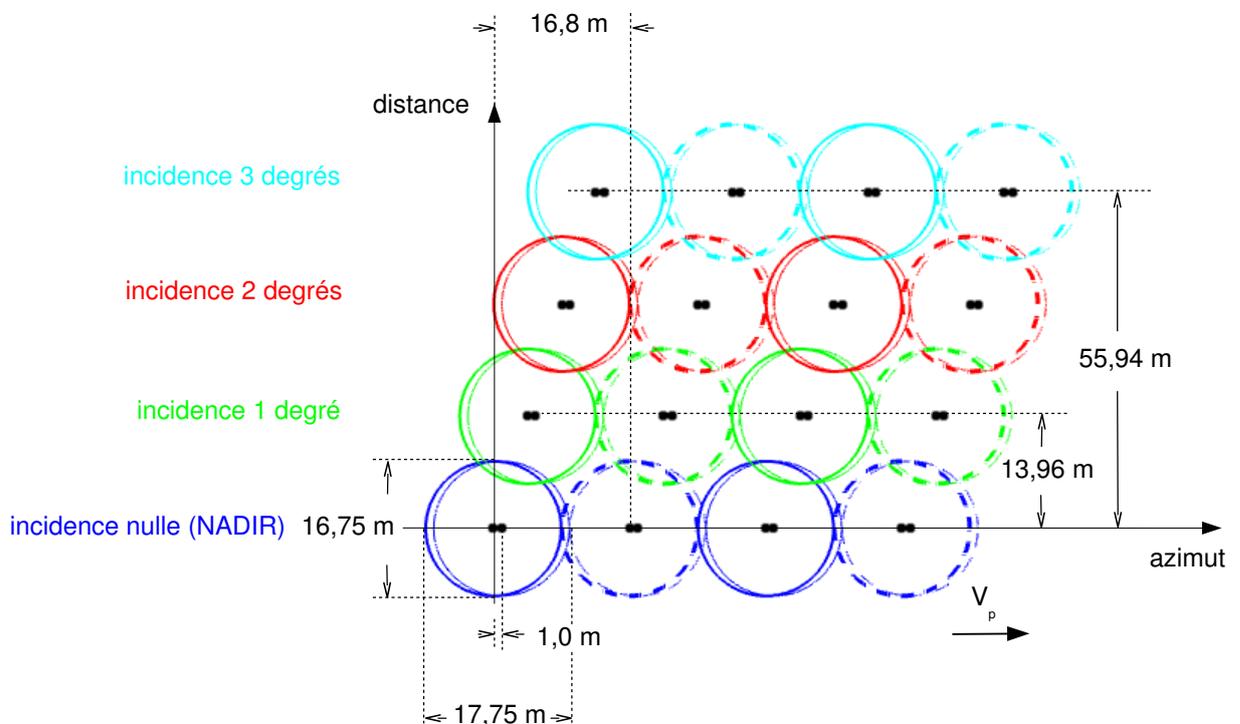


FIGURE 2.4 – Empreinte au sol au cours de l’avancée de l’avion et du balayage en incidence (vue de dessus) et formules géométriques associées

immédiate.

Afin d’avoir un ordre d’idée des surfaces éclairées et balayées, nous proposons sur la figure 2.5 une simulation avec 30 impulsions pour reconstruire le signal et un temps maximal observé de 80 ms pour τ_f . Sur cette figure 2.5, nous pouvons extraire plusieurs informations utiles concernant la couverture d’illumination au sol avec la définition des grandeurs liées aux performances de la nacelle, de l’antenne et de l’instrumentation d’acquisition. Afin de considérer les capacités du système en fonction du nombre d’impulsions nécessaires pour reconstruire la réponse d’un pixel au sol, nous effectuons la même simulation pour N_p égal à 100 impulsions et en conservant la durée de τ_f égale à 80 ms (voir figure 2.6). On retrouve les nouvelles données indiquant le décalage des empreintes au sol dans le tableau 2.3. Ces simulations nous permettent de décrire l’éclairement au sol pendant l’expérimentation afin de détecter les zones de recouvrement. La bonne estimation de l’aire de la trace au sol est très importante dans le cadre des mesures in-situ et est décrite à la section 3.4.2. Cependant un compromis reste à trouver pour la valeur N_p entre la surface totale illuminée pendant la durée de la rafale (N_p impulsions) en terme d’homogénéité d’une part et sur l’acceptation du recouvrement ou non d’autre part.

FIGURE 2.5 – Empreinte au sol de l'antenne ($N_p = 30$) avec $\tau_f = 80$ ms.FIGURE 2.6 – Empreinte au sol de l'antenne ($N_p = 100$) avec $\tau_f = 80$ ms.

empreinte sol (antenne)	$D_{\text{sol}} = 2 H_p \tan(\theta_0/2)$	16,75 m
temps d'étalement (pour 1 incidence)	$T_b = N_p / f_R$	0,025 s
distance d'étalement (pour 1 incidence)	$x_{T_b} = V_p T_b$	1 m
étalement total (azimut et 1 incidence)	$D_{\text{az}} = D_{\text{sol}} + V_p T_b$	17,75 m
fraction d'étalement (pour 1 incidence)	$\Delta x(\%) = 100 (x_{T_b} / D_{\text{sol}})$	5,97 %
décalage azimut (entre incidence)	$\Delta x_{\tau_f} = V_p \tau_f$	3,2 m
décalage azimut (nadir à nadir)	$D_{\text{nad}} = N_i V_p N_p T_R$	16,8 m
pas de dépointage	$\theta_i = \theta_{i\text{max}} / N_i$	1 °
largeur de bande	$\Delta f_{\text{max}} = \theta_{i\text{max}} / S_i$	4 GHz
décalage de dépointage i (axe distance)	$\Delta y_i = H_p \tan(i \theta_i)$	13,96 m

TABLE 2.3 – Paramètres déduits pour la simulation (avec le tableau 2.1) avec $N_p = 100$ et $\tau_f = 80$ ms.

2.1.2.4 Acquisition des données

Nous rappelons l'ensemble des organes constituant le système d'acquisition et les liens entre la partie installée dans le cargo-pod et celle installée dans la cabine avion (figure 2.1). Le choix de la structure est la gestion des appareils avec un ordinateur central en parallèle avec l'analyseur de réseaux.

1. L'ordinateur central envoie à la centrale inertielle la commande de datation des données d'attitude de la nacelle stabilisatrice.
2. De manière synchrone, l'ordinateur central transmet un ordre de prise de vue à un appareil photo.
3. L'appareil photo est installé dans le cargo-pod et destiné à prendre des photos du terrain pendant l'expérimentation. Cet appareil photo est solidaire du cargo-pod et suit donc l'attitude de l'avion.
4. L'analyseur de réseaux transmet les données radar acquises à l'ordinateur central.
5. Outre la réception des données radar, l'ordinateur central envoie la commande de position à la nacelle.

La forme d'onde (ou enveloppe du signal émis) correspond à un signal impulsionnel de durée τ et de fréquence de répétition $f_R = 1/T_R$ (voir figure 2.3). Les capacités du système d'acquisition (flux maximal de données) conditionne le mode d'acquisition et le stockage des données radar. Pour estimer le nombre de points acquis pendant une mesure de la réponse d'une impulsion, nous définissons :

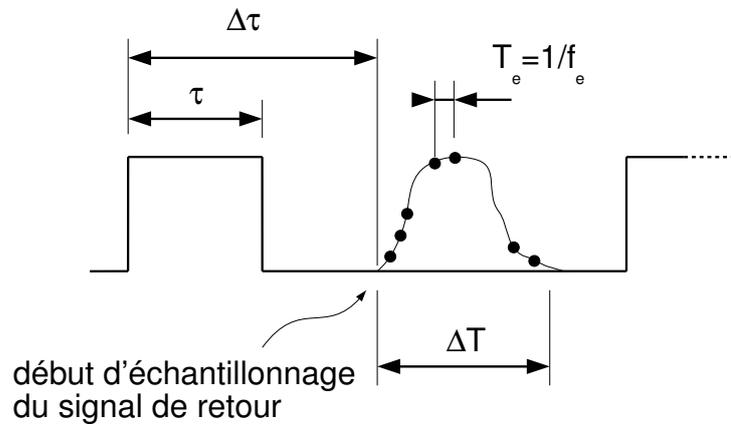


FIGURE 2.7 – Description d'une impulsion élémentaire et la réception de cette impulsion après réflexion sur le sol (cas de l'échantillonnage de l'impulsion de retour).

1. la plage temporelle ΔT correspondant à l'échantillonnage du signal reçu,
2. le nombre total de points correspondant à l'échantillonnage du retour d'une impulsion N_{\max} ,
3. le nombre de récurrences N_r correspondant et enregistrable sans avoir à effectuer de transfert des données.

De plus, le choix se fait sur un échantillonnage de l'impulsion reçue à partir d'un temps $\Delta\tau$ (correspondant au temps d'aller-retour de l'impulsion). Nous pouvons distinguer deux cas concernant l'échantillonnage de l'impulsion de retour.

1. Dans le cas d'un échantillonnage « fin » de l'impulsion de retour (mode *pulse profile*), nous définissons la fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/T_e$ (T_e période d'échantillonnage) fixant le nombre de points enregistrés par seconde.
2. Dans le cas du choix d'un point par impulsion de retour (mode *pulse-to-pulse*), la fréquence d'échantillonnage est égale à la période de récurrence T_R (1 point par impulsion émise).

Nous choisissons le mode *pulse profile* afin de représenter la totalité de l'impulsion de retour. L'ensemble de ces paramètres est décrit sur la figure 2.7. Le choix du système d'acquisition s'est porté sur un analyseur de réseau permettant la création de forme d'onde de type impulsion : système PNA-X (*Performance Network Analyzer X*). D'un point de vue pratique, nous choisissons la durée ΔT en fonction de la durée de l'impulsion à laquelle nous ajoutons quelques échantillons avant et après le retour de cette impulsion (retour défini par $\Delta\tau$ et qui dépend aussi de la hauteur du porteur). En première approximation,

nous avons le signal de retour échantillonné après l’envoi de l’impulsion soit :

$$\Delta\tau = \frac{2 H_p}{c \times \cos\theta_i}$$

Cette grandeur détermine le délai de déclenchement du trigger d’échantillonnage. Ensuite, la durée ΔT est convertie en nombre d’échantillons en considérant la période d’échantillonnage T_e d’un point de mesure :

$$N_{\Delta T} = \frac{\Delta T}{T_e} = \Delta T \cdot f_e$$

Il est clair que le nombre d’échantillons avant et après le retour de l’impulsion peut être choisi en fonction de l’étalement de la réponse du sol.

Comme indiqué dans le paragraphe 2.1.2.4, le porteur se déplace pendant l’acquisition radar. Nous décrivons ici cette évolution en fonction des paramètres d’enregistrement. En effet, nous avons alors le nombre de points nous permettant de reconstruire la réponse d’une salve de N_p impulsions pour une fréquence f_i :

$$N_f = N_p N_{\Delta T}$$

De même, le nombre de points nécessaires pour échantillonner l’ensemble des angles décrivant le balayage en distance (N_i angles en incidence) est alors donné par :

$$N_{\text{inc}} = N_i N_f$$

Finalement, le nombre total N_{total} de points qui sont mesurés correspond au nombre de variations en incidence N_{tinc} qu’il est possible de stocker avant de transférer ces points vers le PC de contrôle :

$$N_{\text{total}} = N_{\text{tinc}} N_{\text{inc}}$$

En correspondance, il est possible de donner la distance parcourue par le porteur lorsqu’un nombre N_{total} de points est atteint. Ce nombre total correspond donc à N_{tinc} et la distance parcourue pour un balayage des N_i angles d’incidence. Nous avons donc la distance totale parcourue pendant l’acquisition des N_{total} qui est donnée par :

$$D_{\text{total}} = N_{\text{tinc}} N_i V_p (T_b + \tau_f)$$

tant une connexion vers cette centrale (début de session d'enregistrement, configuration de la centrale) ainsi que la récupération des données enregistrées dans la centrale. Il faut aussi noter une connexion entre l'antenne GPS de PIMA et cette centrale afin d'effectuer le suivi GPS de la position du porteur et des corrections associées.

3. la connexion de l'appareil photo permettant une prise de vue toutes les 2 secondes (pour chaque enregistrement, après le début de la première acquisition radar)
4. le boîtier alimentation permettant d'apporter les différentes tensions et courants sur l'ensemble des éléments de SWALIS (segment RF, centrale inertielle, boîtier logique et carte interface).

Nous revenons sur la justification de cette description de l'architecture choisie dans la suite de ce document et nous commençons par la description de l'antenne.

2.1.3.1 Ensemble antennaire

Principe et dimensionnement

La première caractéristique de fonctionnement pour l'antenne du système SWALIS est de proposer un dépointage rapide dans une gamme de fréquence comprise entre 0° et 6° et dans un plan perpendiculaire à la trajectoire d'évolution du porteur. De plus, on cherche un angle d'ouverture de l'antenne de l'ordre du degré et présentant un gain élevé. La proposition a été donc de proposer une antenne basée sur le principe des ondes de fuite (connue sous le nom d'antenne « Leaky-Wave » [78]). Cela permet à l'antenne d'avoir un dépointage en fonction de la fréquence d'entrée et cela correspond à un dépointage électronique. Bien que la définition de cette antenne ne corresponde pas à un travail propre à cette thèse², il est fondamental de décrire le fonctionnement et les performances associées de l'antenne réalisée. Une première estimation théorique a permis d'envisager un dépointage de 4° pour une bande de 2 GHz. Dans ces conditions (et pour atteindre les caractéristiques d'angle d'ouverture), les caractéristiques physiques de l'antenne sont les suivantes :

1. 480 mm (dans le plan du dépointage -plan H- donc perpendiculaire à la direction d'évolution de l'antenne correspondant au plan d'incidence) \times 270 mm (dans le plan parallèle à la direction d'évolution de l'antenne -plan E) \times 16 mm d'épaisseur,

2. conception : Mohammed Himdi équipe CUTE de l'IETR / réalisation : Guy Grunfelder - CNRS/IETR- et Laurent Grégoire -SFM/INSA



FIGURE 2.9 – Antenne du système SWALIS

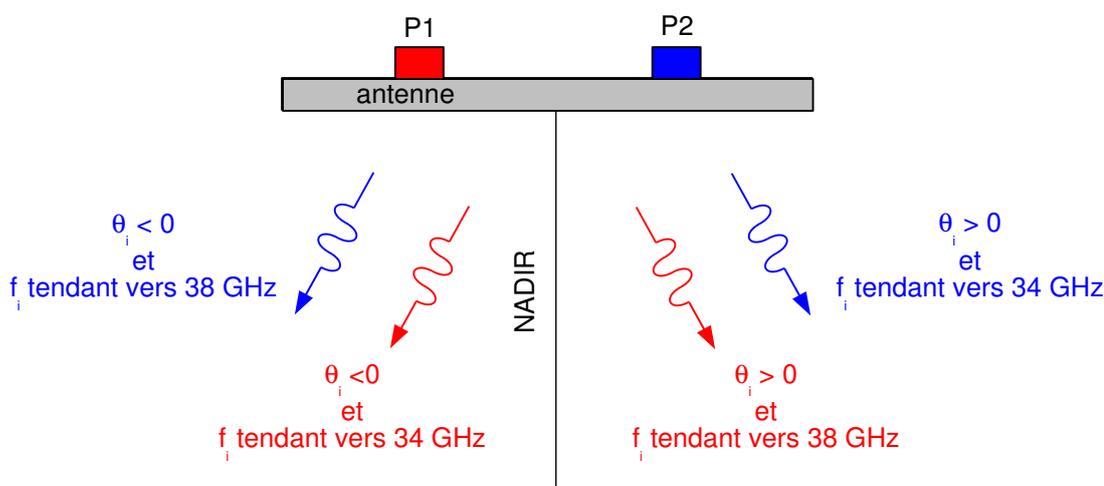


FIGURE 2.10 – Convention de signe des angles de dépointage de l'antenne en fonction des ports d'alimentation (P1 ou P2)

2. 32 guides d'onde orientés perpendiculairement au plan E,
3. 80 fentes décrites le long de chaque guide d'onde suivant le plan H.

De plus, il convient d'indiquer que cette antenne propose 2 ports d'alimentation (P1 et P2). Après des opérations de simulation et d'optimisation, l'antenne a été réalisée comme illustré en figure 2.9. Avant d'exposer l'ensemble des résultats, il convient de reprendre la nomenclature et le sens de dépointage en fonction des ports d'alimentation. Cette convention est décrite sur la figure 2.10. L'ensemble des mesures et des résultats de l'antenne tient compte de cette convention de signe pour les angles de dépointage. L'antenne a été mesurée en rayonnement dans la chambre de mesure millimétrique de l'IETR. Nous rappelons que l'angle d'élévation θ correspond au plan H c'est à dire au plan dans lequel s'effectue le dépointage et l'angle d'azimut ϕ correspond au plan E et qui contient l'axe d'évolution du porteur.

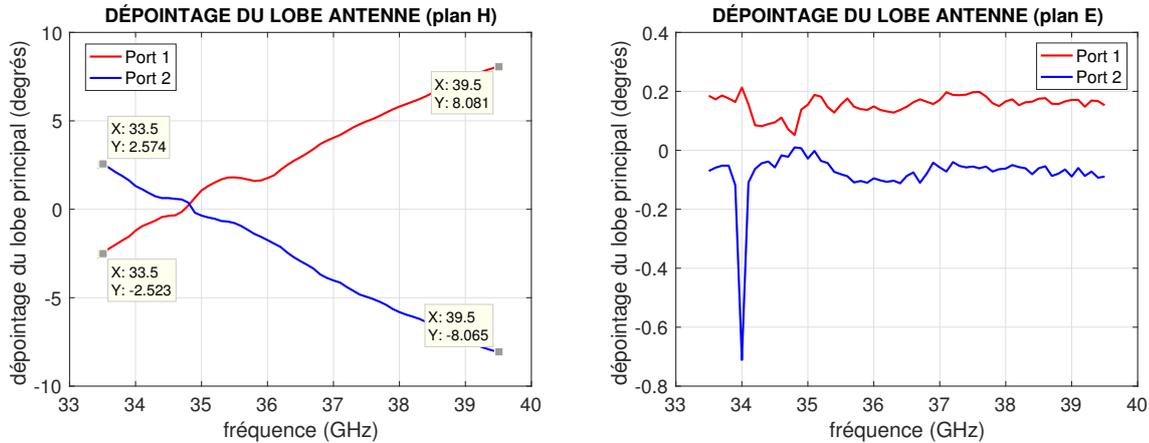


FIGURE 2.11 – Mesures des angles d'ouverture dans les plans E et H de l'antenne SWALIS.

Les mesures de dépointage sont présentées à la fois dans le plan H et dans le plan E (figure 2.11). Dans le plan H, nous remarquons un comportement linéaire de la loi de dépointage en fonction de la fréquence (port 1 et port 2) excepté une zone de non-linéarité dans la bande [35 GHz ; 36 GHz] sur le port 1. De plus, la variation de dépointage est pratiquement symétrique entre le port 1 et le port 2, avec :

1. port 1 : de $-2,52^\circ$ (@33,5 GHz) à $8,08^\circ$ (@39,5 GHz) soit une pente de $1,77^\circ \cdot \text{GHz}^{-1}$,
2. port 2 : de $2,57^\circ$ (@33,5 GHz) à $-8,06^\circ$ (@39,5 GHz) soit une pente de $-1,77^\circ \cdot \text{GHz}^{-1}$.

La mesure de l'angle de dépointage dans le plan E permet de vérifier que l'antenne ne pointe pas vers l'avant ou vers l'arrière par rapport à l'évolution du porteur. Nous retrouvons ici une bonne symétrie entre les ports 1 et port 2 même si l'alimentation sur le port 1 apporte un dépointage un peu plus important (environ $0,15^\circ$) que l'alimentation sur le port 2 (environ $0,07^\circ$). Les valeurs fortement négatives (autour $-0,7^\circ$) pour le port 2, ne constituent en aucun cas un problème pour le bon fonctionnement du système car l'antenne sera utilisée pour des valeurs ponctuelles de fréquences. Ainsi nous pourrions éviter le choix de ces fréquences pour le port 2.

En conclusion, nous vérifions que la fonction de dépointage de l'antenne dans le plan H est effective avec une sensibilité absolue de $\pm 1,77^\circ$ par GHz. Nous rappelons que le signe du dépointage dépend du port utilisé et cette caractéristique devra être prise en compte lors du montage de l'antenne à bord de l'aéronef. Enfin, l'antenne présente un léger dépointage avant/arrière de $0,15^\circ$ et $-0,07^\circ$ pour les port 1 et port 2 respectivement.

Il convient maintenant d'analyser l'adaptation de l'antenne afin de choisir les points de fonctionnement (fréquence) assurant le meilleur rapport signal à bruit.

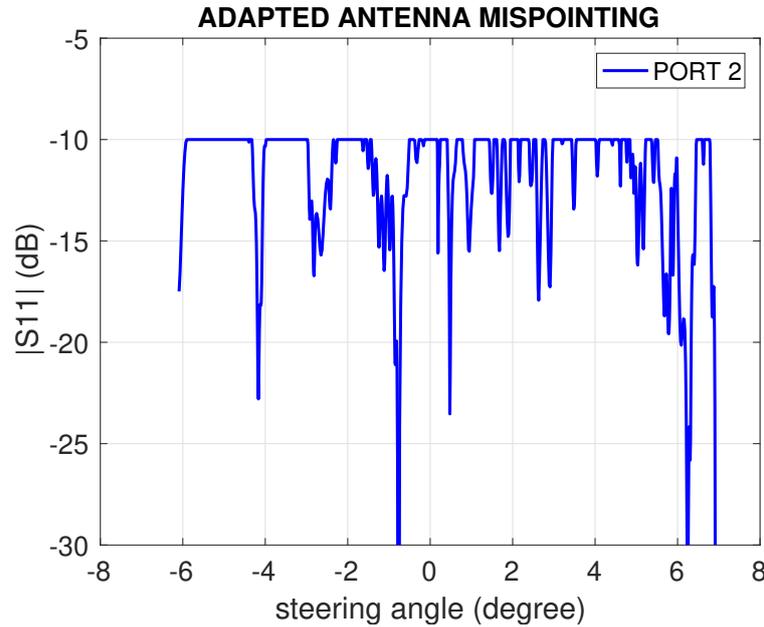


FIGURE 2.12 – Description de l’adaptation du port 2 ($S_{11} < -10$ dB) en fonction des angles de dépointage

Mesure de l’adaptation

Les mesures d’adaptation ont été faites sur les port 1 et port 2 de l’antenne et présentent une adaptation exploitable (inférieure à -10 dB) pour certaines fréquences. Après une analyse a posteriori d’autres paramètres mesurés et en particulier l’angle d’ouverture, le choix s’est porté sur l’utilisation du port 2. Pour les expérimentations et afin d’atteindre le meilleur rapport signal à bruit possible, nous nous concentrons sur une adaptation meilleure que -10 dB (figure 2.12). Pour la calibration et les premières expérimentations sur PIMA (voir section 3.2), la configuration choisie correspond à une incidence nadir (0°) entourée de 2 incidences équivalentes (ici environ $\pm 1,49^\circ$). Les autres angles d’incidence sont choisis pour couvrir une gamme allant jusqu’à 6° . Nous choisissons un angle de $-2,6^\circ$ comme angle de référence nadir (figure 2.13). Cette nouvelle référence nadir est obtenue mécaniquement par l’insertion d’une cale sur le support de l’antenne pour compenser cet angle et le faire correspondre au nadir. Nous obtenons alors la correspondance entre les angles choisis pour la mesure et le plan fréquence associé (voir table 2.4). Ces valeurs sont obtenues à partir des données mesurées en chambre anéchoïde et de la mesure de l’adaptation de l’antenne. Ces valeurs seront ensuite ajustées en fonction des mesures de S_{11} effectuées in-situ (voir section 3.2).

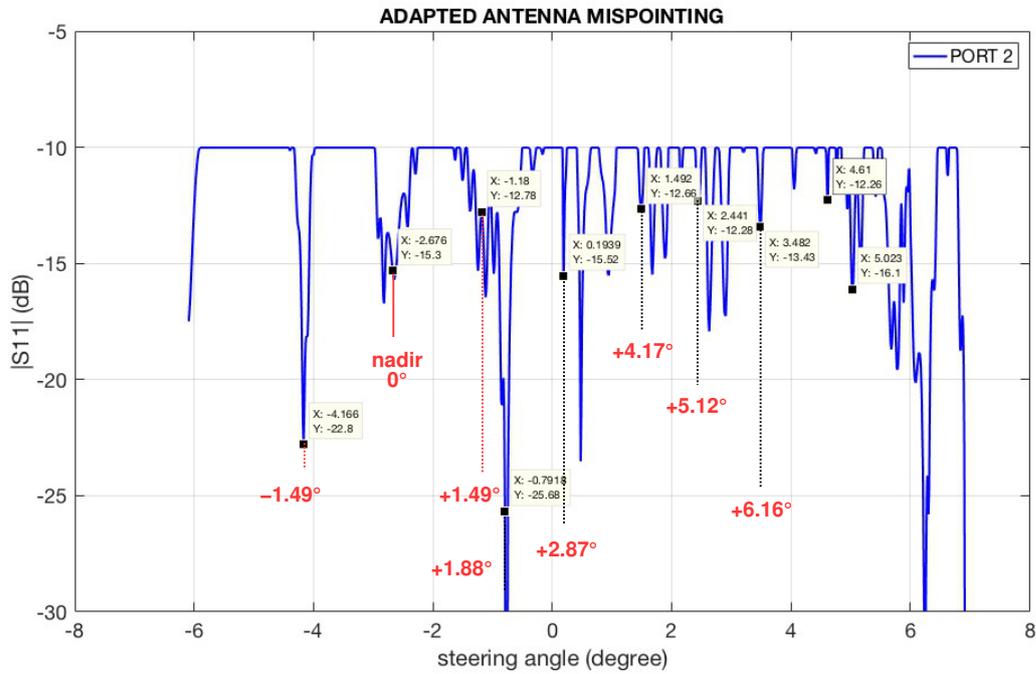


FIGURE 2.13 – Choix des angles de mesure (en rouge).

fréquence (GHz)	angle dépointage (absolu en °)	angle dépointage (compensé en °)
32,75	-4,17	-1,49
33,63	-2,67	0
34,21	-1,18	+1,49
34,64	-0,79	+1,88
35,08	+0,15	+2,87
35,71	+1,49	+4,17
36,25	+2,44	+5,12
36,84	+3,48	+6,16

TABLE 2.4 – Correspondance entre les fréquences d’illumination et les angles de dépointage (absolu et compensés).

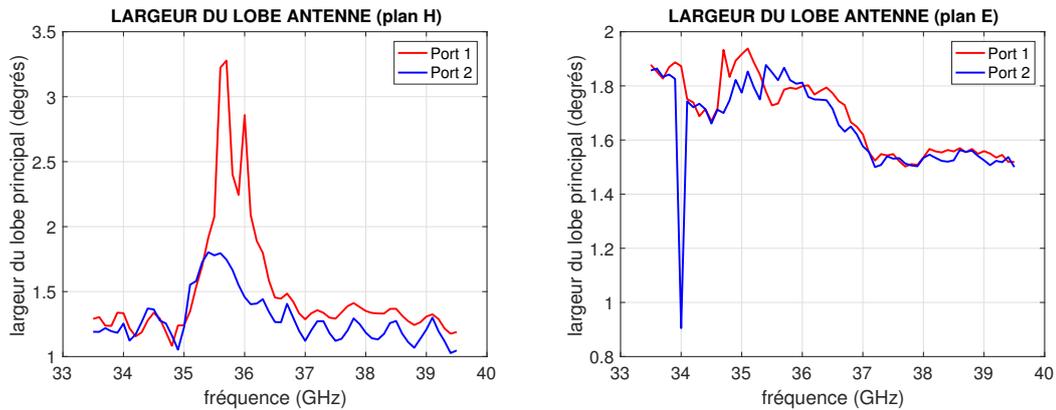


FIGURE 2.14 – Ouverture à mi-puissance du lobe d’antenne en fonction de la fréquence.

Nous décrivons maintenant les caractéristiques d’ouverture à mi-puissance dans les plans E et H de l’antenne.

Ouverture à mi-puissance

Nous présentons sur la figure 2.14 les angles d’ouverture de l’antenne en fonction de la fréquence dans les plans E et H. Dans le plan H, nous avons une ouverture de l’antenne dont la valeur se situe entre 1° et $1,5^\circ$. Toutefois, nous avons une bande de fréquence sur laquelle la largeur du lobe principale est supérieur à $1,5^\circ$ avec :

1. pour le port 1, cette bande se situe entre 35,1 GHz et 36,5 GHz,
2. pour le port 2, cette bande se situe entre 35 GHz et 36 GHz.

Dans le plan E, l’ouverture est plus importante, ce qui s’explique par une taille plus petite du réseau dans cette direction. Nous retrouvons alors une ouverture d’environ $1,7^\circ$ jusqu’à 36,5 GHz et autour de $1,5^\circ$ à partir de 36,5 GHz. Ces caractéristiques sont identiques pour les ports 1 et 2 de l’antenne (même si un écart se distingue à la fréquence de 34 GHz pour le port 2 et que nous considérons comme un artefact de mesure).

En conclusion, mis à part le phénomène d’augmentation d’ouverture dans le plan H compris dans une bande de 1 GHz autour de 35,5 GHz, nous pouvons considérer le prototype de l’antenne avec une largeur du lobe à mi-puissance de $1,25^\circ$ dans le plan H et de $1,6^\circ$ dans le plan E. En fonction des fréquences d’application, il est possible d’affiner l’estimation de cette ouverture.

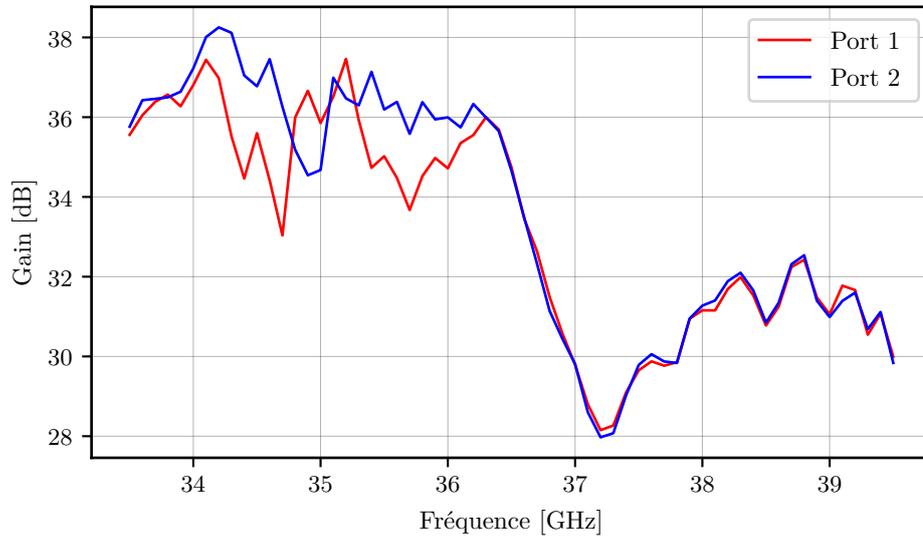


FIGURE 2.15 – Gain de l'antenne

Gain d'antenne réalisé

Nous analysons maintenant la mesure du gain d'antenne réalisée en chambre anéchoïque, ce qui doit nous permettre nous permettre d'estimer un bilan de liaison faisant intervenir le segment RF du capteur SWALIS. Les résultats de la mesure du gain sont présentés à la figure 2.15. Nous remarquons deux bandes de fonctionnement pour décrire le comportement du gain d'antenne :

1. bande comprise entre 33,5 GHz et 36,3 GHz : nous avons un gain variant entre 33 dBi et 37,5 dBi pour le port 1 et entre 34,5 dBi et 38,3 dBi pour le port 2. De plus, les gains mesurés sur les ports 1 et 2 sont différents,
2. bande comprise entre 37,6 GHz et 39,5 GHz : nous avons un gain variant entre 30 dBi et 32,5 dBi à la fois pour le port 1 et le port 2. Nous remarquons que les gains mesurés sur les ports 1 et 2 sont assez identiques.

En conclusion, nous constatons une variation de gain dans une bande comprise entre 33 GHz et 36,3 GHz, de 2 à 4 dBi autour de 36 dBi. Au-delà de la fréquence de 37 GHz, nous avons une similitude du gain réalisé entre les ports 1 et 2.

Il reste à effectuer l'analyse des diagrammes de rayonnement pour s'assurer du fonctionnement de l'antenne en dehors du lobe principal.

Diagrammes de rayonnement

Nous proposons ici de décrire le diagramme de rayonnement de l'antenne en 2 dimensions dans le plan E et dans le plan H séparément. Dans un plan donné, chaque coupe est faite suivant l'angle de l'autre plan à la position du maximum du diagramme de rayonnement. Chaque diagramme est normalisé par rapport à l'amplitude maximale. Nous décrivons le rayonnement de l'antenne pour chaque port d'alimentation (port 1 et port 2) et pour les fréquences allant de 34 GHz à 39 GHz par pas de 1 GHz.

Nous nous intéressons dans un premier temps au diagramme de rayonnement dans le plan E (*Azimuth cutplane*) pour le port 1 (figure 2.16). À chaque fréquence, le diagramme de rayonnement est donné pour l'angle d'élévation donnant lieu au maximum de ce diagramme. Nous ne remarquons pas de comportement particulier sur l'ensemble des diagrammes de rayonnement. Toutefois, nous observons des remontées de lobes secondaires à -25 dB autour de $\pm 75^\circ$. Nous remarquons la présence -attendue- de lobes secondaires de -13 dB en -dessous du niveau du lobe principal.

Nous effectuons la même analyse pour le port 2, comme décrit sur la figure 2.17. Comme précédemment, nous n'avons pas de comportement particulier sur l'ensemble des diagrammes de rayonnement. Toutefois, nous avons une forme du lobe principal qui présente une diminution dans ce lobe pour le diagramme à 34 GHz.

Dans un second temps, nous effectuons l'analyse du diagramme de rayonnement dans le plan H (*Elevation cutplane*) pour le port 1 (figure 2.18). À chaque fréquence, le diagramme de rayonnement est décrit pour l'angle d'azimut passant par le maximum du diagramme.

Pour le plan H, nous pouvons constater que nous avons bien un décalage du maximum de rayonnement en fonction de la fréquence. Nous retrouvons bien la particularité à la fréquence de 36 GHz à savoir un lobe principal plus large (autour de 3°) en considérant le port 1. Il faut noter aussi des remontées de lobes secondaires pour des fréquences tendant vers 39 GHz.

Dans le plan H, nous effectuons la même analyse pour le port 2, comme décrit sur la figure 2.19. Pour le plan H, si nous considérons le port 2, nous constatons aussi le décalage du maximum de rayonnement en fonction de la fréquence. Nous retrouvons aussi la particularité à la fréquence de 36 GHz à savoir un lobe principal plus large (mais moins prononcé qu'avec le port 1). Nous constatons aussi des remontées de lobes secondaires pour des fréquences tendant vers 39 GHz.

Sur les figures 2.16 à 2.19, les courbes vertes correspondent à la polarisation croisée

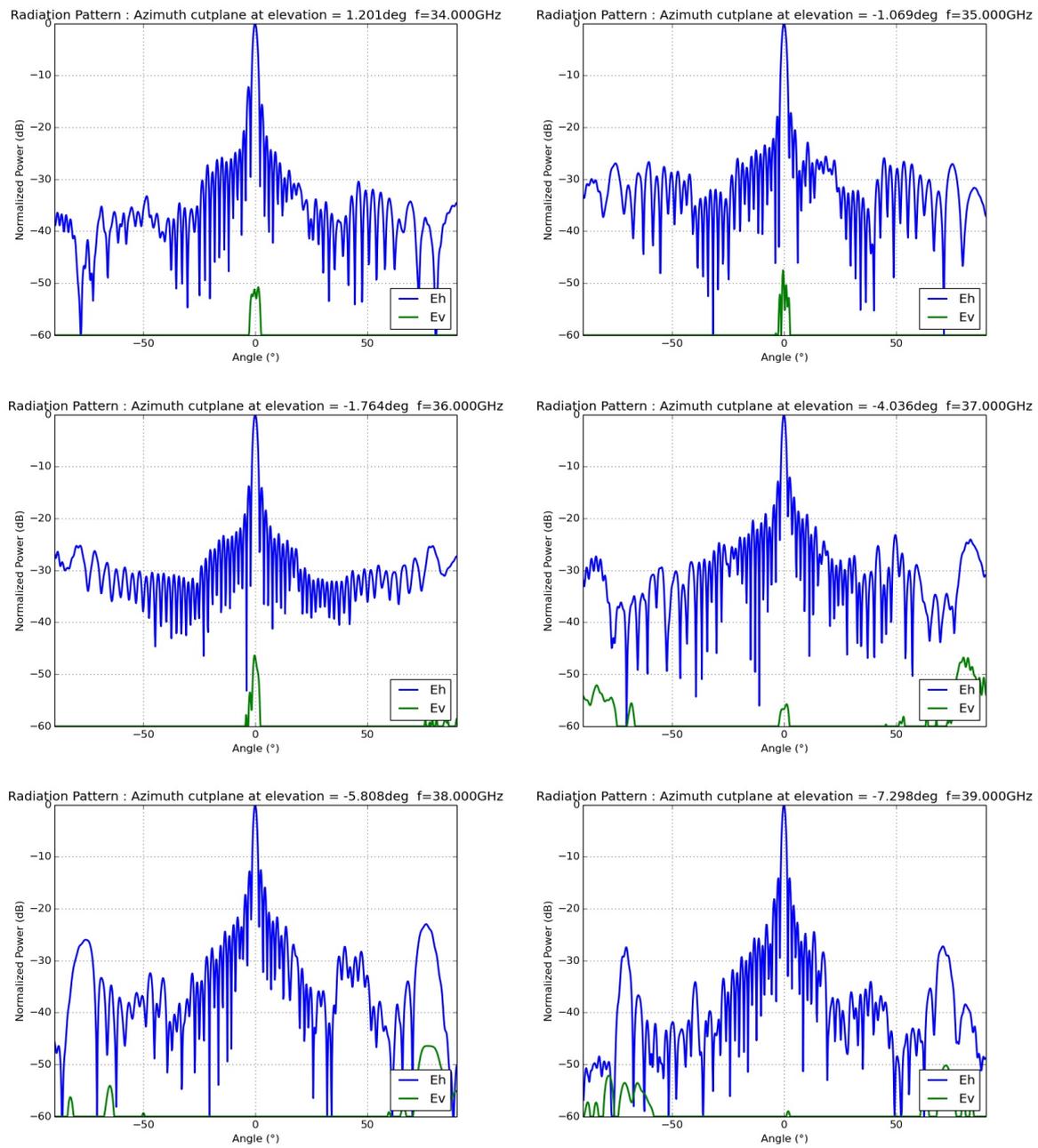


FIGURE 2.16 – Diagramme de rayonnement normalisé de l’antenne dans le plan E et mesuré avec alimentation sur le port 1 dans la bande [34 ; 39] GHz)

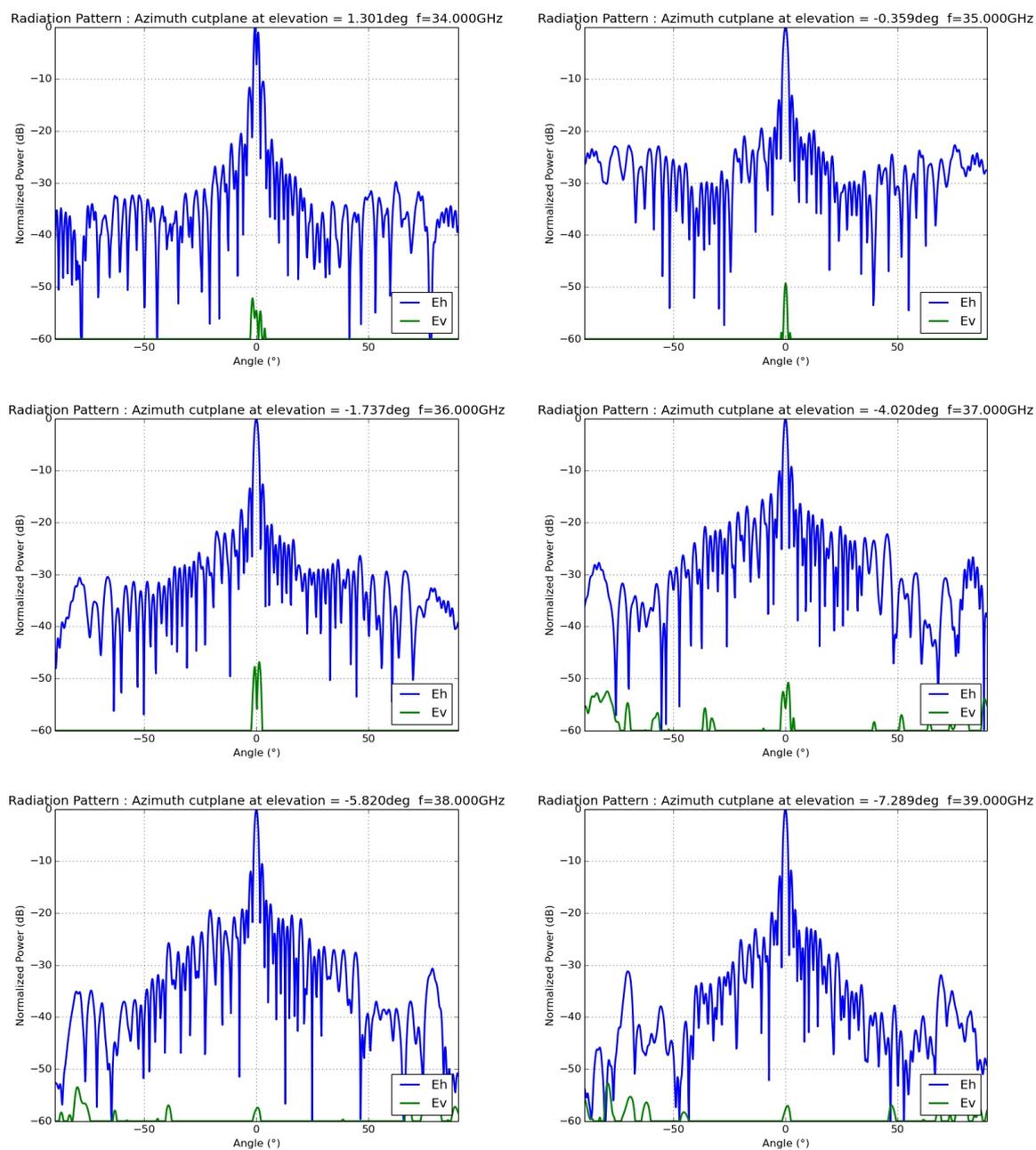


FIGURE 2.17 – Diagramme de rayonnement normalisé de l’antenne dans le plan E et mesuré avec alimentation sur le port 2 dans la bande [34 ; 39] GHz

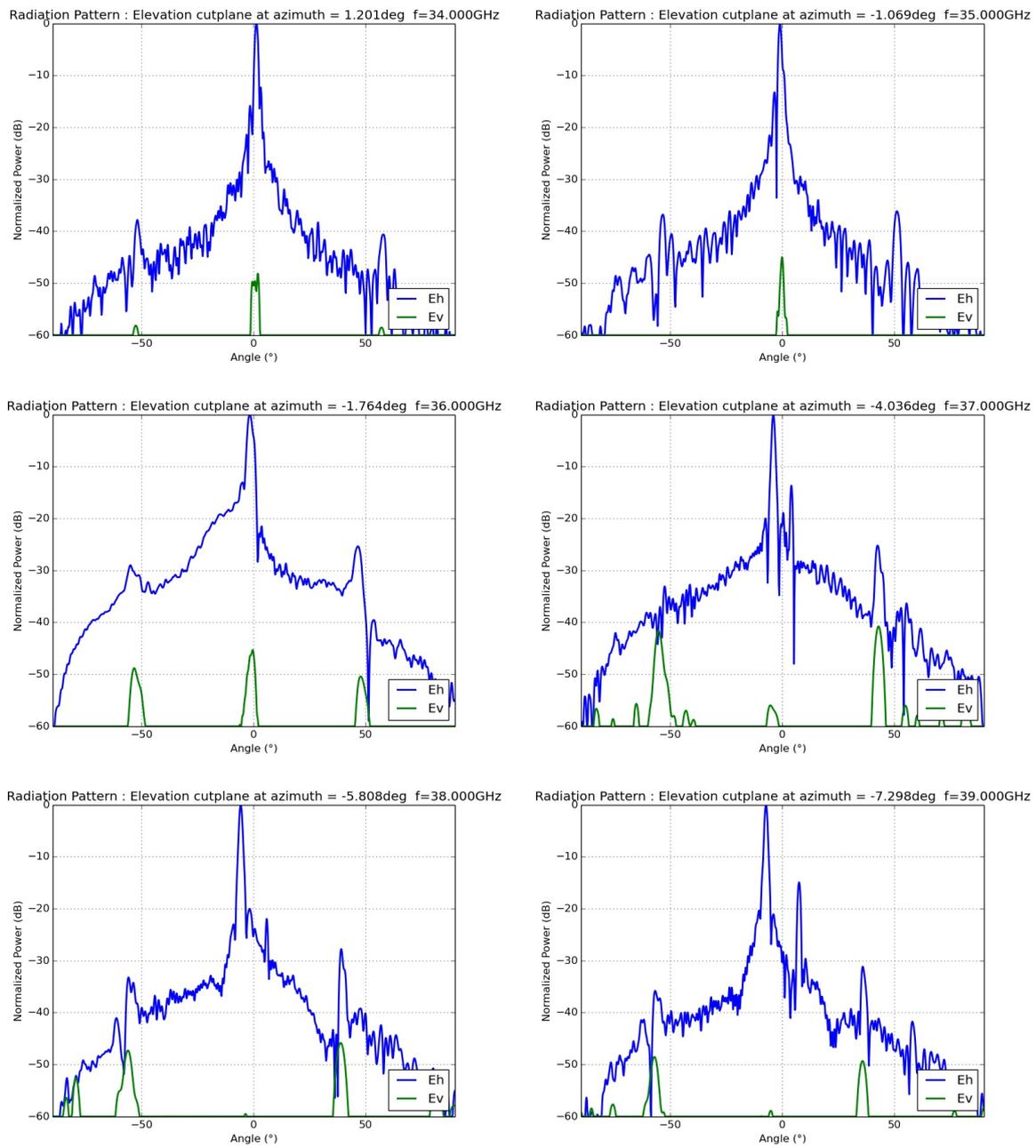


FIGURE 2.18 – Diagramme de rayonnement normalisé de l’antenne dans le plan H et mesuré avec alimentation sur le port 1 dans la bande [34 ; 39] GHz)

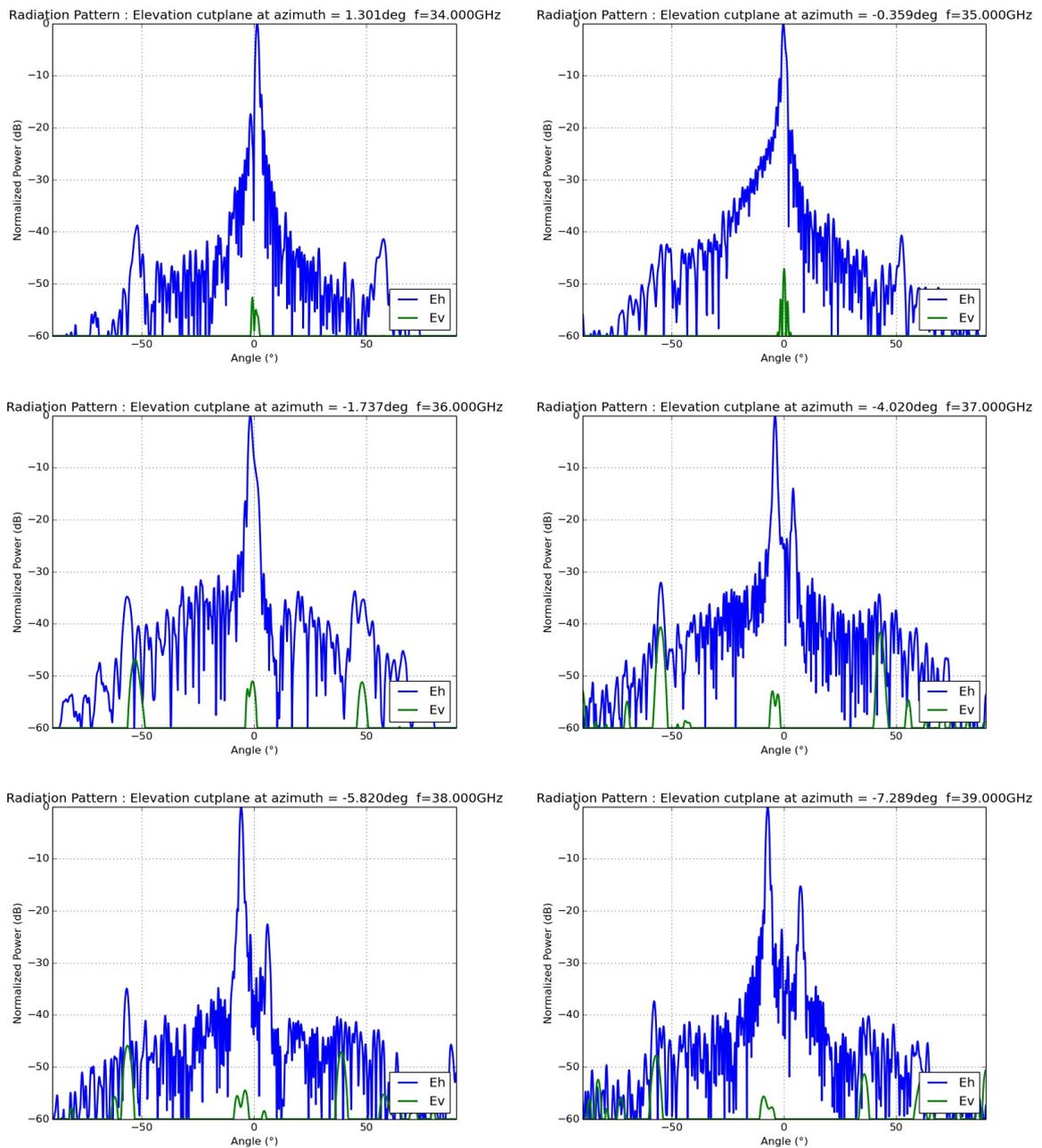


FIGURE 2.19 – Diagramme de rayonnement normalisé de l’antenne dans le plan H et mesuré avec alimentation sur le port 2 dans la bande [34 ; 39] GHz

qui présente un bien faible niveau.

Utilisation de l'antenne dans le cadre du système SWALIS

En conclusion générale, l'utilisation du port 2 de l'antenne est préconisée considérant :

- une loi de dépointage la plus linéaire dans le plan H et un biais de dépointage le plus faible dans le plan E,
- une adaptation satisfaisante (< -10 dB) permettant un choix important de fréquence/angle de dépointage,
- une largeur du lobe principal évoluant peu sur la bande de fréquence d'analyse,
- un diagramme de rayonnement présentant peu de lobes secondaires (surtout à partir de 38 GHz et pour des angles autour de $\pm 60^\circ$).

Pour rappel, dans la configuration SWALIS, l'antenne est dépointée mécaniquement de $2,6^\circ$ dans le plan H permettant ainsi, pour le port 2, de replacer l'incidence réelle nulle dans la bande basse de fonctionnement de l'antenne (gain élevé).

Pour caractériser la totalité de la chaîne de transmission et de réception, il convient maintenant de caractériser le segment RF du capteur SWALIS.

2.1.3.2 Segment RF

Afin de répondre à l'ensemble des caractéristiques attendues pour les mesures, nous optons pour l'utilisation d'un amplificateur pulsé à l'émission et d'un amplificateur faible bruit protégé par un commutateur analogique (*SPST*) à la réception. De plus, puisque nous sommes en configuration monostatique, nous ajoutons un circulateur permettant d'utiliser l'antenne autant à l'émission qu'à la réception. Nous décrivons le schéma de principe du module RF ainsi que les différentes commandes du PNA-X sur la figure 2.20.

Ce segment RF est constitué de :

- Un amplificateur de puissance pulsé (SSPA, Quinstar QPP-30383740) commandé par le signal « Pulse 2 » et qui fonctionne pendant la durée τ du signal émis.
- Un circulateur (CIRC, MRI-WJR3) permettant l'émission du port 1 vers le port 2 pendant la transmission de l'onde et la réception du retour de cette onde du port 2 vers le port 3 pendant le temps d'écoute du radar. Les pertes d'insertion entre les ports sont de l'ordre de 1,5 dB. L'isolation entre les ports de transmission et de réception est estimée à 22 dB.

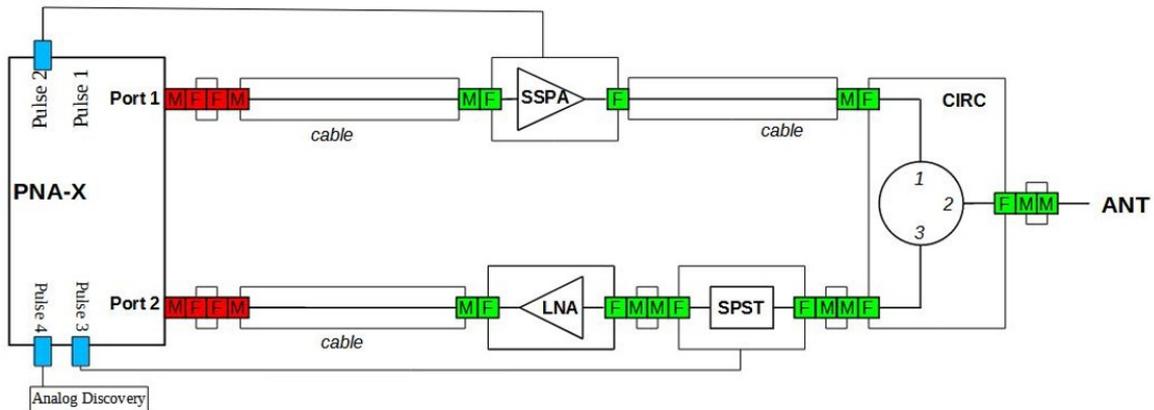


FIGURE 2.20 – Schéma synoptique simplifié du module RF SWALIS

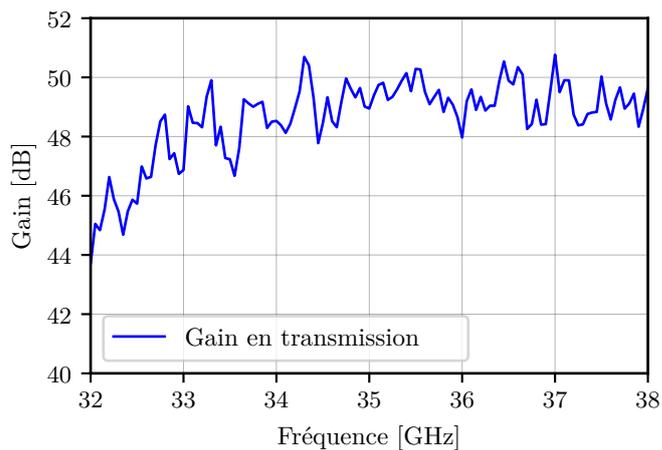
- Un commutateur analogique (SPST, SKS-2734032030-2828-R1) protégeant la partie réception du module RF durant l'émission. Il est commandé par le « Pulse 3 ».
- Un amplificateur faible bruit (LNA, AGILE AMT-A0422) amplifiant les signaux pendant la réception et dont les niveaux de puissance maximale en entrée nécessite la protection du SPST.

Nous décrivons ces composants en fonction de la performance du montage global et de son comportement. Les mesures réalisées permettent d'établir un bilan de liaison qui s'applique sur l'ensemble du segment RF. Ce segment RF tel que décrit sur la figure 2.20, a été réalisé par le laboratoire RF du CNES [79]. Nous présentons les résultats de mesure que nous avons effectué à l'IETR avec le PNA-X.

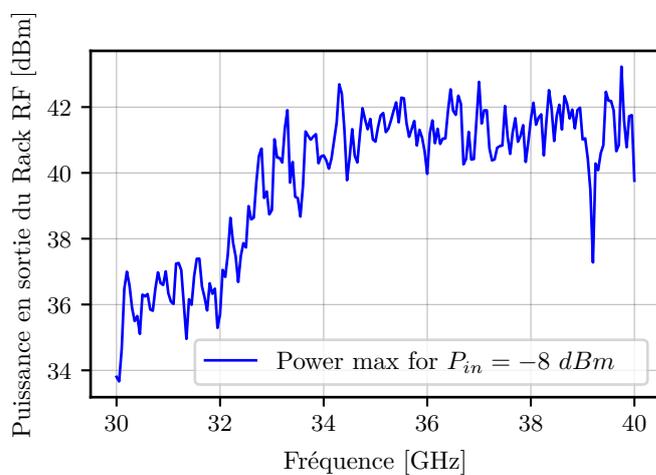
Émission

Nous avons mesuré le paramètre S_{21} de transmission entre le port ANT et le PORT1 du PNA-X (figure 2.20). Cette mesure est décrite sur la figure 2.21. Nous mesurons un gain supérieur à 41 dB dans la bande 30 – 38 GHz. Nous pouvons aussi remarquer une certaine variation du gain dans la bande d'intérêt.

Une autre mesure d'intérêt concerne la puissance en sortie du segment RF (et donc en entrée de l'antenne) puisque cette grandeur nous fournit la capacité de mesure du système radar et donc du rapport signal à bruit en réception. La puissance maximale de sortie du module RF en tenant compte du point de compression 1 dB de l'amplificateur pulsé se situe entre 34 et 42 dBm. Là-aussi, des variations en fonction de la fréquence sont notées



(a) Gain en transmission du segment RF (SWALIS)



(b) Puissance délivrée par le segment RF (SWALIS)

FIGURE 2.21 – Mesures de la transmission du segment RF SWALIS

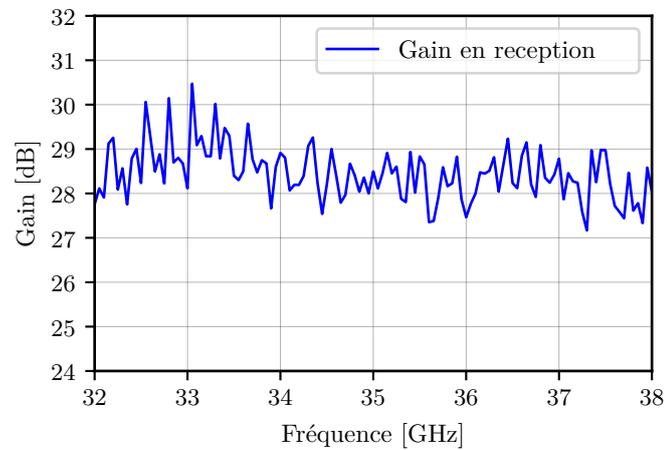


FIGURE 2.22 – Gain en réception du segment RF du capteur SWALIS

et qu'il faudra prendre en compte dans le bilan final.

Réception

Naturellement, il est nécessaire d'effectuer la mesure de la performance de la chaîne de réception. Cette chaîne de réception doit pouvoir être suffisamment sensible pour mesurer les signaux présents sur l'antenne. Entre autres, il s'agit de situer la puissance du signal de sortie au-dessus du seuil de sensibilité du PNA-X. Nous opérons de la même manière que pour l'émission pour mesurer le gain de la réception à savoir la mesure du paramètre S entre le port PORT2 du PNA-X et le port ANT. Le gain mesuré en réception est supérieur à 28 dB (figure 2.22) avec des variations de ± 1 dB selon la fréquence.

Isolation

Cette mesure est importante car elle permet de vérifier l'isolation entre la chaîne d'émission et celle de réception afin de s'assurer que la réception n'est pas « polluée » par l'émission (figure 2.23) comme annoncé dans la note technique [79]. L'isolation mesurée est supérieure à 60 dB ce qui est suffisant pour protéger l'amplificateur faible bruit. Il faut noter aussi que le choix d'un amplificateur de puissance pulsé permet d'isoler totalement la partie émission de la partie réception pendant la phase d'écoute du signal.

En entrée du segment RF, il faut créer la forme d'onde à transmettre. Cette forme d'onde a été définie au paragraphe 2.1.2.4. De même, en sortie du segment RF, il est

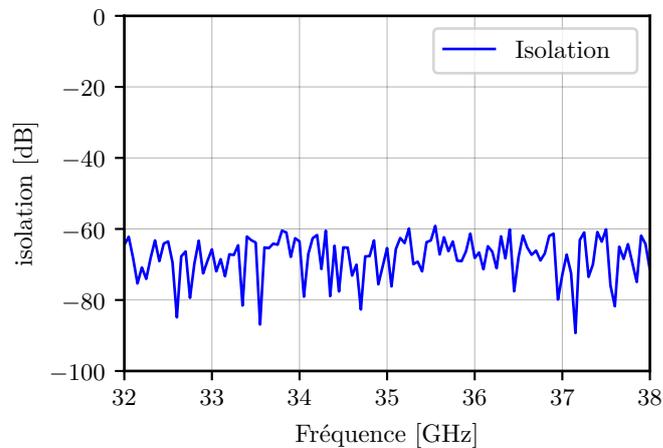


FIGURE 2.23 – Isolation du segment RF du capteur SWALIS

nécessaire d'échantillonner le signal reçu. Nous définissons ainsi le système de transmission/acquisition du capteur SWALIS.

2.1.3.3 Système d'acquisition

Le choix du système d'acquisition se porte sur l'appareil référencé KEYSIGHT PNA-X 5224B 40 GHz pulsé (DSP version 5). Le PNA-X 5224B est un analyseur de réseaux vectoriel performant capable de faire des acquisitions dans la bande Ka en mode pulsé. Le choix de la fréquence du filtre IF (filtre d'entrée appliqué à l'échantillonneur) fixe les limites du plancher de bruit et la longueur de l'impulsion enregistrable. De plus, cet appareil permet de faire des mesures pulsées dites larges bandes (synchrone) ou bandes étroites (asynchrone) pour plusieurs types de mode. Le mode « large bande » est utilisé si la majorité du spectre du signal reçu est contenu dans la bande passante du récepteur (30–38 GHz). L'analyseur est synchronisé avec les flux d'impulsions émises et l'acquisition des données ne se produit que lorsque le trigger d'acquisition est actif (mode d'acquisition synchrone).

Le PNA-X propose plusieurs méthodes de mesure des signaux impulsionnels. Pour notre application, plusieurs modes sont compatibles avec les performances attendues :

1. mode *pulse-to-pulse* utilisable pour caractériser l'évolution du pulse dans le temps dû aux variations des performances dans les DUT (*Device Under Test*). Les résultats peuvent être affichés en amplitude ou phase en fonction du temps. Il mesure un

IF bandwidth (kHz)	Wideband point-in-pulse minimum pulse width (ns)		Wideband pulse profile minimum timing resolution (ns)	
	DSP version 4	DSP version 5	DSP version 4	DSP version 5
100	10650	14520	10650	7260
150	7100	9680	7100	4840
200	4733	7260	4733	3630
280	3550	5160	3550	2580
360	2367	4420	2367	2410
600	1183	3620	2367	2410
1000	1433	1440	717	720
1500	933	960	467	480
2000	700	720	350	360
3000	467	500	233	250
5000	267	300	133	150
7000	n/a	200	n/a	100
10000	n/a	140	n/a	70
15000	n/a	100	n/a	50

FIGURE 2.24 – Tableau indiquant les fréquences d'échantillonnage en fonction de la largeur IF (extrait de la documentation technique Keysight du PNA-X 5224B).

point par pulse de manière périodique avec précision. Pour ce mode, il est essentiel de pouvoir définir la position de la fenêtre temporelle (dont la largeur est définie par le filtre IF) afin que l'échantillon obtenu provienne bien de l'impulsion de retour. En effet, nous pouvons considérer que la largeur de la porte temporelle correspondant au filtre IF soit plus importante que la largeur temporelle de l'impulsion de retour. Ainsi, il est alors possible de mesurer la puissance de cette impulsion ainsi que le « signal de retour » autour de cette impulsion. Il est donc important de vérifier ce paramètre de mesure.

2. mode *pulse-profile* donnant des informations de mesures dans le domaine temporel (mode CW). Il permet de reconstituer l'écho dans le domaine temporel, ce qui est analogue à la fonction d'un oscilloscope.

Pour ces deux modes, la fréquence d'échantillonnage f_e est décrite sur la figure 2.24. Comme indiqué auparavant, pour le capteur SWALIS, les mesures s'effectuent en mode *pulse profile*. Nous ne pouvons pas utiliser une forme d'onde de type FMCW car l'architecture radar associée nécessite deux antennes, ce qui n'est pas possible dans le cadre de notre système, faute d'espace dans le cargo-pod en dessous de l'avion. L'utilisation du mode *pulse profile* nous permet de générer un train de N_p impulsions par rafales de longueurs τ avec une période de répétition T_R et donc d'estimer la distance aveugle de

notre radar

$$R_{aveugle} = \frac{c\tau}{2}$$

et la distance maximale mesurable

$$R_{max} = \frac{cT_R}{2}$$

Pour le capteur SWALIS, la durée d'une impulsion est de $\tau = 1 \mu s$ et la période de répétition des impulsions vaut $T_R = 250 \mu s$. Ainsi la distance aveugle est de 150 m et $R_{max} = 37,5$ km. Pour une nominale de 500 m du système SWALIS par rapport à la scène, nous nous positionnons dans zone de bon fonctionnement du capteur.

Pour le système KaRADOC, la durée d'une impulsion est de $\tau = 10 \mu s$ et la période de répétition des impulsions vaut $T_R = 250 \mu s$ (identique à celle du système SWALIS). Ainsi la distance aveugle est de 1500 m et $R_{max} = 37,5$ km. Pour une hauteur nominale de 3000 m du système KaRADOC par rapport à la scène (la mer), nous nous positionnons dans une zone de fonctionnement correct du capteur.

Les contraintes les plus critiques correspondent à la maîtrise des commandes du PNA-X et des modes d'analyse des données radar entre le temps d'émission du système radar et le temps d'écoute. Le PNA-X est doté de l'option 118 (FastCW et FIFO) et qui permet un stockage interne de 20 millions de points sur une acquisition radar. Il faut donc que l'échantillonnage et la durée de l'impulsion ne dépasse pas cette profondeur FIFO pour une acquisition continue.

Le PNA-X a la capacité d'effectuer au plus 4 tâches en parallèle via des *threads* de programmation. Dans notre cas, trois *threads* sont utiles. Un premier *thread* permet de définir la forme d'onde émise (un nombre N_p d'impulsions émises sur une durée τ et à une fréquence de récurrence f_R). L'envoi d'un signal de déclenchement à chaque envoi d'impulsion permet ensuite d'échantillonner le signal à partir de $\Delta\tau$ pendant une durée ΔT . Un deuxième *thread* permet d'enregistrer les données suivant un format défini dans un fichier avec une organisation choisie. Le troisième *thread* permet de gérer l'envoi des commandes de récupération des données d'attitude de la centrale inertielle ainsi que l'envoi d'une impulsion de prise de vue avec l'appareil photo.

Pour rappel, nous définissons une rafale (ou *burst*) comme étant constituée de N_p impulsions. La salve est ensuite traitée pour représenter la réponse de la surface au sol éclairée par l'antenne (trace au sol de l'antenne). Cette réponse correspond à la sommation cohérente de chaque échantillon constituant la réponse retour de chaque impulsion émise

nature du paramètre	nom générique	commentaires
nombre de fréquences	numFrequency	si 1, pas de mode <i>scan</i>
valeur des fréquences	<i>no name</i>	en GHz
angle de dépointage constant	offsetAngle	en degré
durée de l'impulsion	pulseDuration	en seconde (τ)
début de l'acquisition	startAcquisition	en seconde ($\Delta\tau$)
période de récurrence	pulsePeriod	en seconde (T_R)
nombre d'échantillons par impulsion	samplesPerPulses	$N_{\Delta T} = \Delta T \cdot f_e$
nombre d'impulsions par rafale	pulsesPerBlock	N_p
nombre de récepteurs	numReceivers	voies échantillonnées
puissance émise par le PNA-X	power value	en dBm
largeur de bande IF	bandwidth value	en Hz
période d'échantillonnage	samplingPeriod	en seconde
profondeur mémoire	maxFIFOLevel	(pas un paramètre clé)

TABLE 2.5 – Paramètres définis pour chaque enregistrement dans le fichier XML.

pendant la salve. Nous rappelons aussi que la durée τ_f correspond au temps de changement de fréquence.

Chaque enregistrement de données radar est dimensionné par un fichier de type XML afin de renseigner les grandeurs importantes pour la mesure. Les paramètres utilisés dans ce fichier XML sont décrits dans le tableau 2.5. Nous (re)donnons la signification de quelques paramètres :

1. le nombre de fréquences balayées (dans le cas du mode *scanning* fréquentiel),
2. la valeur des fréquences d'émission f_i (cette valeur donne l'angle de dépointage θ_i du faisceau d'antenne),
3. l'angle de dépointage constant de l'antenne (dans le cas de SWALIS, cette valeur est égale à $-2,6^\circ$),
4. la durée de l'impulsion τ (la valeur minimale de cette grandeur est fixée par l'altitude du porteur),
5. la valeur temporelle du début d'acquisition $\Delta\tau$ (correspondant au temps d'aller et retour de l'onde émise et détermine le délai de déclenchement du trigger d'échantillonnage après envoi de l'impulsion),
6. la période de répétition de l'impulsion T_R (la valeur minimale de cette grandeur est fixée par la durée du retour de l'impulsion précédente). Dans le cas du capteur SWALIS, cette durée de répétition est liée à celle de SWOT à savoir $250 \mu s =$

largeur (MHz)	15	5	1
T_e (ns)	50	150	720
Seuil de sensibilité $\beta_{s(IF)}$ (dBm)	-57	-63	-69
Résolution en distance ΔR (m)	7,5	22,5	108

TABLE 2.6 – Largeurs de bande de filtre IF choisies pour le capteur SWALIS et KaRADOC.

1/4 kHz,

7. le nombre d'échantillons par impulsions reçues ($N_{\Delta T} = \Delta T \cdot f_e$) où f_e correspond à l'inverse de la période d'échantillonnage T_e ,
8. le nombre d'impulsions N_p constituant une rafale,
9. le nombre de voies qu'il est possible d'échantillonner (sur le PNA-X, le maximum de cette valeur est égale à 2),
10. la puissance qui est émise par le PNA-X (et qui définit aussi la puissance de sortie de l'ampli pulsé),
11. la largeur de bande IF de l'échantillonneur et qui définit la période d'échantillonnage T_e , voir figure 2.24.

La profondeur mémoire disponible n'est pas un paramètre utilisé dans cette version du système SWALIS.

D'un point de vue pratique, nous choisissons la durée ΔT en fonction de la durée de l'impulsion à laquelle nous ajoutons quelques échantillons avant et après le retour de l'impulsion (retour défini par $\Delta\tau$). Cette durée ΔT est convertie en nombre d'échantillons en considérant la durée d'un point de mesure (dépendant de la largeur du filtre IF). Le nombre d'échantillons avant et après le retour de l'impulsion est aussi choisi en fonction de l'étalement de la réponse du sol. Ce choix est à faire à partir de retours d'expérience.

La table 2.6 correspond au choix des largeurs de bande du filtre IF choisis pour l'application SWALIS en tenant compte :

1. de la période d'échantillonnage T_e (critère principal lors de l'acquisition radar),
2. du seuil de sensibilité $\beta_{s(IF)}$ (valeur minimale de puissance mesurable sur le port du PNA-X),
3. de la résolution en distance ΔR .

Le choix d'un filtre IF (fonction interne du PNA-X) impose une période d'échantillonnage T_e et une puissance minimale en dessous de laquelle, il est impossible de faire de mesure (seuil de sensibilité). Le début de l'impulsion peut ne pas être enregistré en considérant un pas T_e , ce qui impactera l'erreur sur la distance de visée avec

$$\Delta R = \frac{cT_e}{2}$$

Donc, si nous souhaitons une précision sur la mesure de la hauteur, il est préférable d'utiliser une largeur de bande de filtre IF de 15 MHz car la résolution en distance pour cette largeur de bande est de 7,5 m (au lieu de 108 m pour le filtre IF de 1 MHz). En revanche, si nous souhaitons que notre système puisse mesurer des faibles niveaux de puissance reçue alors la largeur de bande IF de 1 MHz est préférable pour avoir un seuil de sensibilité plus faible.

2.1.3.4 Autres équipements

Comme illustré à la figure 2.1, d'autres équipements annexes viennent s'ajouter à ceux décrits dans les paragraphes 2.1.3.1, 2.1.3.2 et 2.1.3.3 permettant ainsi la synchronisation des éléments entre eux ainsi que les traitements à suivre des données radar.

PC central de commande

Le poste de commande est une tablette PANASONIC durcie ayant les propriétés suivantes :

- un processeur Intel core i5-6300U,
- 4 Go de mémoire vive,
- 100 Go de capacité de stockage.

Sur le poste de commande est installée une interface graphique permettant de :

- configurer l'analyseur vectoriel de réseaux
- acquérir les données radar et les stocker,
- visualiser rapidement les données mesurées en temps réel.

Cette interface graphique est désignée par « SWALIS PIMA », logiciel de contrôle de l'ensemble des éléments constituant le système SWALIS.

Description du logiciel SWALIS PIMA

Le logiciel « SWALIS PIMA » est le logiciel³ assurant essentiellement les commandes du PNA-X et sa configuration avec les paramètres décrits dans la table 2.5.

Concernant la définition de plusieurs salves (donc à des angles d'incidence différents), le logiciel « SWALIS PIMA » prend en entrée une suite de valeurs de fréquences ; chacune faisant référence à un angle d'incidence donné. Les caractéristiques de chaque salve (nombre de points d'échantillonnage, nombre d'impulsions, valeurs de τ et de T_R) sont identiques pour chaque valeur de la fréquence associée à la salve. La suite de salves est ensuite reprise en boucle. Le transfert des données est effectué à la fin de chaque boucle. Le temps de transfert dépend donc de la longueur (nombre de salves) de chaque séquence.

Le logiciel « SWALIS PIMA » propose une interface simplifiée permettant pour le pilote de l'aéronef un démarrage ou un arrêt de la mesure radar en vol.

Des fenêtres supplémentaires renseignent sur :

- l'état du composant « Analog Discovery » permettant la mise en forme de signaux de commande (SSPA, SPST, centrale inertielle) ainsi que le chronogramme associé,
- la commande de la centrale inertielle assurant l'enregistrement de valeurs de marqueurs temporels (*timestamps*) à chaque début de salve.

Une autre fonctionnalité du logiciel « SWALIS PIMA » est de synchroniser pendant la mesure le fonctionnement du tiroir RF (transmission et réception des signaux RF). En effet, pendant l'émission du signal RF, il est essentiel de protéger la partie réception. De même, il est primordial d'isoler la partie réception de la partie émission lorsque le signal retour arrive sur l'antenne radar. Ce sont les signaux émis par le PNA-X (« Pulse 1 », « Pulse 2 », « Pulse 3 » et « Pulse 4 ») lors de la réalisation de la forme d'onde qui sont utilisés pour synchroniser la protection de la chaîne de réception pendant l'émission ainsi que l'isolation de la chaîne d'émission pendant la réception.

La figure 2.25 illustre une configuration en passant par l'onglet « PNAX » de l'interface « SWALIS PIMA ».

Centrale inertielle

Dans le but de géoréférencer les données radars mesurées, une centrale inertielle (IMU pour *Inertial Motion Unit*) est placée sur l'antenne du capteur SWALIS afin d'estimer la position et l'attitude de l'antenne. La centrale inertielle utilisée est de type EKINOX

3. Logiciel développé par Cécile Leconte -UR/IETR- et Paul Leroy -CNRS/OSUR

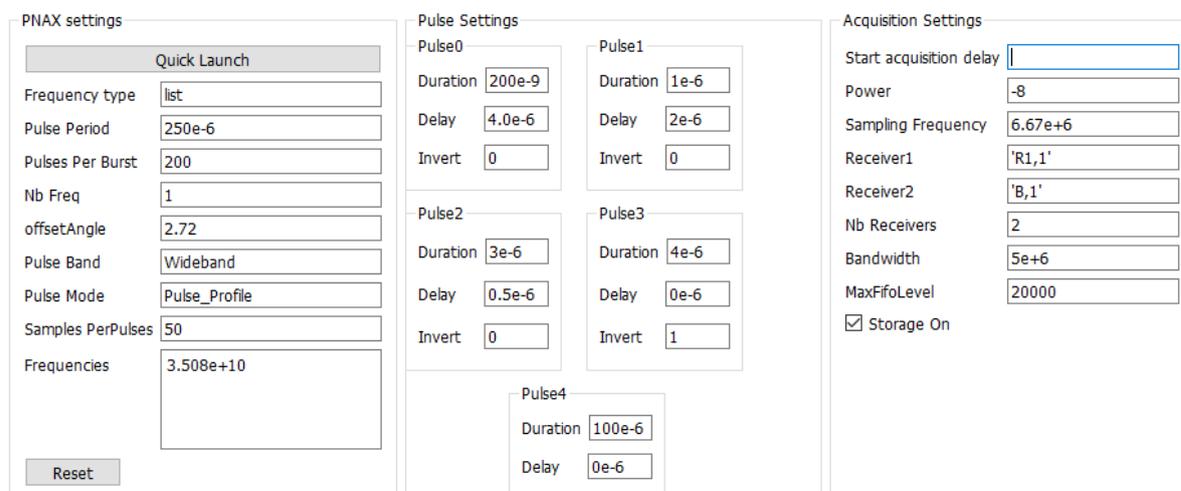


FIGURE 2.25 – Interface « SWALIS PIMA » : onglet PNA-X ouvert

SBG INS (modèle N) et fournit des informations à la fréquence de 200 Hz via différents protocoles de transfert de données (FTP, CAN, serial link). Cette centrale permet ainsi d'enregistrer toutes les données de position de l'antenne (données brutes GPS et données GPS corrigées avec un filtre de Kalman étendu) ainsi que l'attitude (roulis, tangage et lacet) et la vitesse (nord, est et verticale) pendant les vols. Les performances de l'IMU indiquent une précision sur les axes de roulis et tangage de $0,05^\circ$ RMS et de $0,1^\circ$ RMS sur l'axe du lacet. De plus, l'acquisition des données est synchronisée avec chaque rafale (voir figure 2.26). Dans notre cas d'étude, nous considérons que l'attitude de l'avion est stable pendant la durée d'une rafale (jusqu'à une valeur d'environ 100 ms soit 400 impulsions par rafale dans notre cas).

Nacelle de stabilisation

Le système de gyro-stabilisation (ou nacelle de stabilisation) est utilisé pour stabiliser l'antenne quelque soit le mouvement de l'avion. Ce système doit maintenir l'axe perpendiculaire au plan de l'antenne dans la direction du nadir. Nous estimons que l'exploitation des données de mesure est possible si la stabilisation permet de conserver l'axe perpendiculaire au nadir à $\pm 0,1^\circ$ pendant une rafale. De plus, sur une trajectoire de mesure (dimensionnée actuellement à quelques kilomètres), le faisceau doit rester sur les angles d'incidence de $\pm 0,5^\circ$. Le choix s'est donc porté sur la référence SOMAG CSM130 qui répond aux exigences de stabilisation. Le montage de cette nacelle dans le cargo-pod situé

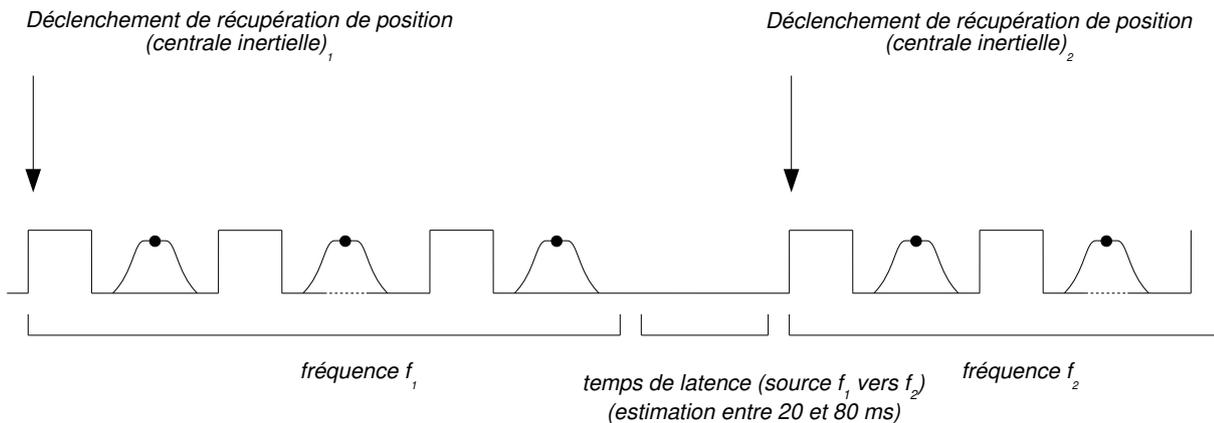


FIGURE 2.26 – Stratégie de marquage pour la centrale inertielle de l’instant de début de chaque rafale



FIGURE 2.27 – Installation de la nacelle SOMAG CSM130 dans le cargo-pod

au dessous de l’aéronef est présenté sur la figure 2.27.

Appareil photo

La prise de vue est fondamentale pour effectuer des comparaisons entre la vérité terrain et les données radar. L’appareil photo est situé dans le cargo-pod au dessous du porteur et correspond à un boîtier CANON EOS 5SDSR ayant une résolution de 50.2 méga-pixels. Il dispose d’un objectif EF24-105 mm série L et d’une carte mémoire de capacité de 128 Go correspondant à 6000 photos de haute résolution. À cet appareil est associé un kit de géoréférencement, qui permet d’associer à chaque photo une coordonnée GPS de la position de l’appareil photo.

Analog discovery

L'ensemble des signaux de commande est mis en forme par le dispositif « Analog Discovery ». Il est utilisé dans le cadre du capteur SWALIS pour cadencer l'ordre d'acquisition des photos et aussi pour indiquer à la centrale inertielle le début d'émission de chaque rafale d'impulsions.

Dans cette sous partie nous avons décrit le capteur SWALIS, son segment RF, les différents appareils connexes ainsi que son principe de fonctionnement. Le système SWALIS ainsi présenté, fera objet de calibration dans le chapitre 3. Nous passons donc à la description du second capteur.

2.2 Capteur KaRADOc

2.2.1 Description générale

Le capteur KaRADOc (*Ka Radar for ocean measurements*) est construit sur les éléments du capteur SWALIS, et fournit des éléments de mesure pour contribuer à la validation du concept SKIM (programme ESA pour Earth Explorer 9). Le capteur KaRADOc étend les performances de SWALIS pour être implémenté sur un porteur de type ATR42 pour les campagnes DRFIT4SKIM et SUMOS/SKIM afin de fournir des mesures expérimentales consolidant la méthode de mesures des courants utilisée pour SKIM.

2.2.2 Similitude SWALIS - KaRADOc

Le banc KaRADOc utilise les composantes du banc SWALIS à savoir :

- l'antenne Ka (ouverture inférieure à 2° et dépointage commandé en fréquence),
- l'analyseur vectoriel de réseaux impulsionnel (PNA-X),
- la centrale inertielle,
- les câbles de connexions,
- le poste de contrôle avec l'interface de configuration « SWALIS PIMA » .

Le montage de principe de KaRADOc est décrit sur la figure 2.28 et considère ici les éléments liés à la plateforme PIMA (campagne de tests préliminaires). De plus, le système RF et la logique de commande de KaRADOc sont entièrement conditionnés dans un rack 19 pouces. L'ensemble des signaux nécessaires à l'expérimentation est reporté en façade avant (figure 2.29). Les alimentations sont intégrées au système.

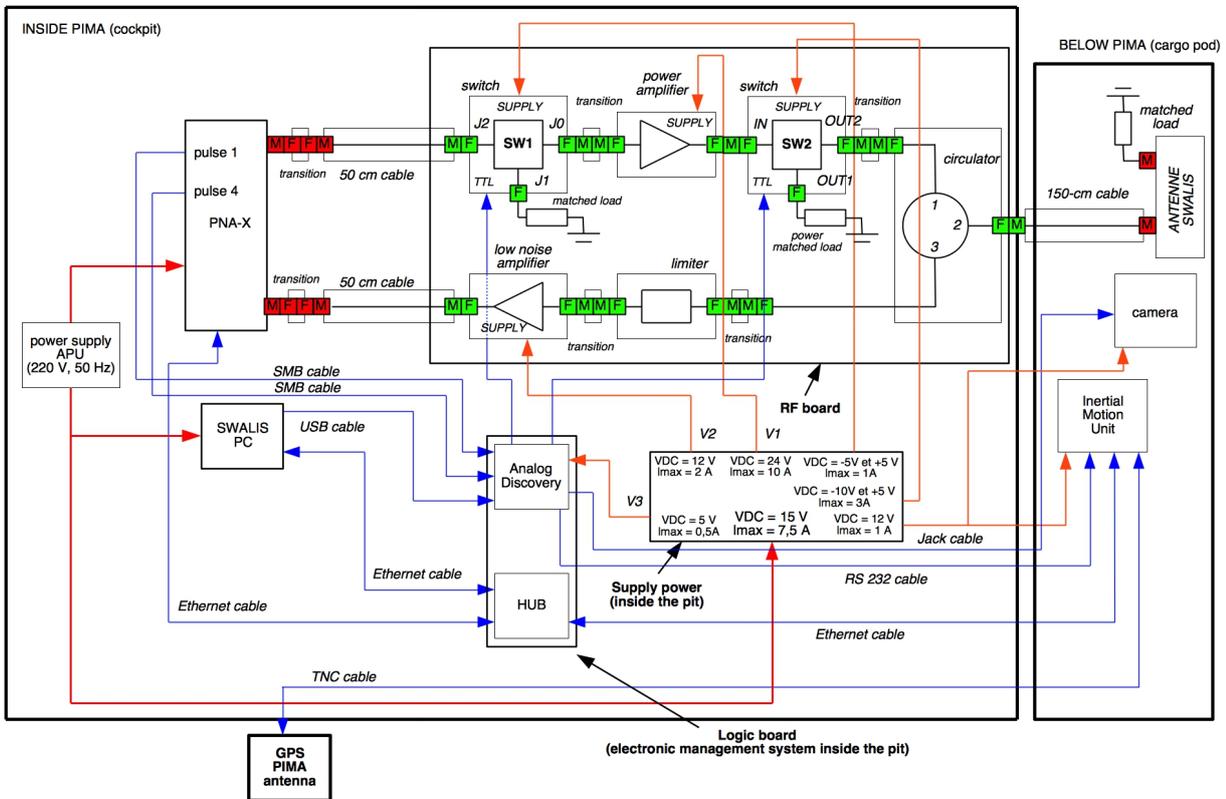


FIGURE 2.28 – Description du synoptique global de KaRADOC pour une intégration sur la plateforme PIMA



FIGURE 2.29 – Photos des vues face avant et face dessus de KaRADOC

2.2.3 Particularité de KaRADOC

2.2.3.1 Segment RF

Le système KaRADOC, présenté sur la figure 2.28, est constitué des éléments suivants :

- Un premier *switch* [CLEAR-MW - réf. S23540] assurant l'isolation entre le PNA-X et l'amplificateur de puissance. Le *switch* connecte l'entrée de l'amplificateur de puissance sur la charge adaptée 50Ω lorsque le système radar est en écoute. De même, sur la durée de l'impulsion émise, le *switch* assure l'émission du PNA-X vers l'amplificateur de puissance.
- Un amplificateur de puissance [QOTANA - réf. DBPA3832003800A] présentant un gain nominal de 40 dB et une puissance nominale de sortie à 1 dB de compression de 37 dBm. Cette puissance est transmise pendant la durée τ de l'impulsion.
- Un second *switch* [CERNEX - C2TR26404535-XX] est placé en sortie de l'amplificateur de puissance. Ce *switch* est choisi pour sa capacité à passer une puissance en continu de 37 dBm, ce qui est nécessaire considérant la puissance qui est transmise par l'amplificateur de puissance. De plus, il est aussi important d'isoler le plus possible l'amplificateur de puissance lors de la réception du signal.
- Un circulateur [MRI - WJR3] permettant l'émission du port 1 vers le port 2 pendant la transmission de l'onde et la réception du retour de cette onde du port 2 vers le port 3 pendant le temps d'écoute du radar. Les pertes d'insertion entre les ports sont de l'ordre de 1,5 dB. De même, une isolation entre les ports de transmission et de réception est mesurée à -22 dB (entre le port 1 et le port 3).
- Un limiteur [PASTERNAK - PE80L2002] permettant de limiter la puissance d'entrée sur le LNA lorsque le système est en émission. En effet, l'isolation du circulateur n'est pas parfaite (22 dB d'isolation) et l'amplificateur de puissance émet une puissance équivalente à 37 dBm.
- Un amplificateur faible bruit [SPACEK-LABS - SL375-30-10] permettant d'amplifier les signaux pendant la réception. De plus, cet amplificateur supporte en entrée une puissance typique maximale de 12 dBm. Il est donc nécessaire de le protéger par l'intermédiaire d'un limiteur. Son facteur de bruit est de typiquement 3,5 dB.

Pour la réalisation de KaRADOC, l'Analog Discovery 2 en plus du rôle évoqué dans le cadre du capteur SWALIS, permet de commander les *switches* 1 et 2 afin d'activer la chaîne d'émission lors de l'émission du signal et de la désactiver pendant la réception. Le capteur KaRADOC n'utilisant pas d'amplificateur pulsé comme le capteur SWALIS,

cette fonction de l'Analog Discovery 2 est primordiale. Elle protège donc la chaîne de réception et permet d'isoler parfaitement le signal de retour par rapport à la présence de l'amplificateur de puissance. Nous avons caractérisé le système KaRADOC en émission et en réception.

Émission

Comme pour le capteur SWALIS, nous avons mesuré le paramètre S_{21} de transmission entre le port ANT et le PORT1 du PNA-X (figure 2.20). Cette mesure est décrite sur la figure 2.30. Nous avons mesuré un gain qui varie entre 25 dB (environ) et 35 dB dans une bande comprise entre 32 GHz et 38 GHz.

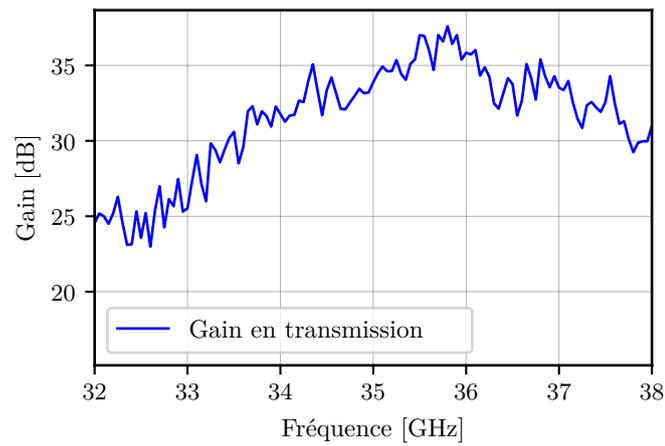
Ici aussi, la mesure de puissance en sortie du module RF est un paramètre important pour le système radar dans le cadre de mesures aéroportées. Dans la configuration du système KaRADOC, cette puissance a aussi une importance puisque l'amplificateur de puissance n'est pas un système pulsé et il est donc nécessaire de pouvoir isoler la partie émission de la partie réception pendant le temps d'écoute (comme indiqué ci-dessus). Cette mesure est aussi présentée sur la figure 2.30 et cette puissance maximale de sortie du module RF tient compte du point de compression de l'amplificateur QOTANA. Des variations autant sur le gain que sur la puissance de sortie sont mesurées en considérant la puissance émise par le PNA-X.

Réception

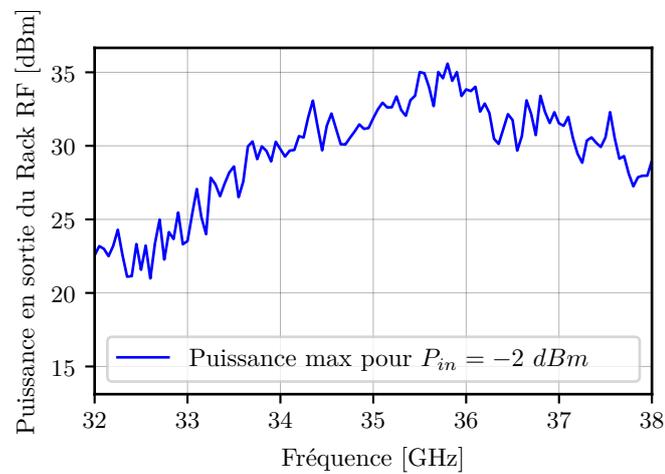
De nouveau, la mesure de la chaîne de réception est nécessaire pour anticiper la performance de la chaîne de réception. Cette chaîne de réception doit pouvoir être suffisamment sensible pour mesurer les signaux présents sur l'antenne et ne pas être « aveuglée » par l'amplificateur de puissance pendant la phase de réception. Ici aussi, il s'agit pour le PNA-X de placer le seuil de sensibilité en adéquation avec la dynamique du signal mesuré. En suivant les mêmes opérations de mesure que pour le gain en émission, nous mesurons le gain en réception supérieur à 25 dB (figure 2.31) avec -toujours- des variations présentes sur la mesure du gain.

2.2.3.2 Utilisation de l'antenne dans le cadre de KaRADOC

Dans la configuration KaRADOC, l'antenne est dépointée mécaniquement de 10° dans le plan H. Ce dépointage est positif en pointant vers la gauche du porteur. Ce dépointage



(a) Gain en transmission du segment RF du capteur KaRADOc



(b) Puissance délivrée le segment RF de KaRADOc

FIGURE 2.30 – Mesures de la transmission du segment RF KaRADOc

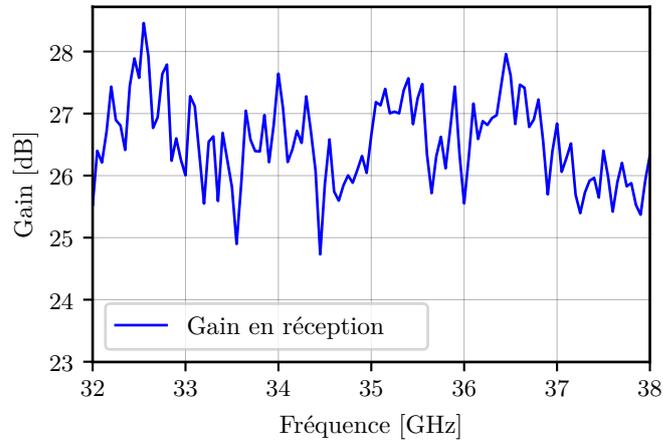


FIGURE 2.31 – Gain réception du segment RF du capteur KaRADOC

est obtenu par l'intermédiaire d'une bassine sur laquelle l'antenne est fixée. Il n'y a donc pas de compensation des mouvements du porteur.

Conclusion

Dans ce chapitre, les capteurs SWALIS et KaRADOC ont fait objet d'une description complète et précise allant de la partie RF aux équipements annexes.

Les deux systèmes ont une architecture globale similaire et ne diffèrent que sur leur chaîne RF de même que leur gamme d'angles de dépointage nominaux en conditions opérationnelles.

Ces capteurs ainsi définis, conçus, caractérisés et fonctionnels sont en mesure d'opérer des campagnes de mesures océan ou de zones hydrologiques continentales. Les données obtenues font l'objet de nombreux traitements qui seront décrits au chapitre 3. Afin de pouvoir exploiter de manières significatives les données que ces capteurs vont acquérir il faudra passer par l'étape primordiale de la calibration de ces derniers.

TRAITEMENTS DES DONNÉES

Sommaire

3.1	Acquisition et format des données	83
3.1.1	Définition de la mesure	83
3.1.2	Caractéristique d'une rafale	84
3.2	Calibration des capteurs	85
3.2.1	Dispositif de mesure	86
3.2.1.1	Installation	86
3.2.1.2	Mesure de l'adaptation	87
3.2.1.3	Cibles calibrées	90
3.2.2	Modèle de calibration	91
3.2.3	Opérations de calibration	94
3.2.3.1	Procédure de traitement des données de calibration .	94
3.2.3.2	Détermination des coefficients de calibration	95
3.2.3.3	Détermination des coefficients de calibration pour le capteur KaRADOC	100
3.3	Correction de la position de l'empreinte	102
3.3.1	Les angles d'attitude	102
3.3.2	Prise en compte des angles d'attitudes	103
3.3.2.1	Prise en compte du roulis	105
3.3.2.2	Prise en compte du tangage	106
3.3.2.3	Matrice de transformation	108
3.3.3	Obtention de l'incidence locale réelle	108
3.4	Détermination de la valeur de σ_0	110
3.4.1	Estimation de la distance de visée	110
3.4.1.1	Estimation par la méthode dite directe	110

3.4.1.2	Estimation de la distance de visée par la méthode in-	
	directe	111
3.4.2	Calcul de l'aire	112
3.5	Définition et quantification des postes d'erreur	115
3.5.1	Équation radar et puissance reçue	115
3.5.2	Contribution des différents postes d'erreur	117
3.5.2.1	Notation et méthode de calcul	117
3.5.2.2	Contribution de la puissance mesurée P_{rm}	118
3.5.2.3	Contribution de la distance de visée	118
3.5.2.4	Contribution des coefficients de calibration α et β	119
3.5.2.5	Contribution de l'empreinte radar	119
3.5.3	Quantification des postes d'erreur	119
3.5.3.1	Quantification de l'erreur liée à la puissance mesurée P_{rm}	120
3.5.3.2	Quantification de l'erreur liée à l'estimation de la dis- tance de visée	123
3.5.3.3	Quantification de l'erreur liée aux coefficients de cali- bration α et β	125
3.5.3.4	Quantification de l'erreur liée à l'empreinte radar	130
3.5.4	Erreur sur la mesure de σ_0	131

Introduction

Dans le chapitre 2, nous avons donné une description détaillée des capteurs KaRADOC et SWALIS. Ces capteurs sont opérationnels pour fournir des mesures radar pour les campagnes à venir à savoir la puissance reçue lors d'un survol d'une zone choisie (eau continentale ou océan). Avant de pouvoir exploiter ces données, il est essentiel de les acquérir (signal brut directement mesuré sur la réception radar fournissant les données L0), de les calibrer et de les traiter ; ce qui permet d'avoir des données L1. Avant d'obtenir ce niveau de traitement, il est essentiel de comprendre la physique de l'acquisition pour n'extraire que l'information provenant de la rétrodiffusion des zones éclairées. Dans l'annexe A, nous décrivons alors les capacités de mesure des différentes plate-formes utilisées pour les expérimentations SWALIS et KaRADOC.

Nous procédons maintenant à la description des données radar. La première étape correspond à la fourniture des données dites de niveau « L0 » pour ensuite fournir l'ensemble de ces données au niveau « L1 » en intégrant l'ensemble des paramètres d'acquisition.

3.1 Acquisition et format des données

Le système d'acquisition des capteurs est décrit à la section 2.1.3.3 . Nous rappelons que ce système d'acquisition est conçu autour d'un analyseur vectoriel de réseaux KEYSIGHT de type PNA-X 40 GHz pulsé (référence N5224B). Nous rappelons qu'il est utilisé en mode *pulse profile* et que ce mode permet d'envoyer une succession d'impulsions avec une fréquence de répétition bien définie.

3.1.1 Définition de la mesure

Le principe de la mesure consiste à effectuer un échantillonnage du signal en bande de base présent sur le port de réception du PNA-X (et avec la possibilité d'une acquisition simultanée sur le port d'émission de ce même PNA-X) à une certaine fréquence d'échantillonnage. Cette fréquence d'échantillonnage est fixée par la largeur IF du filtre d'entrée et que cette même largeur IF détermine le seuil de sensibilité du récepteur (voir table 2.6). Les figures 2.3 et 2.7 illustrent respectivement le format des impulsions émises et comment l'impulsion reçue est échantillonnée.

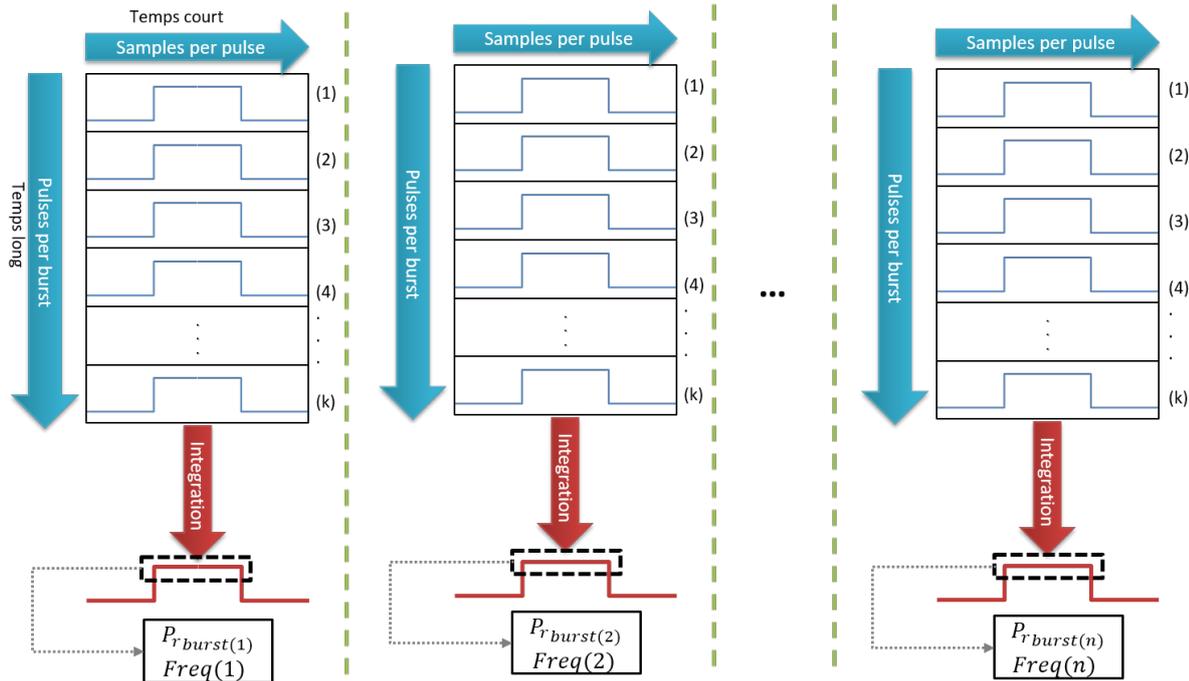


FIGURE 3.1 – Description du processus de traitement de données.

3.1.2 Caractéristique d'une rafale

La succession de N_p impulsions émises, constituant une rafale, permet de mesurer le même nombre N_p d'échos. Les échos reçus sont donc sommés de manière cohérente pour une même rafale afin d'extraire une puissance moyenne par rafale (voir figure 3.1). Les échos reçus sont en volts, ainsi la puissance est donnée par le carré du module. Cette puissance extraite, caractérisant la rafale (ainsi que la fréquence porteuse donc l'angle d'incidence) est la puissance moyenne rétrodiffusée pour l'ensemble de la zone illuminée par toutes les impulsions de la rafale (pour rappel, le principe de ces zones d'illumination est fournie sur la figure 2.4). Plusieurs rafales sont ainsi acquises pendant un enregistrement. Si, lors de cet enregistrement, la fréquence porteuse des rafales est identique, nous parlons d'acquisition à mono-incidence. Dans le cas contraire, il s'agit d'acquisition à multi-incidences (mode *scanning*).

Nous rappelons aussi que, pour chaque rafale, sont associées des données provenant de la centrale inertielle (IMU) qui sont mesurées lors de l'émission de la toute première impulsion de la rafale (voir figure 2.26). Ces données IMU correspondent aux données de position, d'attitude et de navigation essentielles à prendre en compte dans la suite des traitements.

Nous pouvons donc résumer la caractérisation d'une rafale par :

- une puissance moyenne mesurée P_{rm} obtenue après intégration cohérente des impulsions qui le constituent
- une fréquence d'émission donnée qui implique
 - un angle d'incidence
 - une ouverture d'antenne dans le plan E
 - une ouverture d'antenne dans le plan H
- une position qui implique
 - une longitude
 - une latitude
 - une altitude
- une attitude qui implique
 - un angle de roulis
 - un angle de tangage
 - un angle de lacet
- les données de navigation complémentaires (vitesse, accélération, etc..)

Ainsi, à partir de la mesure de la puissance rétrodiffusée par la zone illuminée et mesurée, il est nécessaire de calibrer le système radar (SWALIS et KaRADOC) afin de relier la puissance mesurée à la SER de cette zone et ensuite déduire le coefficient de rétrodiffusion σ_0 .

3.2 Calibration des capteurs

Les systèmes SWALIS et KaRADOC effectuent des mesures radar et enregistrent la puissance reçue à la sortie du PNA-X. Il est donc nécessaire d'effectuer une opération de calibration afin de pouvoir lier cette puissance mesurée à une valeur de surface équivalente radar (SER) à l'aide d'une cible calibrée [80]. En tenant compte des conditions de mesure (durée de l'impulsion, fréquence de répétitions), il est nécessaire de faire la mesure en extérieur sur le site de la plate-forme MERISE (voir l'annexe A.1.1).



FIGURE 3.2 – Configuration géographique pour les opérations de calibration (extrait Google Earth).

3.2.1 Dispositif de mesure

3.2.1.1 Installation

La station MERISE dispose d'une tour d'une quinzaine de mètres de hauteur sur laquelle il est possible de placer les capteurs SWALIS et KaRADOC. Comme décrit sur la figure 3.2, le système radar vise donc une cible calibrée et située à une distance R_0 de 351 mètres (distance mesurée au télémètre laser) et dans une direction respectant la condition de l'ellipsoïde de Fresnel dégagée. Cela permet d'assurer la propagation en espace libre comme illustré à la figure 3.3. Pour la fréquence $f = 30$ GHz, la largeur $2r$ de l'ellipsoïde de Fresnel [81] est égale à :

$$2r \approx \sqrt{\lambda \cdot R_0} = 1,88 \text{ mètre}$$

ce qui est largement suffisant compte-tenu de l'espace situé entre les 2 bosquets (nord-est et sud-ouest), voir figure 3.2. Il est à noter que l'antenne est orientable en angle d'azimut et d'élévation par des moteurs pas à pas asservis d'une précision d'un millièbre de degré. Elle est aussi munie d'un viseur numérique à pointeur laser pour diriger l'antenne dans la direction de la cible. Le poteau supportant la cible calibrée a une hauteur de 8 mètres. Pour notre campagne de calibration, nous utilisons des cibles calibrées de type trièdre

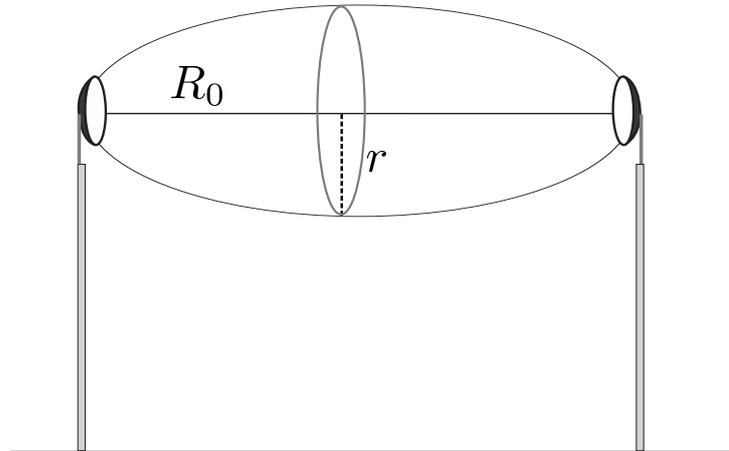


FIGURE 3.3 – Illustration de l’ellipsoïde de Fresnel [81].

comme illustré à la figure 3.4. Sur la figure 3.5, nous décrivons le banc de mesure utilisé pour les opérations de calibration. Sur la figure 3.5a, nous observons le mât au-dessus duquel se trouve le trièdre de calibration. Des élingues soutiennent le mât afin d’éviter tout mouvement du trièdre. Sur la figure 3.5b, nous avons l’antenne radar (SWALIS ou KaRADOCC) placée sur un mât orientable en site et en azimut. Sur l’antenne se trouve le viseur pointant vers le trièdre à 351 mètres de distance. Au pied de ce mât, nous avons le tiroir RF (SWALIS ou KaRADOCC) et le PNA-X.

3.2.1.2 Mesure de l’adaptation

Afin de confirmer les fréquences pour lesquelles nous avons la meilleure adaptation de l’antenne en conditions extérieures de mesure, nous mesurons d’adaptation avec le paramètre S_{11} sur 801 points dans la bande [32 GHz ; 39 GHz]. Nous effectuons aussi cette mesure sur les port 1 et port 2 de l’antenne. Les résultats sont donnés sur la figure 3.6. Il faut noter que cette mesure est indépendante du tiroir RF (SWALIS ou KaRADOCC). Nous constatons que l’antenne est correctement adaptée sur les 2 ports en considérant que l’autre port est chargé avec une charge de 50Ω . Toutefois, nous avons une différence sur le port 1 qui présente un niveau d’adaptation en moyenne autour de -15 dB mais avec des oscillations dans la bande d’intérêt. Pour le port 2, la valeur du S_{11} est plus stable mais se trouve autour d’une valeur moyenne de -15 dB (pour des fréquences inférieures à 36 GHz) et de -10 dB (pour une bande autour de 37 GHz). Ces résultats confirment le choix d’utilisation du port 2 déjà effectué au paragraphe 2.1.3.1.



FIGURE 3.4 – Exemple d’un trièdre utilisé pour les opérations de calibration.

Cette mesure de paramètre S_{11} renseigne sur le choix des fréquences de fonctionnement pour lesquelles l’antenne présente la meilleure adaptation. Les expérimentations se concentrent donc sur les fréquences pour lesquelles nous avons une bonne adaptation, soit $S_{11dB} \leq -10 \text{ dB}$.

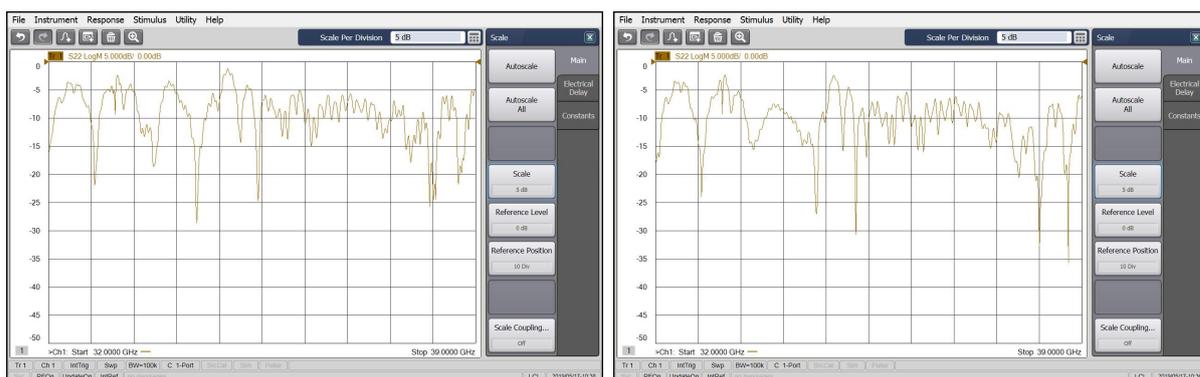
Pour la calibration et les premières expérimentations avec l’antenne utilisée pour les capteurs SWALIS ou KaRADOCC, la configuration choisie correspond à une incidence nadir (0°) entourée de 2 incidences équivalentes (environ $\pm 1,49^\circ$) de part et d’autre. Les autres angles d’incidence sont choisis pour couvrir une gamme de dépointage allant jusqu’à au moins 6° . Lorsque nous effectuons la correspondance entre les angles de dépointage de l’antenne en fonction de la fréquence et le choix de la gamme des angles d’incidence, nous choisissons un angle de $-2,6^\circ$ comme angle de référence nadir. Cette nouvelle référence nadir est obtenue mécaniquement par l’insertion d’une cale sur le support de l’antenne pour compenser ce décalage de $-2,6^\circ$.

La correspondance des angles de dépointage avec les fréquences d’illumination nous permet d’obtenir le plan de fréquence pour les mesures radar en fonction de l’angle d’illumination, comme indiqué par la table 3.1. Pour le tiroir RF de KaRADOCC, les mêmes fréquences sont choisies tout en sachant que les angles de dépointage subissent un décalage de 10° , il opère avec une incidence autour de 10° .



(a) Trièdre placé sur un mât (hauteur de 8 mètres). (b) Antenne radar située sur la plate-forme à 15 mètres de hauteur

FIGURE 3.5 – Description du banc de mesures de calibration.



(a) Port 1

(b) Port 2

FIGURE 3.6 – Mesures des paramètres S_{11} pour les ports 1 et 2 de l'antenne SWA-LIS/KaRADOC

f_i (GHz)	32,75	33,63	36,64	35,08	35,29	35,45	35,86	36,5	36,75	37,48	37,97	38,29	39,18
θ_i (sans cale)	-4,23	-2,74	-0,77	0,15	0,46	0,97	1,77	2,96	3,62	4,92	5,75	6,2	7,77
θ_i (avec cale)	-1,63	-0,14	1,83	2,75	3,06	3,57	4,37	5,56	6,22	7,52	8,35	8,8	10,37

TABLE 3.1 – Tableau des fréquences choisies : angle de dépointage et angle d’incidence associés dans la configuration SWALIS

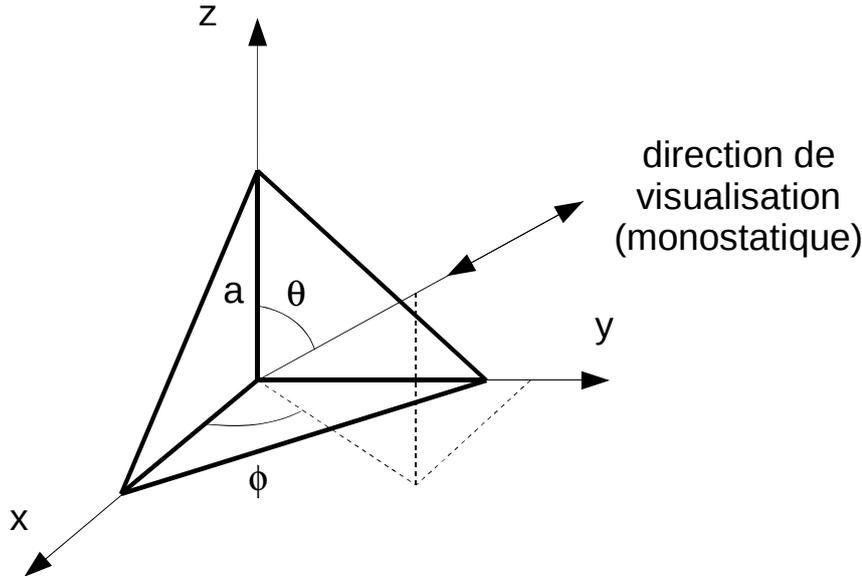


FIGURE 3.7 – Références cartésiennes et angulaires d’un trièdre.

3.2.1.3 Cibles calibrées

L’opération de calibration consiste à déterminer pour une valeur donnée de SER d’une cible canonique (dans notre cas, un trièdre à base triangulaire comme décrit sur la figure 3.4) dont l’ouverture à -3 db est de 40° (figure 3.8), les coefficients de calibration. Ces coefficients de calibration relient pour une fréquence f_i , la puissance P_r mesurée par le système SWALIS (ou le système KaRADOC) et la SER σ et sont décrits dans le paragraphe 3.2.2.

À la fréquence $f_i = c/\lambda_i$ et pour un trièdre de longueur d’arête intérieure a (voir figure 3.7), la SER σ maximale de ce trièdre est donnée par [23] :

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda_i^2}$$

Cette SER maximale est obtenue pour :

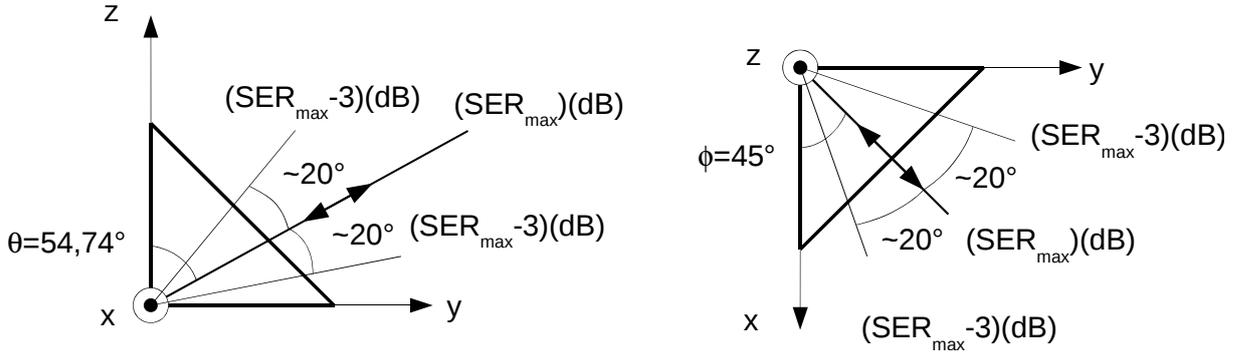


FIGURE 3.8 – Directions particulières pour la détermination de la SER_{max} et SER à -3 dB

$$\begin{cases} \theta = 54,74^\circ \\ \phi = 45^\circ \end{cases}$$

Pendant les mesures de calibration, l'axe radioélectrique de la cible est aligné avec celui de l'antenne. Cet alignement des axes radio-électriques de l'antenne et du trièdre se fait à l'aide d'un viseur optique laser placé sur l'antenne et d'un autre placé sur le trièdre uniquement au moment de l'opération de positionnement.

La figure 3.9 illustre les SER des différents trièdres utilisés pour la fréquence de calibration maximale de 39,18 GHz et minimale de 32,75 GHz et indique que les valeurs de SER sont comprises entre 5,4 m^2 et 4464 m^2 . Le choix de la dimension des trièdres s'effectue en fonction des puissances mesurées lors des campagnes tests antérieures à cette campagne de calibration. Pour la valeur du filtre IF de 15 MHz, nous avons des puissances reçues qui s'étalent de -54 dBm à -10 dBm pour des mesures terrain. A posteriori, cette plage de puissances mesurées sur le terrain correspond à celle qui est obtenue avec les trièdres choisis lors de la calibration (de -51 dBm (soit 7,94 nW) à -9 dBm (soit 0,126 mW)) comme décrit sur la figure 3.13.

3.2.2 Modèle de calibration

Les opérations de calibration sont à considérer dans un contexte particulier. En effet, la calibration doit permettre d'associer la puissance mesurée par le système SWALIS (ou KaRADOC) en conditions opérationnelles à une puissance rétrodiffusée par une surface (σ_0 en m^2/m^2). Cette association est rendue possible avec la calibration qui utilise un trièdre dont la SER est connue et qui modélise la rétrodiffusion de la surface par l'inter-

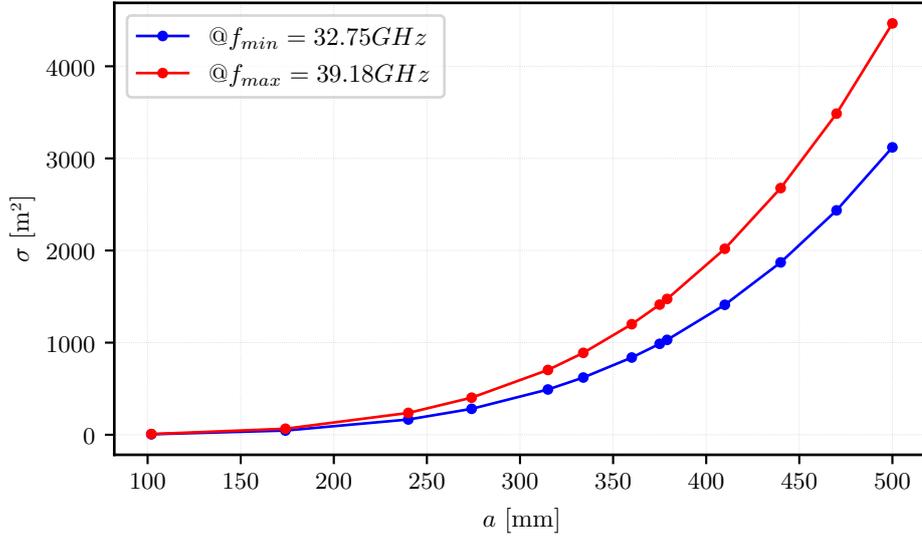


FIGURE 3.9 – SER des trièdres utilisés pour la calibration pour les valeurs des fréquences décrites dans le tableau 3.1

médiaire d'un modèle de point brillant.

Lors de la calibration, la mesure doit considérer la puissance minimale β_{IF} mesurable par le PNA-X et imposée par le filtre IF choisi. Cette puissance correspond à une valeur de σ égale à σ_{IF} . La puissance $\beta_{i(ENV)}$ (à la fréquence f_i) correspond à l'environnement seul et est liée à une surface équivalente de σ_{ENV} . La puissance P_{ri} du signal réfléchi par le trièdre dans son environnement est mesurée pour chaque valeur de fréquence f_i . La figure 3.10 décrit ces deux aspects de la mesure (environnement et environnement avec le trièdre).

La calibration est une opération basée sur l'équation du radar (équation 1.1) et qui s'établit pour une fréquence f_i et pour une distance R_0 . En conditions opérationnelles, nous avons la relation décrivant la puissance reçue P_{ri} :

$$P_{ri} = \alpha_{ci} \cdot \sigma + \beta_{ci} \quad (3.1)$$

La variable β_{ci} est la somme du retour de l'environnement $\beta_{i(ENV)}$ (environnement dans lequel est placé le trièdre) mesuré à la fréquence f_i et du seuil minimal β_{IF} mesurable par le PNA-X et imposé par le filtre IF choisi. La figure 3.11 décrit le principe de la calibration. Sur cette figure, nous voyons qu'il n'est pas possible d'accéder à des valeurs de SER qui

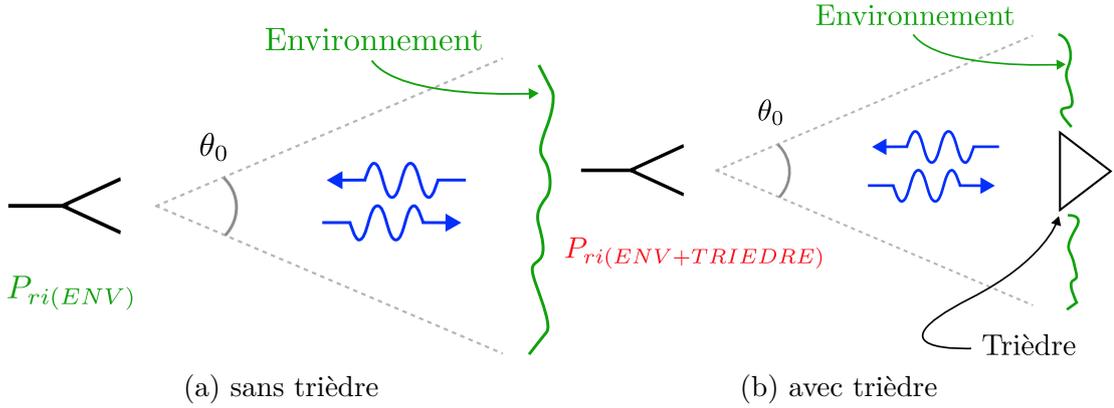


FIGURE 3.10 – Configuration pour la calibration en considérant l’environnement de mesure.

sont inférieures à σ_{IF} (seuil de sensibilité du capteur SWALIS, dépendant du filtre IF choisi voir section 2.1.3.3). De plus, pour des valeurs comprises entre σ_{IF} et $\sigma_{(ENV)}$, il n’est pas possible d’effectuer des mesures de calibration car nous sommes limités par l’environnement. La courbe de calibration accessible pendant les opérations de calibration est décrite en bleu (trait continu épais). Pour chaque trièdre, nous mesurons la puissance reçue P_{ri} . Une opération de régression linéaire nous permet d’obtenir les coefficients α_{ci} et β_{ci} . Nous utilisons une série de trièdres pour avoir plus de points possibles par lesquels passe une droite de régression.

La distance R_0 est la distance de référence qui est celle mesurée pour la calibration : dans notre cas, $R_0 = 351$ m. Lorsque nous effectuons une mesure à la distance R_m , nous obtenons la puissance P_{rm} :

$$P_{rm} = \frac{P_e G_e^2(\theta, \phi) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_m^4 L_i} \sigma_m + \beta_i$$

qu’il est possible de décrire sous la forme :

$$P_{rm} = \frac{\alpha_i}{R_m^4} \sigma_m + \beta_i$$

avec $\alpha_i = R_0^4 \alpha_{ci}$. La SER associée σ_m est donc calculée à partir de la relation :

$$\sigma_m = \frac{P_{rm} - \beta_{IF}}{\alpha_{ci} \cdot R_0^4} \cdot R_m^4 \quad (3.2)$$

En conditions opérationnelles, l’équation (3.2) permet d’obtenir σ_m à partir des valeurs

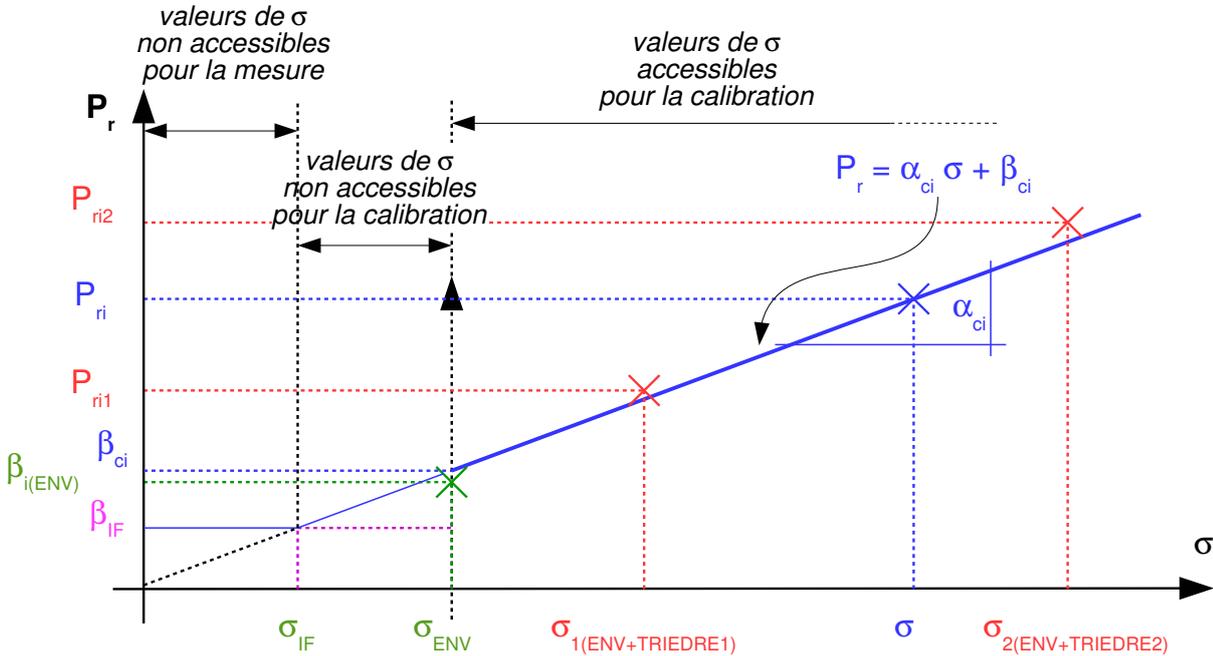


FIGURE 3.11 – Principe de calibration

de α_{ci} obtenues pendant l'étape de calibration et la distance de visée R_m du système radar pendant la mesure et $\beta_{(IF)}$ qui correspond à la valeur seuil minimal mesurable par l'appareil de mesure, PNA-X. Le but de l'opération de calibration est de déterminer les coefficients α_{ci} et β_{ci} à une distance donnée R_0 .

Il faut noter que pour trouver σ_m en conditions de vol, la grandeur $\beta_{(IF)}$ est utilisé au lieu de β_{ci} car dans ce cas de mesure, l'ensemble de l'environnement est mesuré c'est-à-dire inclus dans σ_m .

3.2.3 Opérations de calibration

Le dispositif et le modèle étant exposé plus haut, il faut expliquer comment les données sont prises en compte et préparées pour récupérer les coefficients qui permettront de faire la calibration de nos mesures radar sur une campagne aéroportée.

3.2.3.1 Procédure de traitement des données de calibration

De manière générale, une rafale est caractérisée pour une succession de N_p impulsions, par une fréquence f_i et aussi, bien évidemment, par une scène mesurée. Ces successions d'impulsions sont ensuite intégrées afin de récupérer une puissance moyenne unique cor-

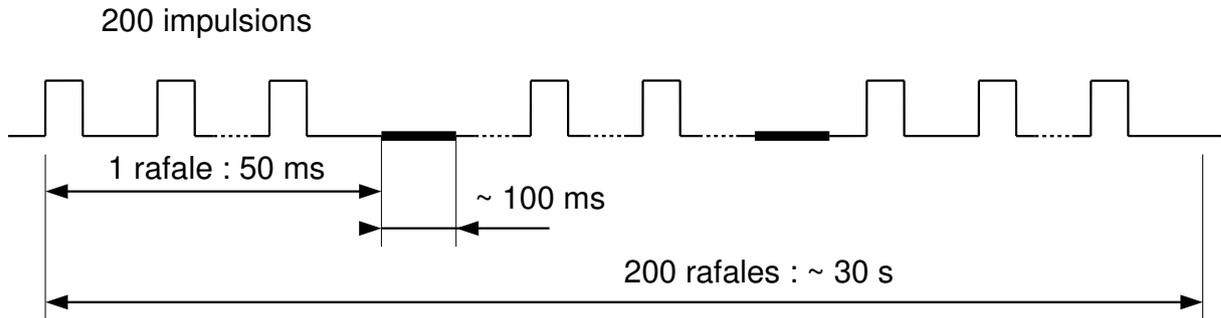


FIGURE 3.12 – Chronogramme pour l'enregistrement d'un fichier de mesure

respondant à une fréquence et une scène (figure 3.1).

Dans le cas particulier de la calibration, nous avons les hypothèses suivantes :

- les scènes mesurées sont hypothétiquement identiques (le même trièdre),
- une unique fréquence par enregistrement (record),
- une moyenne des puissances reçues par rafale (burst),
- une puissance moyenne mesurée par enregistrement,
- 200 rafales de 200 impulsions (soit 40000 impulsions).

Pour un enregistrement donné, nous associons la mesure d'un trièdre pour lequel nous obtenons une puissance mesurée à une fréquence donnée. Nous décrivons sur la figure 3.12 le chronogramme lié à un signal de calibration. Cette mesure est effectuée à une valeur de fréquence donnée donc un angle de dépointage donnée. Elle est répétée pour chaque fréquence (donc chaque angle de dépointage) et pour chaque trièdre.

3.2.3.2 Détermination des coefficients de calibration

Nous effectuons ensuite une mesure de la puissance reçue lorsque l'axe radioélectrique de l'antenne radar pointe vers le trièdre. Ces conditions et paramètres de mesure pour la calibration sont identiques à celles choisies ultérieurement pour les mesures durant les campagnes SWALIS (pour le tiroir RF SWALIS).

Coefficient pour un filtre IF de 15 MHz Les grandeurs de mesure sont les suivantes :

- la durée de l'impulsion : $\tau = 1 \mu s$,
- la puissance de sortie du PNA-X : -8 dBm,
- la largeur de bande du filtre IF à la réception : 15 MHz,
- le nombre d'échantillons par impulsion : $N_{\Delta T} = 50$,
- le nombre d'impulsions par rafale : $N_p = 200$.

Pour chaque fréquence et chaque trièdre, nous effectuons une mesure pendant une durée suffisante permettant d'enregistrer environ 200 rafales ou bursts (soit 200×200 impulsions). Nous présentons sur la figure 3.13 les puissances mesurées pour toutes les fréquences et tous les trièdres. La puissance reçue par trièdre est donc la moyenne des puissances reçues des 200 bursts.

$$P_r = \frac{1}{N_{burst}} \sum_{i=0}^{N_{burst}} P_{rbi}$$

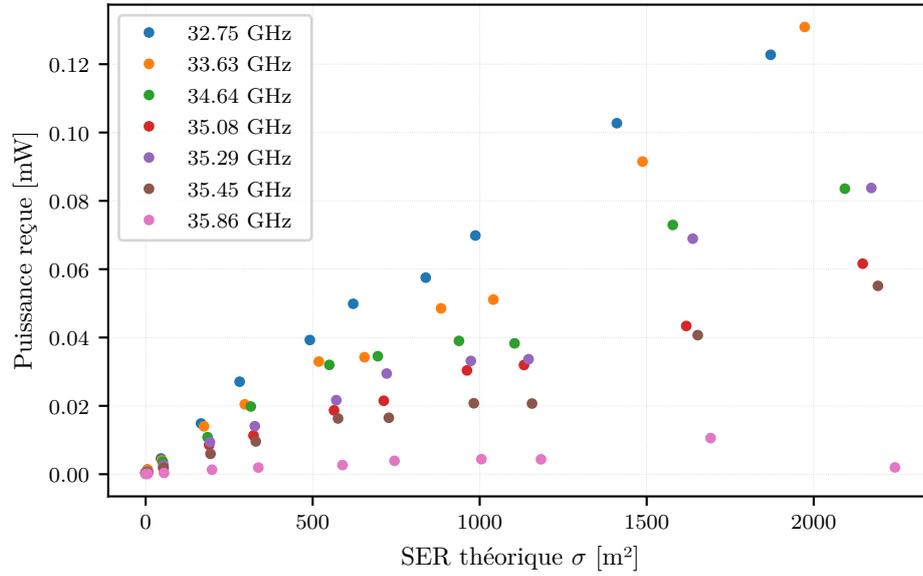
Afin de rendre compte de l'étalement des données de puissance et de la linéarité de la loi décrivant la puissance reçue en fonction de la SER, nous divisons les tracés en 2 parties : une première partie (figure 3.13a) est dédiée à la partie basse de la bande de fonctionnement (de 32,75 GHz à 35,86 GHz) et une seconde partie (figure 3.13b) dédiée à la partie haute de la bande de fréquence (de 36,5 GHz à 39,18 GHz). Cette différence d'ordre de grandeur des puissances reçues dans ces deux sous bandes de fréquences ci-dessus, est en concordance avec le gain de l'antenne qui est plus important dans la bande basse de fonctionnement c'est-à-dire inférieure à 36,3 GHz (figure 2.15).

À partir de ces mesures, il est possible de décrire une relation linéaire entre les puissances mesurées et les valeurs de SER pour retrouver la relation de calibration décrite par l'équation (3.1). Sur la figure 3.14, nous décrivons un exemple de régression linéaire [82] pour la fréquence de 35,08 GHz. Nous obtenons alors les coefficients de calibration pour 15 MHz (table 3.2). Ces coefficients de calibration sont obtenus en utilisant le module « LinearRegression » de « SciKit-Learn » une librairie de Python [82]. Il nous donne les coefficients de calibration α_{ci} et β_{ci} évoqués à l'équation 3.1 avec un coefficient de détermination de prédiction (score s) de donnée par la formule :

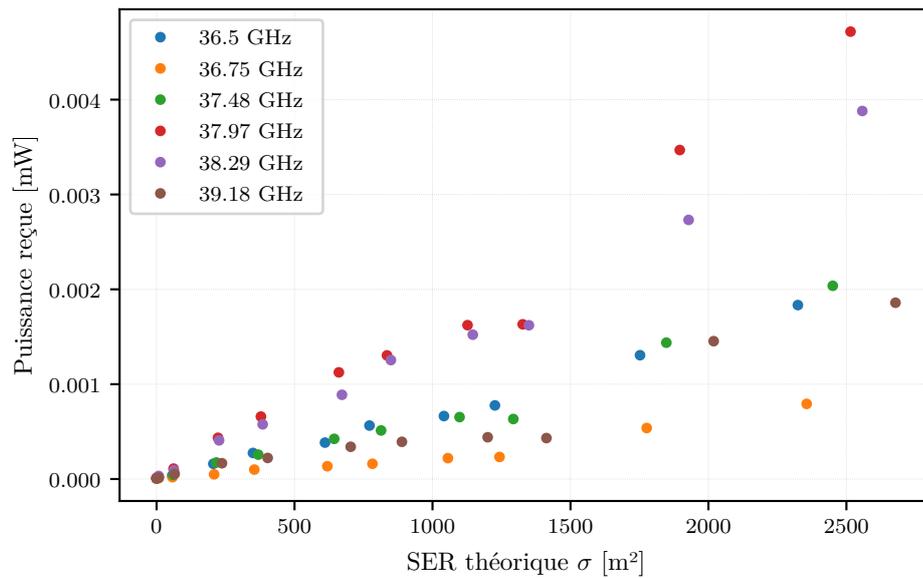
$$s = 1 - \frac{\sum (P_{rtrue} - P_{rpred})^2}{\sum (P_{rtrue} - \langle P_{rtrue} \rangle)^2}$$

où P_{rpred} est la puissance calculée en partant des coefficients obtenus par la régression linéaire et $\langle P_{rtrue} \rangle$ la moyenne des puissances mesurées en entrée du modèle. Le meilleur score est $s=1$.

Pour cette campagne de mesures, nous effectuons les mêmes opérations pour les filtres IF de 5 MHz et 1 MHz.



(a) Puissance reçue en fonction de la SER des trièdres (début de bande)



(b) Puissance reçue en fonction de la SER des trièdres (fin de bande)

FIGURE 3.13 – Puissance reçue en fonction de la SER des trièdres pour un filtre IF de 15 MHz

Coefficient pour un filtre IF de 5 MHz Les caractéristiques de mesure sont données par :

- la durée de l'impulsion : $\tau = 1 \mu s$,

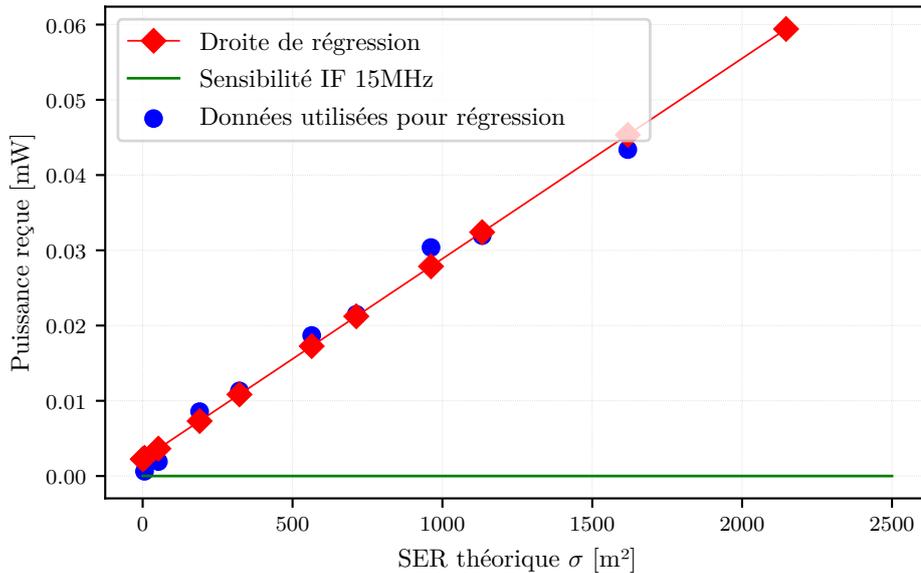


FIGURE 3.14 – Régression linéaire pour la fréquence de 35,08 GHz pour un filtre IF de 15 MHz.

- la puissance de sortie du PNA-X : -8 dBm,
- la largeur de bande du filtre IF à la réception : 5 MHz,
- le nombre d'échantillons par impulsion : $N_{\Delta T} = 50$,
- le nombre d'impulsions par rafale : $N_p = 200$.

De la même manière qu'avec le filtre de 15 MHz, nous obtenons alors les coefficients de calibration pour 5 MHz qui sont présentés sur la table 3.3.

Coefficient pour un filtre IF de 1 MHz Pour le filtre IF de 1 MHz, nous adaptons les caractéristiques du signal émis car la période d'échantillonnage est « importante » (720 ns) ce qui implique une durée d'impulsion importante mais limitée car la distance de visualisation est « petite » (351 m). Ces caractéristiques sont données par :

- la durée de l'impulsion : $\tau = 1,6 \mu s$,
- la puissance de sortie du PNA-X : -8 dBm,
- la largeur de bande du filtre IF à la réception : 1 MHz,
- le nombre d'échantillons par impulsion : $N_{\Delta T} = 10$,
- le nombre d'impulsions par rafale : $N_p = 200$.

Nous obtenons les coefficients de calibration pour un filtre IF de 1 MHz donnés dans la table 3.4. L'analyse de ces 3 tableaux nous montre un très bon ajustement entre

fréquence (GHz)	α_{ci} (mW.m ⁻²)	β_{ci} (mW)	β_{ENV} (mW)	Score (%)
32.75	6.969136e-05	0.003258	0.000408	99.27
33.63	5.571097e-05	0.001495	0.000457	97.46
34.64	4.112490e-05	0.003204	0.000469	94.83
35.08	2.662784e-05	0.002247	0.000264	98.79
35.29	3.740210e-05	0.000331	0.000326	95.26
35.45	2.178385e-05	0.001005	0.000236	95.29
35.86	5.320580e-06	-0.000142	0.000051	90.96
36.5	6.994422e-07	-0.000004	0.000007	98.49
36.75	2.606145e-07	-0.000014	0.000004	91.58
37.48	6.788303e-07	-0.000018	0.000009	93.28
37.97	1.618209e-06	-0.000019	0.000014	94.67
38.29	1.332132e-06	0.000033	0.000008	98.69
39.18	5.672659e-07	-0.000047	0.000006	80.45

TABLE 3.2 – Fréquences d’émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 15 MHz, $\beta_{s(IF)} = 19.9526 \times 10^{-7}$ mW (SWALIS).

fréquence (GHz)	α_{ci} (mW.m ⁻²)	β_{ci} (mW)	β_{ENV} (mW)	Score (%)
32.75	6.578261e-05	0.003535	0.000368	99.28
33.63	5.058404e-05	0.002498	0.000352	98.91
34.64	3.797520e-05	0.003156	0.000412	95.15
35.08	2.436083e-05	0.002410	0.000199	97.82
35.29	3.388268e-05	0.000845	0.000281	95.31
35.45	2.097978e-05	0.000933	0.000259	96.64
35.86	5.134322e-06	-0.000130	0.000055	92.55
36.5	6.823074e-07	-0.000009	0.000005	98.009
36.75	2.828506e-07	-0.000028	0.000002	86.75
37.48	6.635384e-07	-0.000025	0.000008	91.53
37.97	1.556163e-06	-0.000025	0.000016	94.75
38.29	1.303814e-06	0.000016	0.000005	98.60
39.18	5.772109e-07	-0.000064	0.000002	78.05

TABLE 3.3 – Fréquences d’émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 5 MHz, $\beta_{s(IF)} = 5.011872 \times 10^{-7}$ mW (SWALIS).

fréquence (GHz)	α_{ci} (mW.m ⁻²)	β_{ci} (mW)	β_{ENV} (mW)	Score (%)
32.75	5.629053e-05	0.002574	0.000328	99.28
33.63	4.024644e-05	0.002256	0.000396	97.91
34.64	3.425123e-05	0.001711	0.000297	94.30
35.08	2.142603e-05	0.001913	0.000194	97.82
35.29	2.831305e-05	0.000867	0.000241	96.77
35.45	1.811425e-05	0.000829	0.000214	97.70
35.86	4.551160e-06	-0.000191	0.000024	87.65
36.5	6.395277e-07	-0.000030	0.000006	98.14
36.75	2.318251e-07	-0.000021	0.000002	89.83
37.48	5.994915e-07	-0.000039	0.000006	89.06
37.97	1.307123e-06	-0.000001	0.000007	96.11
38.29	1.158599e-06	-0.000010	0.000002	97.94
39.18	4.965695e-07	-0.000059	0.000001	79.85

TABLE 3.4 – Fréquences d’émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 1 MHz, $\beta_{s(IF)} = 1.258925 \times 10^{-7}$ mW (SWALIS).

les données mesurées et la droite de calibration obtenue par une opération de régression linéaire car le score de prédiction est au-delà des 95%. Les valeurs de puissance négatives pour β_{ci} viennent du fait que la pente de la droite de régression est telle que l’intersection avec l’axe de puissance se fait en dessous de 0 mW. Comme expliqué à la sous-section 3.2.2, cette valeur de β_{ci} se verra substituée par $\beta_{(IF)}$.

3.2.3.3 Détermination des coefficients de calibration pour le capteur KaRADOC

Ces opérations de calibration sont aussi effectuées pour le capteur KaRADOC. L’antenne est commune entre KaRADOC et SWALIS et seul le segment RF est différent. De plus, nous ne nous intéressons qu’à la configuration avec un filtre IF de 1 MHz puisque les missions utilisant KaRADOC correspondent à des vols dont la hauteur du porteur se situe aux alentours de 3000 mètres. Il est donc nécessaire de diminuer le seuil de sensibilité tout en gardant une période d’échantillonnage « raisonnable » afin d’obtenir un rapport signal à bruit pour chaque impulsion de l’ordre de 10 dB. Ainsi, les paramètres de calibration sont les suivants :

- durée de l’impulsion : $\tau = 2,18 \mu s$,

- puissance de sortie du PNA-X : -2 dBm,
- largeur de bande du récepteur : 1 MHz,
- nombre d'échantillons par impulsion : $N_{\Delta T} = 30$,
- nombre d'impulsions par rafale : $N_p = 400$.

Nous présentons sur la figure 3.15 les puissances mesurées pour toutes les fréquences et tous les trièdres. De manière analogue pour la calibration du capteur SWALIS, sur la figure 3.16, nous décrivons un exemple de régression linéaire pour la fréquence de 34,64 GHz.

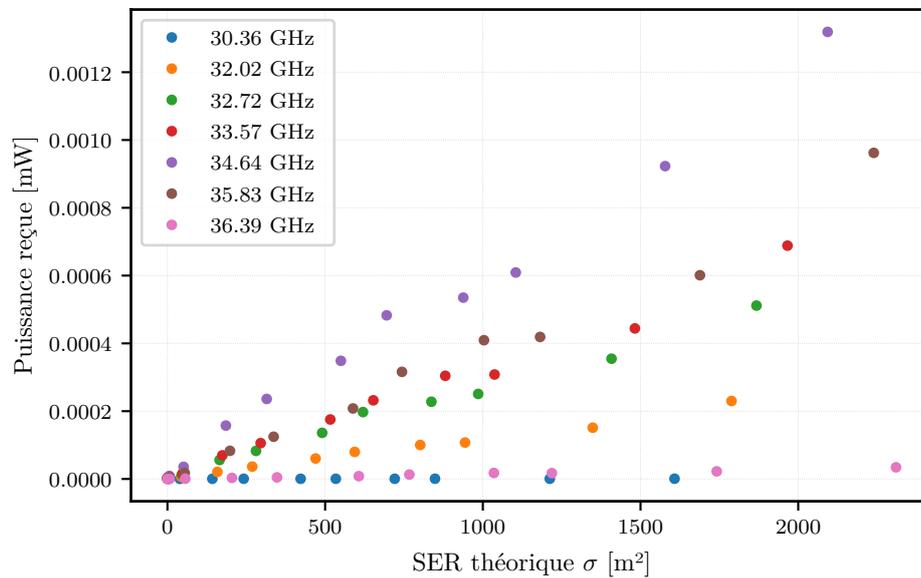


FIGURE 3.15 – Puissance reçue en fonction de la SER des trièdres

Nous obtenons les coefficients de calibration pour un filtre IF de 1 MHz donnés dans la table 3.5).

Nous avons donc décrit la procédure de calibration des systèmes SWALIS et KaRADOC et obtenu une relation entre la puissance mesurée et la SER de la surface illuminée. Il convient maintenant de mesurer cette surface illuminée et de positionner la trace de celle-ci sur un fond de carte pour une meilleure visualisation des mesures. Pour cela, il est essentiel de prendre en compte les attitudes du porteur et de corriger la position de l’empreinte au sol à partir de sa position attendue (position attendue définie par l’angle de dépointage de l’antenne ainsi que sa position)

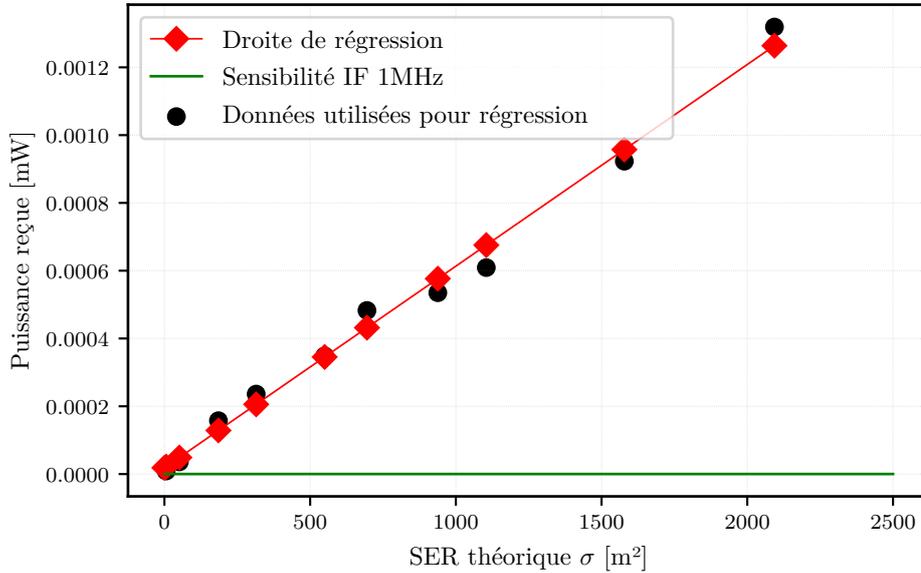


FIGURE 3.16 – Régression linéaire pour la fréquence de 34,64 GHz pour un filtre IF de 1 MHz.

3.3 Correction de la position de l’empreinte

Un des buts des capteurs SWALIS et KaRADOC est de pouvoir mesurer la section efficace normalisée en des points de la surface référencés sur un fond de carte, l’empreinte de l’antenne correspondant à la zone illuminée afin de mener des analyses tant qualitatives que quantitatives. Dans le cas idéal, l’empreinte au sol de l’antenne serait à l’angle de dépointage souhaité par rapport à la position nadir. Cependant, compte tenu des mouvements du porteur comme le roulis, le tangage et le lacet, le faisceau d’antenne est dépointé par rapport à sa position idéale. Il faut donc trouver la position du point central de cette tâche au sol en tenant compte de ces trois angles d’attitude du porteur. Ce point central est défini comme étant l’intersection de l’axe radio-électrique de l’antenne avec la surface éclairée, supposée plane.

3.3.1 Les angles d’attitude

Les trois angles d’attitudes qui impactent la position de la trace au sol du faisceau radioélectrique de l’antenne sont :

- le roulis (*roll*) illustré à la figure 3.17 est noté ψ , décrivant le mouvement de rotation autour de l’axe allant de la queue au nez de l’avion,

fréquence (GHz)	α_{ci} (mW.m ⁻²)	β_{ci} (mW)	β_{ENV} (mW)	Score (%)
30.36	2.0139322e-10	4.620158175e-07	5.6911408441e-07	68.739
32.02	1.2130389e-07	1.5959369017e-06	8.335068743e-07	99.023
32.72	2.6194877e-07	7.740038129e-06	1.6336310449e-06	99.253
33.57	3.2754609e-07	3.882112402e-06	2.5341175504e-06	98.670
34.64	5.9499797e-07	1.838550140e-05	3.8422208354e-06	99.008
35.83	4.0390669e-07	-1.020738306e-05	2.1436260954e-06	98.322
36.39	1.4282597e-08	3.758837923e-07	2.0316883961e-07	98.166

TABLE 3.5 – Fréquences d'émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 1 MHz, $\beta_{s(IF)} = 1.258925 \times 10^{-7}$ mW (KaRADOC).

- le tangage (*pitch*) illustré à la figure 3.18, décrit le mouvement avant-arrière du porteur et est noté ξ ,
- le lacet (*yaw*) illustré à la figure 3.19, est défini par rapport au nord et indique la direction dans laquelle pointe le nez de l'avion. Il est noté ϕ .

Concernant l'angle de lacet ϕ , nous ajoutons la notion d'angle de course noté η et qui est l'angle définissant la trajectoire du porteur. Cet angle permet de calculer la dérive ζ mettant en évidence la différence entre le lacet et la course.

3.3.2 Prise en compte des angles d'attitudes

Au début d'une rafale, l'antenne d'émission transmet un signal pour un angle de dépointage θ_i . Pour chaque rafale, nous avons accès aux informations d'attitude du porteur à savoir le roulis ψ , le tangage ξ , le lacet ϕ et l'angle de course η impactant la direction de visée de l'antenne. En nous plaçant dans un repère (x, y, z) comme illustré sur la figure 3.19, nous pouvons prendre en compte ces angles en partant de l'hypothèse que nous survolons une surface plane (comme référence) c'est à dire que la position réelle (tenant compte des angles d'attitude) du point central de la trace au sol et sa position idéale (sans angle d'attitude) se trouvent dans un même plan horizontal. Ainsi nous pouvons procéder aux projections en définissant les points suivants :

$$A_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, A_{0g} = \begin{pmatrix} x_{0g} \\ y_{0g} \\ z_{0g} \end{pmatrix}, A_R = \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix}, A_P = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix}.$$

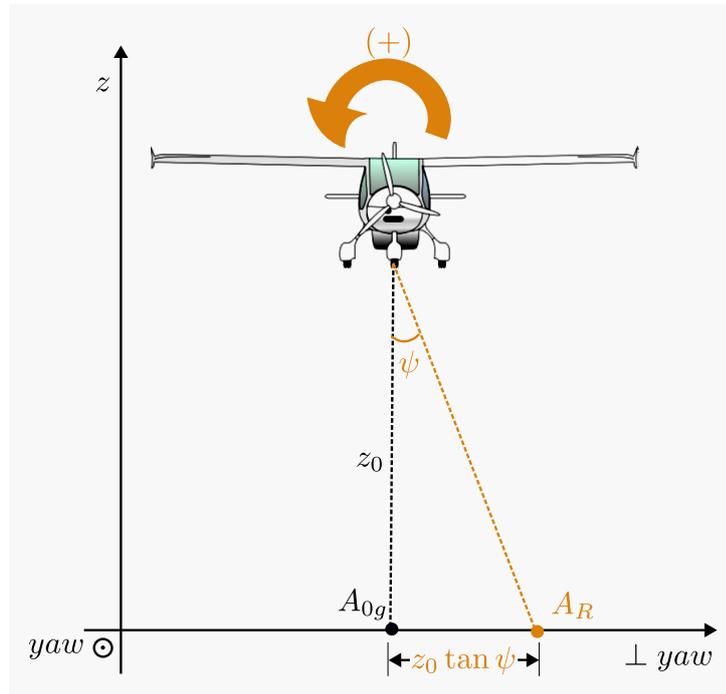


FIGURE 3.17 – Définition du roulis (sens positif défini par la flèche orange)

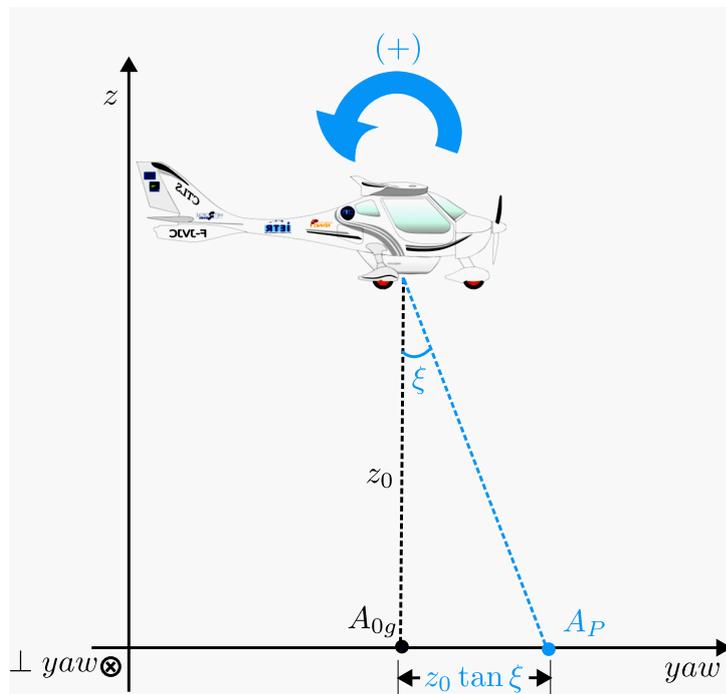


FIGURE 3.18 – Définition du tangage (sens positif défini par la flèche bleue)

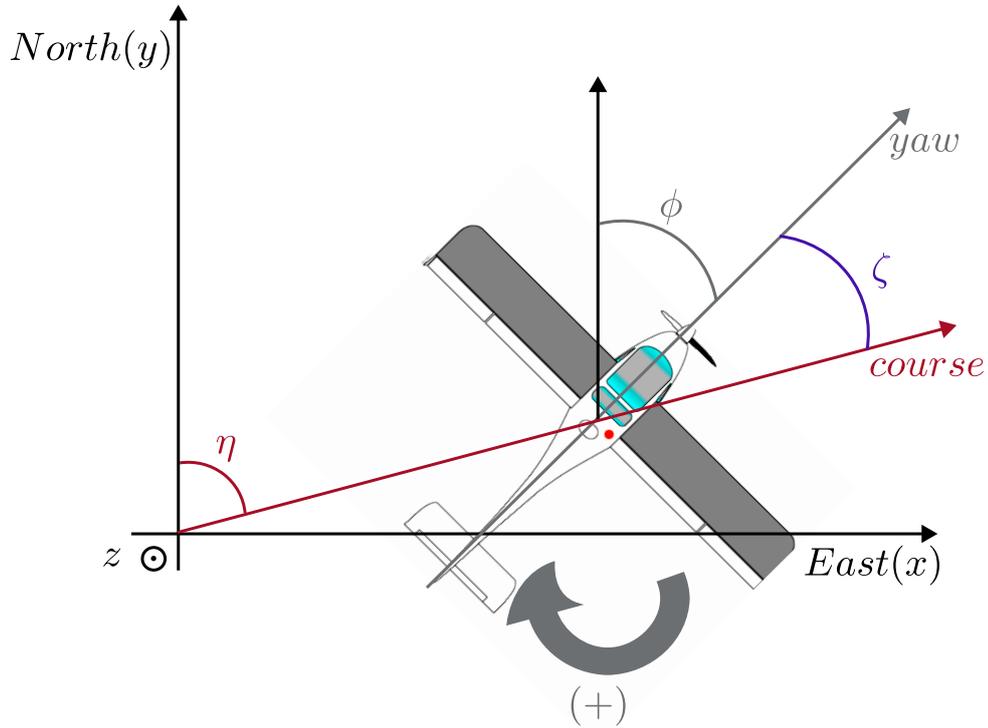


FIGURE 3.19 – Définition du lacet (sens positif défini par la flèche grise)

avec

- A_0 la position du porteur lors de l'émission d'une rafale ,
- A_{0g} la projection de la position A_0 du porteur dans le plan au sol ($z_{0g} = 0$),
- A_R la position A_{0g} du porteur dans le plan horizontal après la prise en compte du roulis (figure 3.17),
- A_P la position A_{0g} du porteur dans le plan horizontal après la prise en compte du tangage (figure 3.18).

Nous allons donc prendre en compte l'ensemble de ces angles d'attitude afin de placer correctement le point central de l'empreinte au sol de l'antenne par rapport à la position de référence : position nadir.

3.3.2.1 Prise en compte du roulis

La figure 3.20 illustre la prise en compte du roulis. Cela revient à considérer que le porteur pointant au nadir décale le point A_{0g} vers le point A_R . Ce décalage est perpendiculaire à la direction indiquée par le lacet (le nez du porteur). Nous pouvons donc

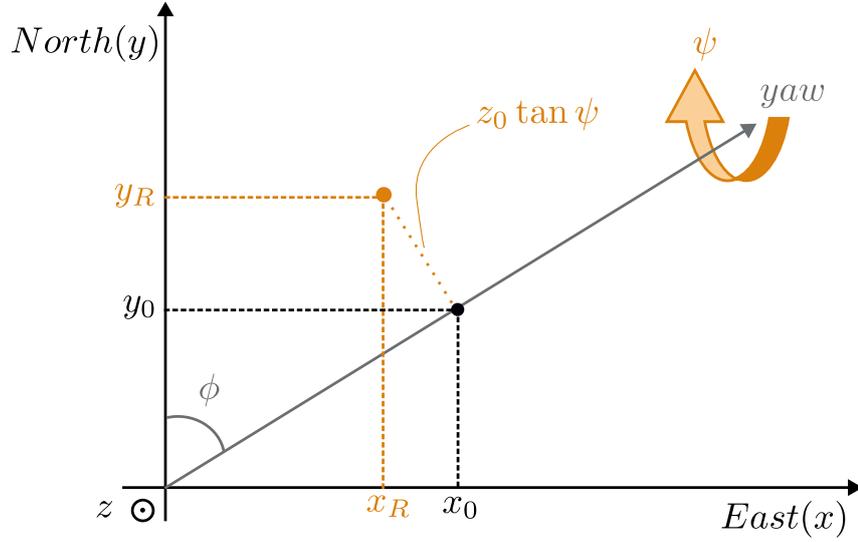


FIGURE 3.20 – Prise en compte du roulis

écrire :

$$\begin{cases} x_R = x_0 - z_0 \tan \psi \cos \phi \\ y_R = y_0 + z_0 \tan \psi \sin \phi \\ z_R = z_0 \end{cases}$$

et donc la matrice de transformation est décrite avec M_R :

$$M_R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\tan \psi \cos \phi \\ 0 & 1 & \tan \psi \sin \phi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Or l'angle de dépointage θ_i pour la fréquence f_i de l'antenne est dans le même plan que le roulis. Ainsi nous obtenons une nouvelle matrice M_R en tenant compte de l'angle de dépointage θ_i :

$$M_R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\tan(\theta_i + \psi) \cos \phi \\ 0 & 1 & \tan(\theta_i + \psi) \sin \phi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

3.3.2.2 Prise en compte du tangage

La figure 3.21 illustre la prise en compte du tangage. Cela revient à considérer que le

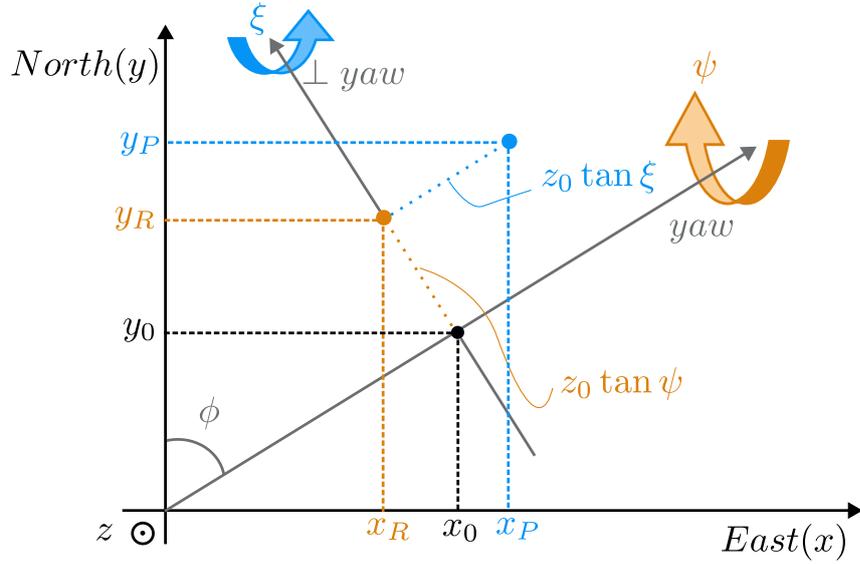


FIGURE 3.21 – Prise en compte du tangage

porteur pointant vers le point A_R s'est décalé vers le point A_P . Cette considération est valable pour des angles de l'ordre du degré. La direction de ce décalage est parallèle à la direction indiquée par le lacet (le nez du porteur). Nous pouvons donc écrire que :

$$\begin{cases} x_P = x_R + z_R \tan \xi \sin \phi \\ y_P = y_R + z_R \tan \xi \cos \phi \\ z_P = z_R \end{cases}$$

et donc la matrice de décalage M_P après un mouvement de tangage peut s'écrire avec :

$$M_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \tan \xi \sin \phi \\ 0 & 1 & \tan \xi \cos \phi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Il convient maintenant de prendre en compte la totalité des attitudes du porteur par l'intermédiaire d'une matrice de transformation globale.

3.3.2.3 Matrice de transformation

Comme seule la projection de l’empreinte au sol nous intéresse, nous définissons la matrice qui nous permet de récupérer les composantes x et y . La composante z est nulle puisque le plan de référence correspond au sol :

$$M_{proj} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

La matrice de transformation prenant en compte les angles attitudes s’écrira donc sous la forme :

$$M = M_{proj} \cdot M_P \cdot M_R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \tan \xi \sin \phi \\ 0 & 1 & \tan \xi \cos \phi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\tan(\theta_i + \psi) \cos \phi \\ 0 & 1 & \tan(\theta_i + \psi) \sin \phi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Ainsi avec la matrice de transformation M , nous pouvons retrouver la position A_f du centre de l’empreinte au sol du faisceau d’antenne (rappel : point d’intersection de l’axe radio-électrique avec le sol) partant de la position du porteur.

$$A_f = M \cdot A_0 \quad (3.7)$$

La position de ce point obtenue après l’application des angles d’attitude permet de décrire l’angle d’incidence réel.

3.3.3 Obtention de l’incidence locale réelle

L’angle d’incidence local réel est l’angle devant être pris en compte pour caractériser l’interaction de l’onde avec le surface de l’eau. Idéalement, cet angle d’incidence local réel devrait être égal à l’angle de dépointage créé par la fréquence d’émission (voir le tableau 3.1). L’angle d’incidence locale réelle θ_{reel} se détermine donc avec la relation :

$$\cos \theta_{reel} = \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|} \cdot \vec{n} = \frac{\overrightarrow{A_0 A_{0g}}}{\|\overrightarrow{A_0 A_{0g}}\|} \cdot \frac{\overrightarrow{A_0 A_{0f}}}{\|\overrightarrow{A_0 A_{0f}}\|} \quad (3.8)$$

Cela correspond à la projection du vecteur directeur de l'axe radio-électrique de l'antenne sur le vecteur directeur de l'axe nadir comme illustrée à la figure 3.22.

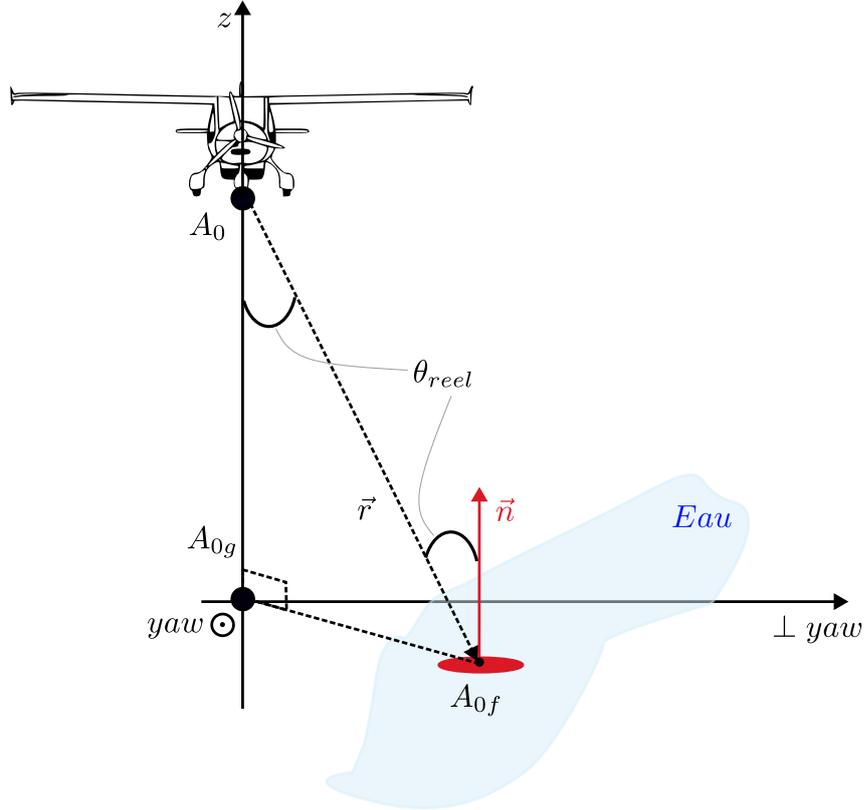


FIGURE 3.22 – Incidence locale réelle, calculée à partir de la position de la trace au sol A_{0f} de la zone illuminée.

Il est important aussi de noter que dans la suite de notre travail, nous considérons les angles d'incidence locaux, positifs et ce, quelque soit la direction d'arrivée relativement à la position nadir. Par exemple, si l'antenne du radar pointe à droite ou à gauche du porteur, l'angle d'incidence local réel, calculé à posteriori sera toujours positif et inférieur à 90° car formé par la verticale et le vecteur visée. En effet, nous étudions essentiellement des surfaces d'eau et dans notre travail, l'aspect lié à l'effet doppler n'est pas abordé.

La dernière étape est donc de déterminer la surface qui est éclairée par l'antenne lors d'émission de chaque rafale afin d'obtenir la valeur de σ_0 .

3.4 Détermination de la valeur de σ_0

Avec la connaissance de la SER σ (suite aux opérations de calibration) et de la position exacte de l’empreinte au sol (suite à la prise en compte de l’attitude du porteur), nous pouvons retrouver le coefficient de rétrodiffusion avec la relation [23] :

$$\sigma_0 = \frac{1}{A} \langle \sigma \rangle \quad (3.9)$$

où A est l’aire de la surface éclairée par une impulsion. Pour obtenir la valeur de cette aire, il est nécessaire dans un premier temps, d’estimer la distance de visée entre le centre de phase de l’antenne et le point d’intersection entre l’axe radio-électrique de l’antenne et le sol.

3.4.1 Estimation de la distance de visée

La distance de visée est la distance radar-scène (en visée directe). L’estimation correcte de la distance de visée est très importante pour un capteur car elle correspond à un des paramètres de l’équation radar. Nous pouvons l’estimer de deux manières différentes.

3.4.1.1 Estimation par la méthode dite directe

L’estimation de la distance de visée par la méthode dite directe consiste à effectuer le calcul de cette estimation en se basant sur le temps d’aller et retour de l’impulsion émise. Soit $\Delta\tau$ le temps d’aller et retour, la distance de visée se calcule simplement comme suit :

$$R = \frac{c \cdot \Delta\tau}{2} = \frac{c \cdot (start_acquisition + N_delta_sight \times T_e)}{2} \quad (3.10)$$

où c est la célérité de la lumière, *start_acquisition* donne le délai d’acquisition, *N_delta_sight* le nombre d’échantillon avant l’impulsion et T_e la période d’échantillonnage comme illustré à la figure 3.23. Cette méthode de calcul ne peut être utilisée que si nous avons un rapport signal à bruit suffisant pour le signal rétrodiffusé. En effet si le rapport signal à bruit n’est pas suffisamment au-dessus du plancher du bruit du système d’acquisition, il est très difficile de retrouver la position exacte du premier échantillon de l’impulsion de retour.

De plus, nous remarquons un décalage temporel supplémentaire lors des campagnes de calibration. Ce décalage est attribué à un retard interne que le système d’acquisition

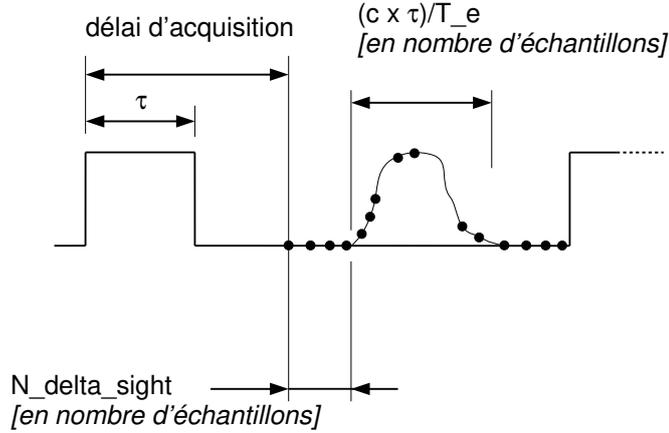


FIGURE 3.23 – Description d’une impulsion élémentaire et de la réception de cette impulsion après réflexion sur le sol (cas de l’échantillonnage de l’impulsion de retour).

(PNA-X) introduit lors de l’émission de l’impulsion. Ce retard doit d’être quantifié en salle et aussi en temps réel lors des acquisitions (phase la plus délicate), afin de pouvoir utiliser la méthode d’estimation de la distance de visée proposée. Pour cette raison, cette méthode n’est pas encore utilisée dans les différents traitements de données.

3.4.1.2 Estimation de la distance de visée par la méthode indirecte

L’estimation de la distance de visée par la méthode indirecte consiste à estimer cette distance en tenant compte de différents paramètres :

- H l’altitude du porteur (données GPS - figure 3.24),
- h_0 l’altitude de la scène (donnée par un modèle numérique d’élévation DEM -figure 3.24),
- θ_i l’angle d’incidence propre à chaque fréquence d’émission,
- ψ l’angle de roulis donné par la centrale inertielle solidaire à l’antenne,
- ξ l’angle de tangage donné par la centrale inertielle solidaire à l’antenne.

Le plan de la scène mesurée est distant de celui du l’évolution du porteur de $H - h_0$. En partant du triangle $A_0A_{0g}A_R$ rectangle en A_{0g} (figure 3.25), connaissant $H - h_0$ et $\theta_i + \psi$, nous pouvons déterminer la distance A_0A_R . Ensuite, partant du triangle $A_0A_RA_P$ rectangle en A_R (figure 3.25), connaissant la distance A_0A_R et θ , nous pouvons également déterminer la distance $R = A_0A_P$ qui est la distance de visée. Cette valeur est donc donnée par la formule :

$$R = \frac{H - h_0}{\cos(\theta_i + \psi) \cdot \cos \xi} \quad (3.11)$$

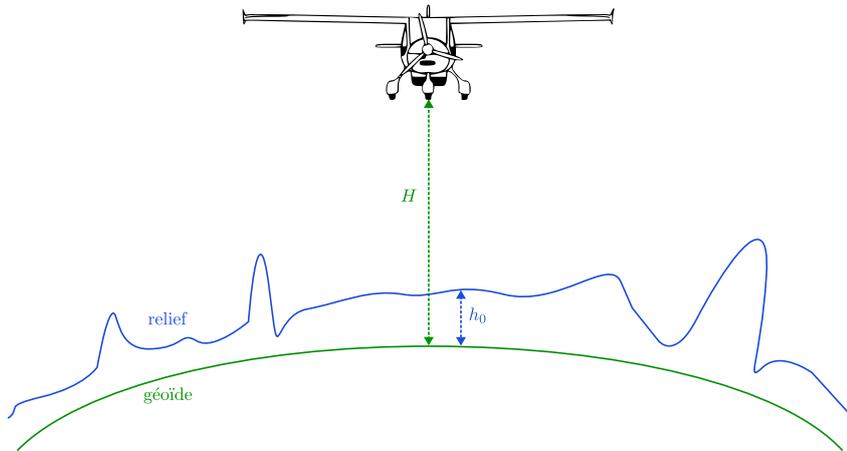


FIGURE 3.24 – Définition de la hauteur du porteur par rapport au géoïde de référence

Cette méthode est donc celle implémentée dans les traitements dans l'attente de la prise en main de retard interne du PNA-X.

3.4.2 Calcul de l'aire

Nous détaillons le calcul de la surface de l'empreinte au sol de l'antenne qui doit nous permettre de retrouver la valeur de σ_0 sur la base de l'équation (3.9). Nous décrivons alors les différents paramètres nécessaires pour la détermination de la surface :

- θ_E l'angle d'ouverture à -3dB du lobe de l'antenne dans le plan E (ouverture dans le sens du déplacement de l'avion),
- θ_H l'angle d'ouverture à -3dB du lobe de l'antenne dans le plan H (ouverture dans le plan de dépointage de l'antenne),
- H l'altitude du porteur (données GPS),
- h_0 l'altitude de la scène (obtenue avec un modèle numérique d'élévation),
- θ_i l'angle de dépointage correspondant à chaque fréquence d'émission,
- ψ l'angle de roulis donné par la centrale inertielle solidaire à l'antenne,
- ξ l'angle de tangage donné par la centrale inertielle solidaire à l'antenne.

Dans les conditions de visée au nadir, la surface A de l'empreinte de l'antenne au sol correspond à la surface d'une ellipse dont les 2 axes principaux a et b , définis sur la figure 3.26, s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} a &= (H - h_0) \left[\tan\left(\frac{\theta_E}{2}\right) - \tan\left(-\frac{\theta_E}{2}\right) \right] \\ b &= (H - h_0) \left[\tan\left(\frac{\theta_H}{2}\right) - \tan\left(-\frac{\theta_H}{2}\right) \right] \end{cases}$$

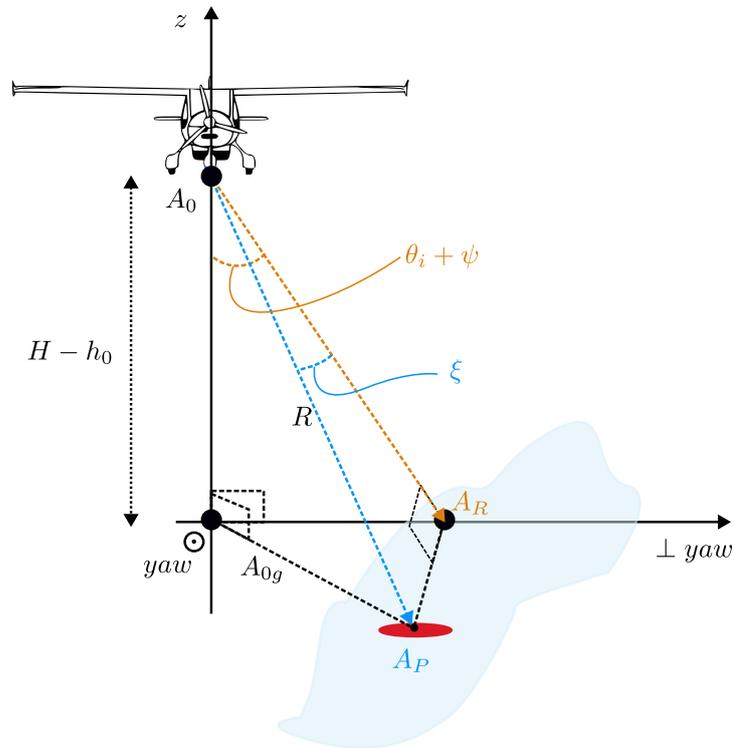


FIGURE 3.25 – Estimation de la distance par méthode indirecte

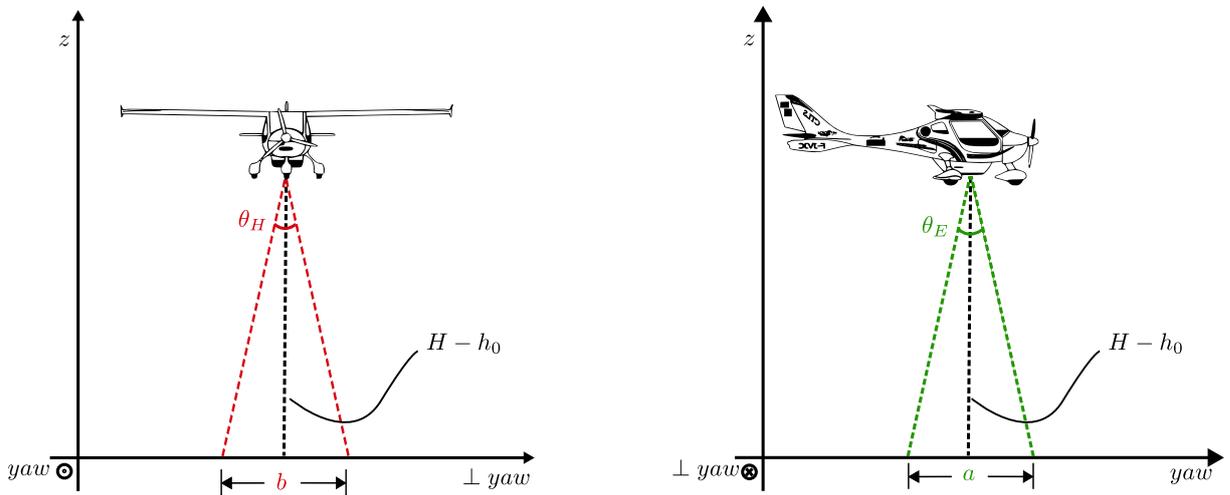


FIGURE 3.26 – Estimation des axes a et b de l'ellipse correspondant à l'empreinte de l'antenne au sol en condition nadir sans roulis ni tangage.

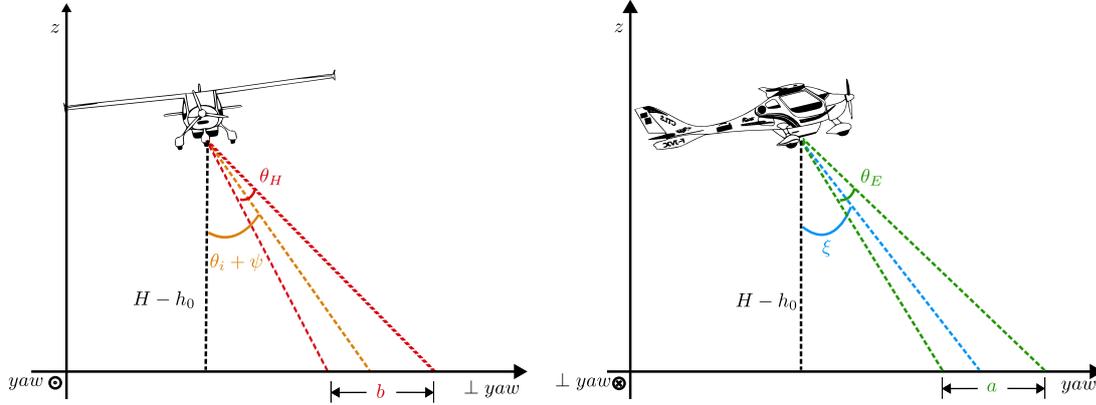


FIGURE 3.27 – Estimation des axes a et b de l'ellipse correspondant à l'empreinte de l'antenne au sol en condition autre que la visée nadir

ce qui donne une aire de la surface en condition nadir égale à :

$$A = \pi \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} = \pi(H - h_0)^2 \tan\left(\frac{\theta_E}{2}\right) \tan\left(\frac{\theta_H}{2}\right)$$

Dans des conditions autres que la visée au nadir, nous tenons compte du roulis et du tangage comme indiqué sur la figure 3.27. Nous pouvons alors expliciter l'empreinte de l'antenne au sol avec les nouvelles expressions des axes a et b :

$$\begin{cases} a = (H - h_0) \left[\tan\left(\xi + \frac{\theta_E}{2}\right) - \tan\left(\xi - \frac{\theta_E}{2}\right) \right] \\ b = (H - h_0) \left[\tan\left(\theta_i + \psi + \frac{\theta_H}{2}\right) - \tan\left(\theta_i + \psi - \frac{\theta_H}{2}\right) \right] \end{cases}$$

ce qui donne une surface A décrite avec :

$$A = \pi \frac{(H - h_0)^2}{4} \left[\tan\left(\xi + \frac{\theta_E}{2}\right) - \tan\left(\xi - \frac{\theta_E}{2}\right) \right] \times \left[\tan\left(\theta_i + \psi + \frac{\theta_H}{2}\right) - \tan\left(\theta_i + \psi - \frac{\theta_H}{2}\right) \right] \quad (3.12)$$

Nous retrouvons dans l'équation (3.12) le terme $H - h_0$ qui provient de l'estimation de la distance de visée par la méthode indirect (équation (3.11)). Toutefois, il est possible d'exprimer l'aire de l'empreinte au sol à partir de la distance de visée qu'elle soit la méthode utilisée pour la trouver (équation (3.10) ou (3.11)). Ainsi, l'aire A peut s'écrire

avec la distance de visée et les angles attitudes :

$$A = \pi \frac{(R \cos(\xi) \cos(\theta_i + \psi))^2}{4} \left[\tan\left(\xi + \frac{\theta_E}{2}\right) - \tan\left(\xi - \frac{\theta_E}{2}\right) \right] \times \left[\tan\left(\theta_i + \psi + \frac{\theta_H}{2}\right) - \tan\left(\theta_i + \psi - \frac{\theta_H}{2}\right) \right] \quad (3.13)$$

À ce stade de l'analyse, nous sommes en mesure de fournir une expression de la valeur σ_0 et donc de fournir une valeur numérique de cette dernière. La question qui doit se poser est la précision avec laquelle nous estimons le σ_0 puisque, pour son calcul, nous faisons appel à de nombreuses grandeurs fournies par différents capteurs. Il convient donc de faire un bilan des erreurs possibles.

3.5 Définition et quantification des postes d'erreur

3.5.1 Équation radar et puissance reçue

La puissance rétrodiffusée par une cible ponctuelle de surface équivalente σ s'écrit [23] :

$$P_r = \frac{P_e G_e^2(\theta, \phi) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \sigma \quad (3.14)$$

où nous rappelons les grandeurs utilisées dans cette expression avec

- P_e est la puissance émise,
- G_e est le gain de l'antenne,
- λ la longueur d'onde,
- R la distance de visée,
- σ la surface équivalente radar (SER) en m^2 ,
- L les facteurs de perte incluant tous les phénomènes d'atténuation.

Pour une scène distribuée, la SER ne correspond plus à un seul point mais à une réponse étalée sur la surface éclairée par l'antenne. L'équation du radar (3.14) devient [23] :

$$P_r = \iint_A \frac{P_e G_e^2(\theta, \phi) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \sigma_0 \, dA \quad (3.15)$$

avec :

- A la surface illuminée par le faisceau d'antenne,
- σ_0 la surface équivalente radar normalisée pour une scène distribuée en m^2/m^2 .

Il est donc nécessaire de relier les résultats de la calibration obtenus avec un trièdre (assimilé à un point brillant) avec les résultats attendus pour la description d'une SER « distribuée » et décrite avec σ_0 .

Ainsi, après calibration, la puissance reçue P_{rm} pour un angle d'incidence i et pour une cible de SER σ_m située à une distance R_m du capteur radar est :

$$P_{rm} = \frac{P_e G_e^2(\theta, \phi) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_m^4 L_i} \sigma_m + \beta_i$$

qu'il est possible de décrire sous la forme :

$$P_{rm} = \frac{\alpha_i}{R_m^4} \sigma_m + \beta_i \quad (3.16)$$

avec $\alpha_i = R_0^4 \alpha_{ci}$ et $\beta_i = \beta_{ci} = \beta_{IF}$.

Dans le cas d'une scène distribuée, nous pouvons donc réécrire l'équation (3.16) pour avoir la puissance reçue pour des mesures en vol avec :

$$P_{rm} = \iint_A \frac{\alpha_i}{R_m^4} \sigma_0 dA + \beta_{IF} \quad (3.17)$$

avec σ_0 considérée comme la SER normalisée par rapport à la surface éclairée. En considérant que la scène illuminée par l'antenne présente des caractéristiques homogènes (surface d'eau par exemple), nous pouvons écrire :

$$\sigma_0 = \frac{R_m^4}{\alpha_i A} (P_{rm} - \beta_{IF}) \quad (3.18)$$

Lorsque la valeur minimale de mesure pour la calibration est négligeable par rapport à la puissance reçue ($P_{rm} \gg \beta_{IF}$), l'équation (3.16) permet de fournir la valeur de la SER normalisée σ_0 :

$$\sigma_0 = P_{rm} \left(\frac{R_m}{R_0} \right)^4 \frac{1}{\alpha_{ci} A} \quad (3.19)$$

Dans la suite du document, nous noterons les grandeurs α_{ci} et β_{ci} de manière générique par α et β respectivement.

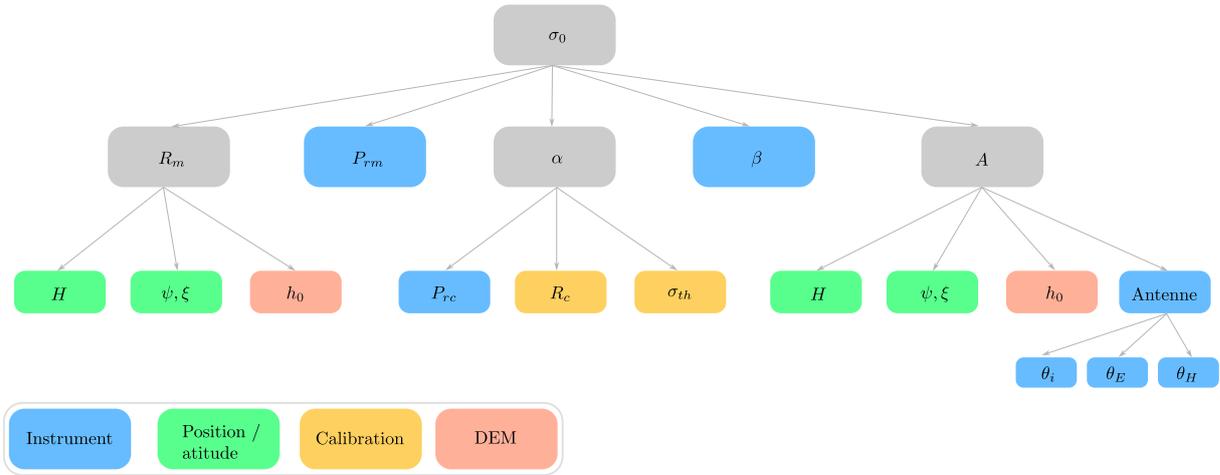


FIGURE 3.28 – Arbre de contribution des différents postes d'erreur au σ_0

3.5.2 Contribution des différents postes d'erreur

À partir des équations (3.16) et (3.18), les sources d'erreurs décrivant σ_0 sont identifiées à savoir :

- la puissance rétrodiffusée mesurée P_{rm} ,
- la distance de visée mesurée R_m ,
- les coefficients de calibrations α et β ,
- l’empreinte de l’antenne radar au sol permettant de calculer l’aire A de la scène illuminée.

La figure 3.28 illustre l’arbre de contributions des erreurs à la valeur de σ_0 . Sur cette figure, nous considérons les erreurs dues à l’instrument de mesure, les erreurs liées à la mesure des paramètres d’attitude, les erreurs liées à la calibration et les erreurs liées à l’estimation du profil d’élévation (DEM pour *Digital Elevation Model*).

3.5.2.1 Notation et méthode de calcul

Nous utilisons les dérivées partielles dans le but d’évaluer l’impact de chaque source d’erreur sur la valeur estimée de σ_0 . Dans la suite du document, les notations

- Δx traduit l’erreur relative sur x ,
- ∂x décrit l’erreur absolue sur x .

Ce qui nous permet d’écrire $\Delta x = \frac{\partial x}{x}$.

Les calculs concernant les erreurs se font en linéaire. Cependant les contributions sur les valeurs estimées de σ_0 s’expriment en dB en suivant la procédure décrite ci-dessous.

Si nous considérons une erreur (Δx en pourcentage ou δx) sur x nous avons :

$$\delta x = x \cdot \Delta x$$

et

$$x - \delta x \leq x \leq x + \delta x$$

Donc l'erreur en dB sur x vaut :

$$10 \log_{10}(x - \delta x) \leq 10 \log_{10} x \leq 10 \log_{10}(x + \delta x)$$

et ce qui permet d'encadrer la valeur x en dB suivant :

$$x_{\min} [\text{dB}] \leq x [\text{dB}] \leq x_{\max} [\text{dB}]$$

3.5.2.2 Contribution de la puissance mesurée P_{rm}

En partant de l'équation (3.18) nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial P_{rm}} = \frac{R_m^4}{\alpha A}$$

ce qui donne

$$\frac{\partial \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{R_m^4 \partial P_{rm}}{\alpha A \sigma_0}$$

L'impact d'une erreur ∂P_{rm} sur l'estimation de σ_0 est donc décrit avec :

$$\Delta \sigma_{0_{P_{rm}}} = \frac{\partial P_{rm}}{P_{rm} - \beta} = \Delta P_{rm} \frac{1}{1 - \beta/P_{rm}}$$

La valeur β est négligeable devant la puissance mesurée P_{rm} , nous avons :

$$\Delta \sigma_{0_{P_{rm}}} = \Delta P_{rm} \tag{3.20}$$

3.5.2.3 Contribution de la distance de visée

À partir de l'équation (3.18), nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial R_m} = 4 \frac{R_m^3}{\alpha A} (P_{rm} - \beta)$$

Ainsi :

$$\frac{\partial \sigma_0}{\sigma_0} = 4 \frac{R_m^3 \partial R_m}{\alpha A \sigma_0} (P_{rm} - \beta)$$

L'impact d'une erreur ∂R_m sur σ_0 est :

$$\Delta \sigma_{0_{R_m}} = 4 \Delta R_m \quad (3.21)$$

3.5.2.4 Contribution des coefficients de calibration α et β

À partir de l'équation (3.18), nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial \alpha} = -\frac{R_m^4}{\alpha^2 A} (P_{rm} - \beta) = -\frac{\sigma_0}{\alpha}$$

Il s'ensuit :

$$\Delta \sigma_{0_\alpha} = \Delta \alpha \quad (3.22)$$

L'impact du coefficient β vaut :

$$\Delta \sigma_{0_\beta} = \frac{\partial \beta}{P_{rm} - \beta} = \Delta \beta \frac{\beta}{P_{rm} - \beta}$$

Quand $P_{rm} \gg \beta$ l'impact de β sur σ_0 est négligeable :

$$\Delta \sigma_{0_\beta} \sim 0$$

3.5.2.5 Contribution de l'empreinte radar

De l'équation (3.18), nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial A} = -\frac{R_m^4}{\alpha A^2} (P_{rm} - \beta) = -\frac{\sigma_0}{A}$$

ce qui donne donc :

$$\Delta \sigma_{0_A} = \Delta A \quad (3.23)$$

3.5.3 Quantification des postes d'erreur

Le but de cette partie est de quantifier chaque poste d'erreur et de trouver l'erreur maximale pouvant être commise sur l'estimation de σ_0 en fonction des erreurs possibles de chaque paramètre.

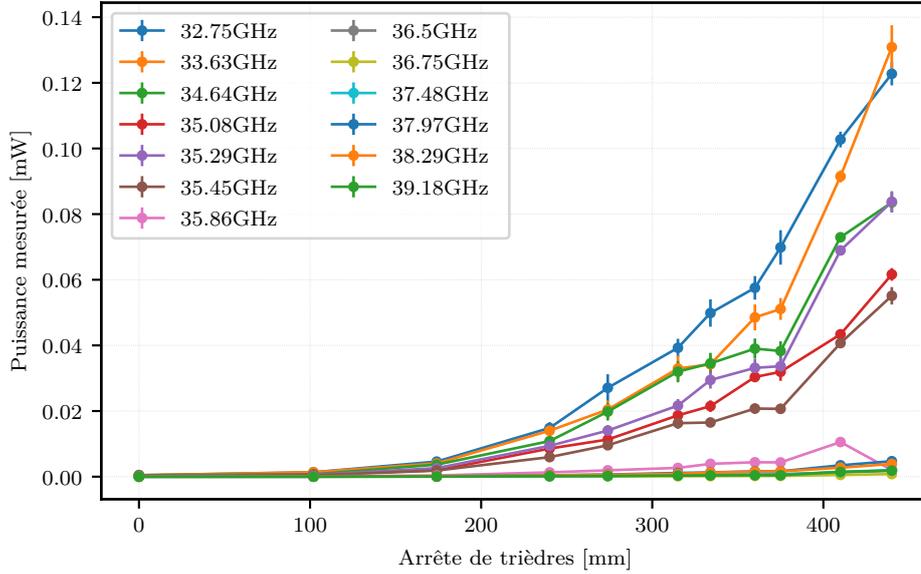


FIGURE 3.29 – Puissance moyenne mesurée pour chaque trière pour la bande IF de 15 MHz

3.5.3.1 Quantification de l'erreur liée à la puissance mesurée P_{rm}

L'équation (3.20) montre la contribution de la puissance sur notre mesure de rétrodiffusion. Pour quantifier cette contribution, nous prenons les données de puissance mesurée durant la calibration. Ces données nous permettent de mesurer la moyenne et l'écart-type d'une même scène dont les éléments de rétrodiffusion sont immobiles (dans notre cas : un trière). La moyenne est obtenue par :

$$P_{rc} = \frac{1}{N_{burst}} \sum_{i=0}^{N_{burst}} P_{rbi}$$

et l'écart-type de la puissance reçue lors la calibration :

$$\sigma(P_{rc}) = \sqrt{\frac{1}{N_{burst}} \sum_{i=0}^{N_{burst}} (P_{rbi} - \langle P_{rbi} \rangle)^2}$$

La figure (3.29) illustre la variation de la puissance moyenne mesurée avec le PNA-X lors des campagnes de calibration pour une largeur de filtre IF de 15 MHz. Les barres verticales représentent l'écart-type lié à la moyenne. Les figures 3.30 et 3.31 décrivent les

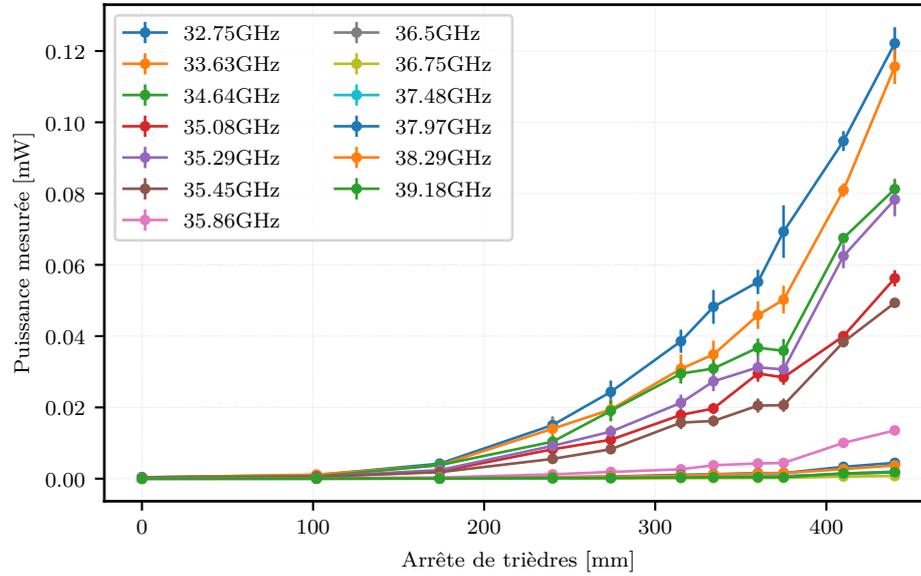


FIGURE 3.30 – Puissance moyenne mesurée en pour chaque trièdre pour la bande IF de 5 MHz

mêmes résultats respectivement pour les bandes IF de 5 MHz et 1 MHz. Ainsi découlent, les erreurs absolues (écart-type représenté par la barre verticale autour de la puissance moyenne, figures 3.29, 3.30 et 3.31) liées à la puissance mesurée ainsi que celles relatives (ratio erreur absolue par la puissance moyenne) à chaque largeur de bande du filtre IF. La figure 3.32 présente les erreurs relatives pour le filtre IF de 15 MHz. Il est à remarquer que ces erreurs sont élevées pour les puissances moyennes reçues provenant des trièdres de faibles dimensions. Il en est de même pour les autres largeurs de bande de filtres IF 1 MHz et 5 MHz que nous n'illustrons pas ici pour éviter une redondance.

Lorsque nous effectuons une mesure de l'environnement (qui est assimilé ici à un trièdre de dimension d'arête de 0 mm, l'erreur relative est comprise respectivement dans les intervalles $[0, 5; 1]$, $[0, 27; 0, 85]$, et $[0, 27; 0, 85]$ pour 1 MHz, 5 MHz et 15 MHz de largeur de bande de filtre IF pour toutes les fréquences de calibration. Nous pouvons donc remarquer que plus la SER (liée à la taille du trièdre) des trièdres augmente, plus l'erreur relative faite sur la puissance moyenne mesurée diminue (figure 3.32). Nous considérons donc que lorsque la taille du trièdre est grande, la contribution de l'environnement à la puissance mesurée est négligeable. La mesure de cibles avec des SER importantes se fait avec moins de variation de puissance, donc une erreur relative plus faible. Nous nous basons donc sur l'ordre de puissance que nous obtenons durant les mesures sur eau pour

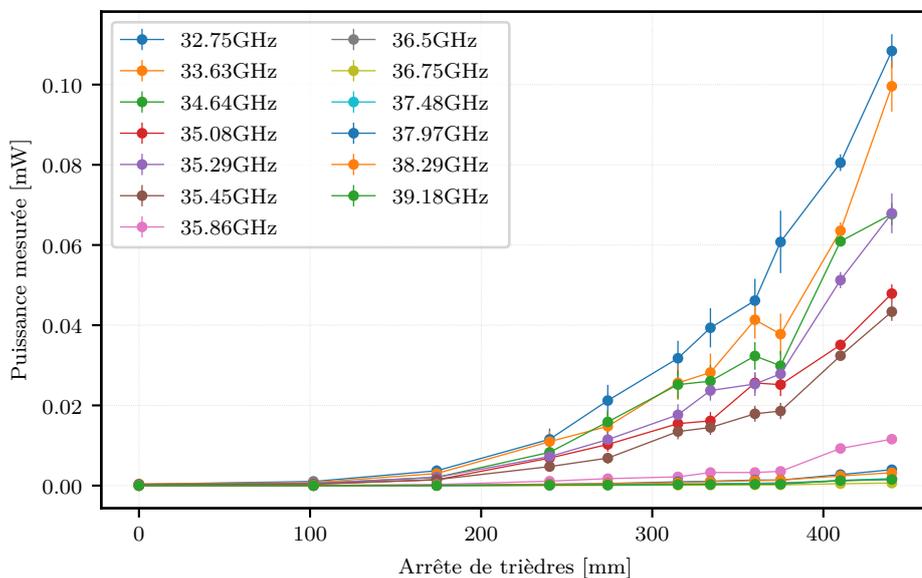


FIGURE 3.31 – Puissance moyenne mesurée en pour chaque trière pour la bande IF de 1 MHz

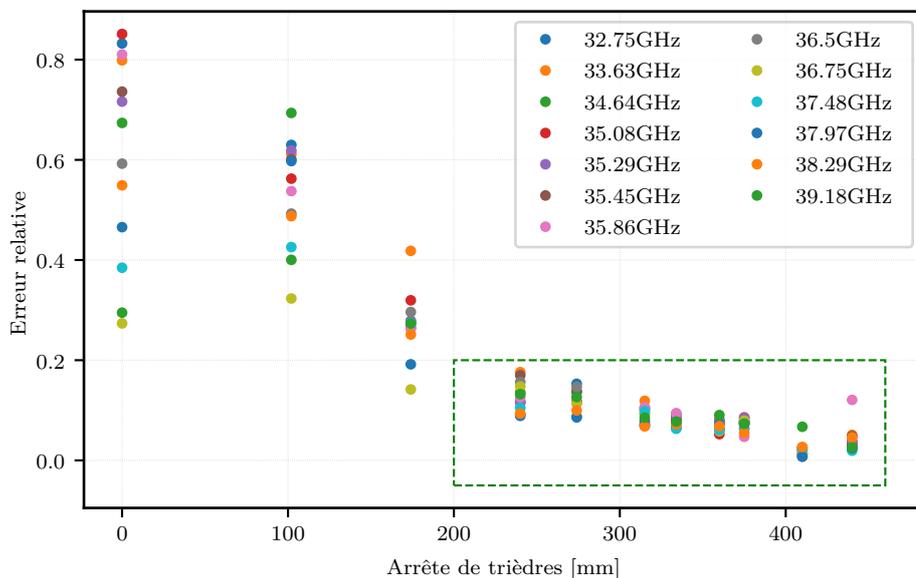


FIGURE 3.32 – Erreur relative par trière pour la bande IF de 15 MHz

Fréquence (GHz)	IF 1 MHz	IF 5 MHz	IF 15 MHz
32.75	2.59	2.96	2.32
33.63	3.3	2.4	2.33
34.64	1.73	1.54	2.34
35.08	3.43	2.84	2.35
35.29	3.93	5.44	2.36
35.45	2.07	2.38	2.37
35.86	3.93	1.8	2.38
36.5	1.34	1.46	2.39
36.75	2.11	2.82	2.40
37.48	2.34	3.68	2.41
37.97	2.25	2.24	2.42
38.29	3.98	3.47	2.43
39.18	5.31	4.13	2.44

TABLE 3.6 – Valeur de l'erreur relative ΔP_{rm} % par filtre IF et fréquence

le choix des trièdres et donc pour le choix de l'erreur relative. Ainsi l'erreur relative sur la puissance mesurée que nous faisons, correspond à la plus petite des erreurs relatives parmi celles des trièdres de grande taille car les puissances.

La table 3.6 illustre les erreurs relatives suivant ce dernier critère pour toutes les fréquences par filtre IF. Dans la suite de cette partie nous ferons les calculs seulement pour la fréquence de 33,63 GHz, la fréquence nous donnant le dépointage le plus proche du nadir. Ainsi pour un filtre IF de 15 MHz, nous avons :

$$\Delta\sigma_{0P_{rm}}(33.63 \text{ GHz}) = \Delta P_{rm}(33.63 \text{ GHz}) = 2,33\%$$

3.5.3.2 Quantification de l'erreur liée à l'estimation de la distance de visée

L'équation (3.21) montre la contribution de l'estimation de la distance de visée sur la mesure du coefficient de rétrodiffusion. Cette contribution est pondérée d'un coefficient 4.

Méthode directe d'estimation Pour la méthode directe d'estimation, l'erreur que nous faisons est liée à la capacité de récupérer le premier échantillon dans l'impulsion correspondant au signal de retour ce qui correspond à une erreur de quantification. C'est une distribution uniformément répartie entre deux échantillons. L'écart-type σ_R est donc

donné par la formule [83] :

$$\sigma(R) = \frac{\delta R}{\sqrt{12}}$$

La table 3.7 illustre les erreurs que nous faisons pour chaque filtre IF ici sous la forme de l'écart-type $\sigma(R)$.

largeur (MHz)	15	5	1
T_e (ns)	50	150	720
Seuil de sensibilité $\beta_s(IF)$ (dBm)	-57	-63	-69
Résolution en distance δR (m)	7,5	22,5	108
écart-type σ_R (m)	2,16	6,49	31,17
Erreur relative pour 500 m ΔR (m)	0,432%	1,298%	6,234%

TABLE 3.7 – Largeurs de bande de filtres IF choisies pour SWALIS et écart-type associé. Pour KaRADOC le filtre IF le plus utilisé est celle de 1 MHz

Méthode indirecte d'estimation De la méthode indirecte d'estimation de la distance de visée (équation (3.11)), nous pouvons définir les influences liées à chaque paramètre :

1. Impact de la hauteur du porteur

$$\frac{\partial R}{\partial H} = \frac{1}{\cos(\theta_i + \psi) \cdot \cos \xi} \implies \Delta R_H = \Delta H \frac{1}{1 - h_0/H}$$

2. Impact de la hauteur DEM

$$\frac{\partial R}{\partial h_0} = -\frac{1}{\cos(\theta_i + \psi) \cdot \cos \xi} \implies \Delta R_{h_0} = \Delta h_0 \frac{1}{1 - H/h_0}$$

3. Impact du tangage

$$\frac{\partial R}{\partial \xi} = \frac{H - h_0}{\cos(\theta_i + \psi)} \frac{\sin \xi}{\cos^2 \xi} \implies \Delta R_\xi = \tan \xi \Delta \xi$$

4. Impact du roulis

$$\frac{\partial R}{\partial \psi} = \frac{H - h_0}{\cos \xi} \frac{\sin(\theta_i + \psi)}{\cos^2(\theta_i + \psi)} \implies \Delta R_\psi = \tan(\theta_i + \psi) \Delta \psi$$

5. Impact de l'angle d'incidence

$$\frac{\partial R}{\partial \theta_i} = \frac{H - h_0}{\cos \xi} \frac{\sin(\theta_i + \psi)}{\cos^2(\theta_i + \psi)} \implies \Delta R_{\theta_i} = \tan(\theta_i + \psi) \Delta \theta_i$$

Finalement, la totalité de l'erreur relative liée à l'estimation de la distance de visée est décrite avec :

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_H^2 + \Delta R_{h_0}^2 + \Delta R_\xi^2 + \Delta R_\psi^2 + \Delta R_{\theta_i}^2} \quad (3.24)$$

La centrale inertielle nous donne pour chaque rafale :

- une précision de 0.05° sur le roulis et le tangage,
- l'altitude GPS avec une précision inférieure à 2 m ce qui conduit à une erreur relative très faible sur l'altitude.

L'angle de dépointage est mesurée avec une précision de $0,01^\circ$ et nous utilisons le DEM fourni par SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) [84] [85] comme modèle d'élévation. Sa précision en hauteur est de 16 m [86]. Ainsi pour chaque rafale nous sommes capables de calculer l'erreur lié à une estimation indirecte de la distance de visée. La figure 3.33 illustre l'erreur relative faite sur l'estimation indirecte de la distance de visée pour une succession de bursts, à partir des données réelles acquises en campagne à une altitude moyenne de 500 m à la fréquence de 33,63 GHz. Nous remarquons que le motif de l'erreur relative faite sur l'altitude (figure 3.34) est le même que celui de l'erreur relative faite sur l'estimation directe distance en « slant » (figure 3.33). C'est l'erreur relative sur le DEM qui fait augmenter considérablement l'erreur globale d'estimation de la distance de visée.

3.5.3.3 Quantification de l'erreur liée aux coefficients de calibration α et β

L'équation (3.22) donne la contribution des contributions des coefficients de calibration sur la mesure de rétrodiffusion.

L'erreur sur α dépend de celles faites lors de la mesure de distance radar cible R_c en calibration, de la puissance P_{rc} rétrodiffusée par le trièdre dans son environnement et enfin de la surface équivalente radar σ_{th} de ce dernier. L'influence de R_c sur le coefficient α est donc donné par :

$$\Delta \alpha_{R_c} = 4 \Delta R_c \quad (3.25)$$

Il est à noter que l'erreur sur la distance ($R_c = 351$ m) est donnée par la notice constructeur [87] du télémètre laser que nous utilisons pour mesurer cette distance en calibration à

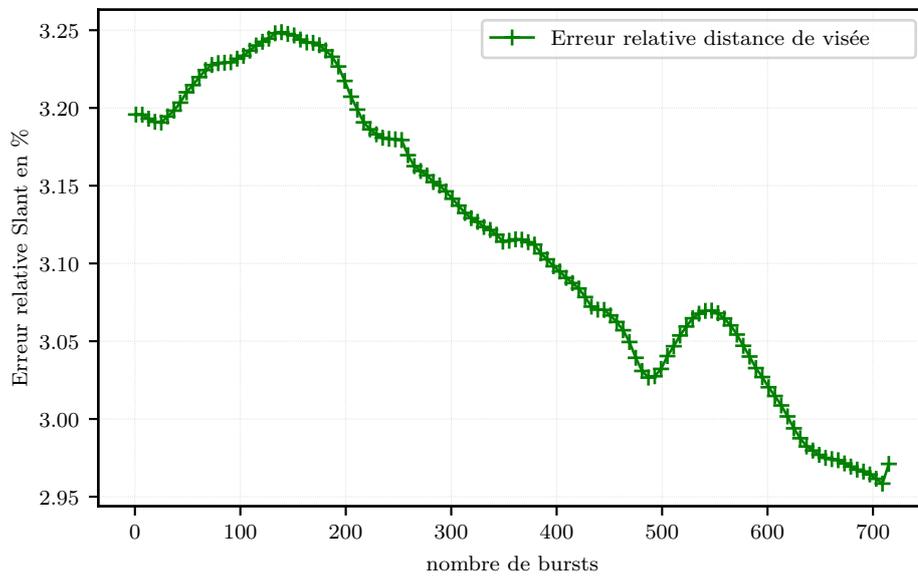


FIGURE 3.33 – Erreur relative faite sur l'estimation indirecte de la distance de visée pour la bande IF de 15 MHz

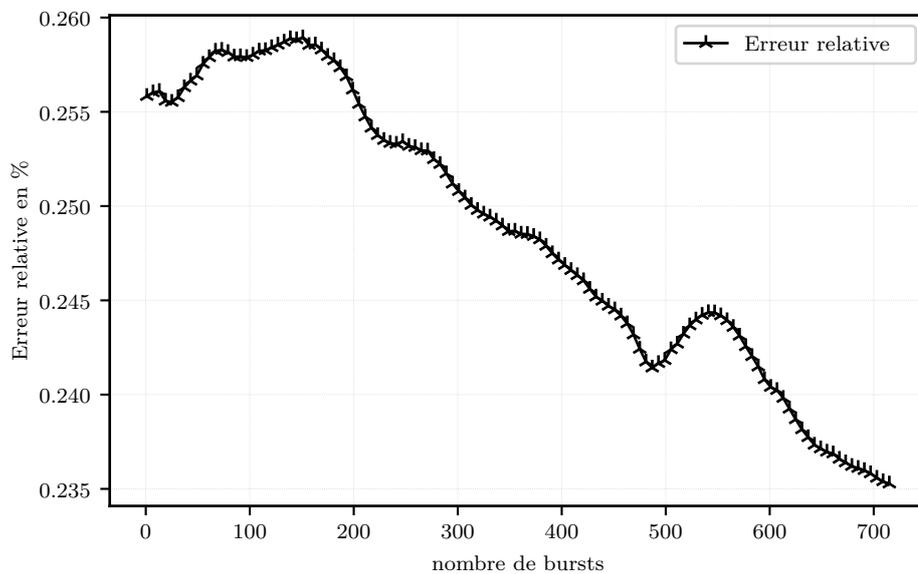


FIGURE 3.34 – Erreur relative faite sur la mesure de l'altitude (données acquises).

savoir ± 1 mètre. Cela revient donc à écrire :

$$\Delta R_c = \frac{1}{351}$$

Donc l'impact maximal de R_c vaut :

$$\Delta\alpha_{R_c} = 4\Delta R_c = 1.14\%$$

Quant à l'impact de l'erreur faite sur la puissance P_{rc} , nous avons la relation :

$$\Delta\alpha_{P_{rc}} = \Delta P_{rc} \quad (3.26)$$

Pour la gestion de cette partie nous utiliserons la quantification de l'erreur liée à la puissance mesurée faite à la section 3.5.3.1. Nous remarquons que l'erreur faite la détermination de σ_0 dépend directement de l'erreur faite sur la mesure de la puissance mais aussi indirectement par l'intermédiaire du coefficient de calibration α .

Si nous estimons l'influence d'une erreur de la SER des trièdres de calibration, nous pouvons écrire que :

$$\Delta\alpha_{\sigma_{th}} = \Delta\sigma_{th} \quad (3.27)$$

Or, les erreurs sur l'estimation de σ_{th} proviennent de :

- erreur sur la longueur d'arête Δa ,
- erreur sur la longueur d'onde $\Delta\lambda_0$,
- les imperfections du trièdre (non-orthogonalité) Δ_{orthog} .

ce qui se décrit avec la relation :

$$\Delta\sigma_{th} = \sqrt{(4\Delta a)^2 + (2\Delta\lambda_0)^2 + \Delta_{orthog}^2}$$

En se situant à la fréquence de 30 GHz (borne inférieure de la bande de fonctionnement) et en choisissant la précision de synthèse de fréquence égale à $\pm 0,7$ ppm [88], il est possible d'estimer l'erreur relative maximale que nous faisons sur la longueur d'onde. Il est aisé de montrer que :

$$\Delta\lambda_0 \approx \frac{\delta f_0}{f_0}$$

Ainsi nous avons :

$$\Delta\lambda_0 \approx 7 \times 10^{-7} \longrightarrow 0\%$$

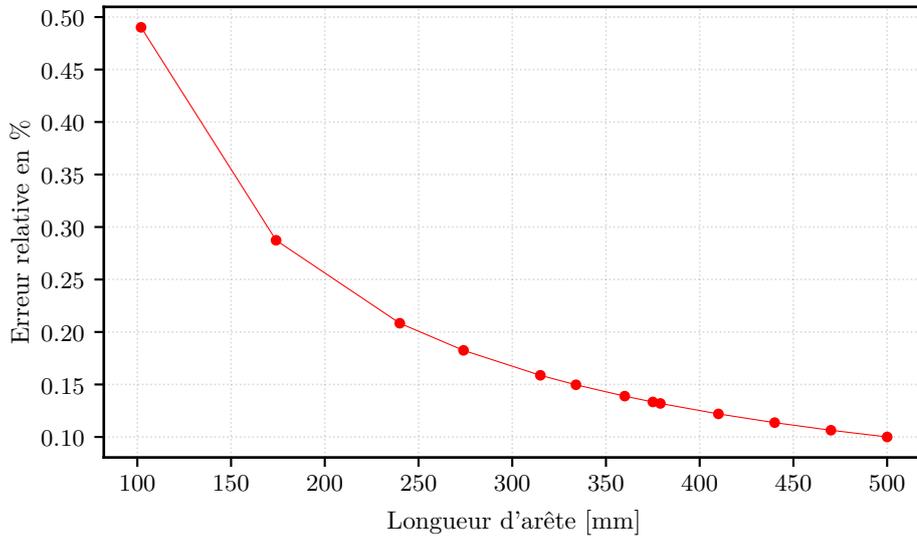


FIGURE 3.35 – Erreur relative par arête de trièdre

L'erreur que nous faisons sur la longueur d'onde est donc négligeable.

Il reste alors à quantifier l'erreur maximale faite sur la longueur d'arête et sur l'orthogonalité des faces des trièdres.

Concernant la longueur d'arête a , elle est mesurée par un outil de mesure de distance ayant un pas de 1 mm. La figure 3.35 illustre les erreurs relatives par arête de trièdre. Nous voyons donc que l'erreur relative maximale est « importante » car elle impacte 4 fois le coefficient de calibration α est de :

$$\Delta a_{max} = 0.49\%$$

Quand les faces du trièdres ne sont pas orthogonales, sa SER diminue donc pour la calibration. Ainsi les trièdres concernés sont rejetés en post-traitement (hors de la droite de régression).

Aux contributeurs identifiés avec l'équation (3.16), il faut aussi prendre en compte :

- l'impact du non alignement des axes radio-électriques de l'antenne et du trièdre Δcal_{align} ,
- la sensibilité à la température et à l'hygrométrie Δcal_{temp} et Δcal_{hygro} ,
- la dérive de fréquence Δcal_{freq} .

Nous rappelons que l'alignement des axes radio-électriques de l'antenne et du trièdre

Poste d'erreur	Valeur
$4\Delta R_c$	1.14%
ΔP_{rc}	ΔP_{rm}
$\Delta\sigma_{th}$	1.96%

TABLE 3.8 – Récapitulatif des postes d'erreur provenant du coefficient de calibration.

se fait à l'aide d'un viseur optique laser placé sur l'antenne et d'un autre placé au moment de positionner le trièdre. Cela assure un bon alignement des axes radio-électriques. Ainsi, durant la calibration, l'impact du non alignement des axes radio-électriques de l'antenne et du trièdre est négligeable.

Ensuite, l'antenne est très peu sensible à la température. Cette constatation est le résultat d'un test au cours duquel l'antenne a été mise dans un congélateur (pendant une nuit). La mesure du paramètre S_{11} le temps du réchauffement de l'antenne a montré l'impact négligeable de la sensibilité de l'antenne à la température.

Enfin, comme indiqué précédemment, la précision de synthèse de fréquence est de $\pm 0,7$ ppm. Cette précision rend négligeable la dérive en fréquence vu que nous sommes en bande Ka.

Ainsi la contribution du coefficient de calibration α sur σ_0 peut être décrite avec :

$$\Delta\sigma_{0\alpha} = \sqrt{(4\Delta R_c)^2 + \Delta P_{rc}^2 + \Delta\sigma_{th}^2 + \Delta cal_{align}^2 + \Delta cal_{temp}^2 + \Delta cal_{hygro}^2 + \Delta cal_{freq}^2}$$

et cette expression est alors simplifiée pour donner :

$$\Delta\sigma_{0\alpha} = \sqrt{(4\Delta R_c)^2 + \Delta P_{rc}^2 + \Delta\sigma_{th}^2} \quad (3.28)$$

Quant à l'influence de la grandeur β sur la grandeur σ_0 , nous avons :

$$\Delta\sigma_{0\beta} = \frac{\partial\beta}{P_{rm} - \beta} = \Delta\beta \frac{\beta}{P_{rm} - \beta} \quad (3.29)$$

De manière générale, la grandeur P_{rm} est largement supérieure à β ce qui implique une influence négligeable de β sur σ_0 :

$$\Delta\sigma_{0\beta} \sim 0$$

Ainsi pour un filtre IF de 15 MHz, nous avons :

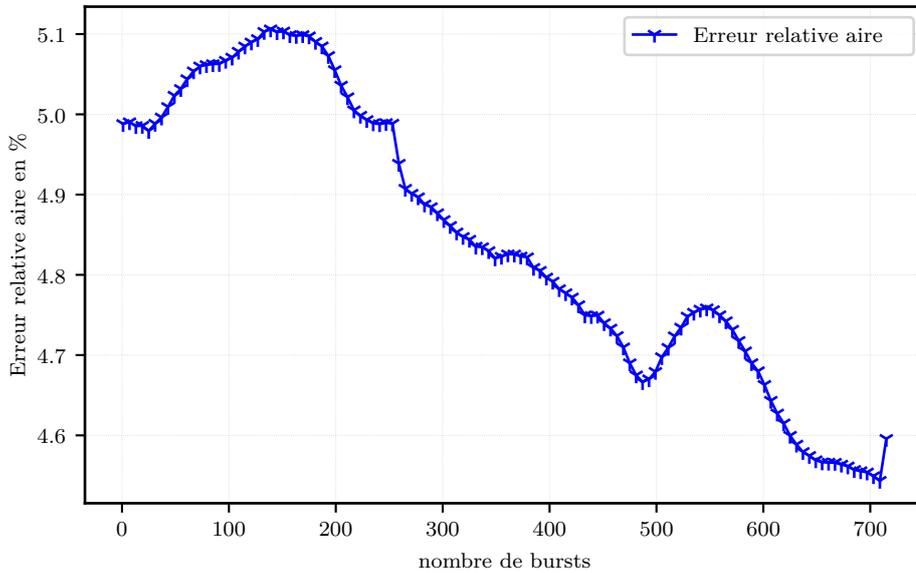


FIGURE 3.36 – Erreur relative de l'aire pour la bande IF de 15 MHz

$$\Delta\sigma_{0\alpha}(33.63 \text{ GHz}) = 3.61\%$$

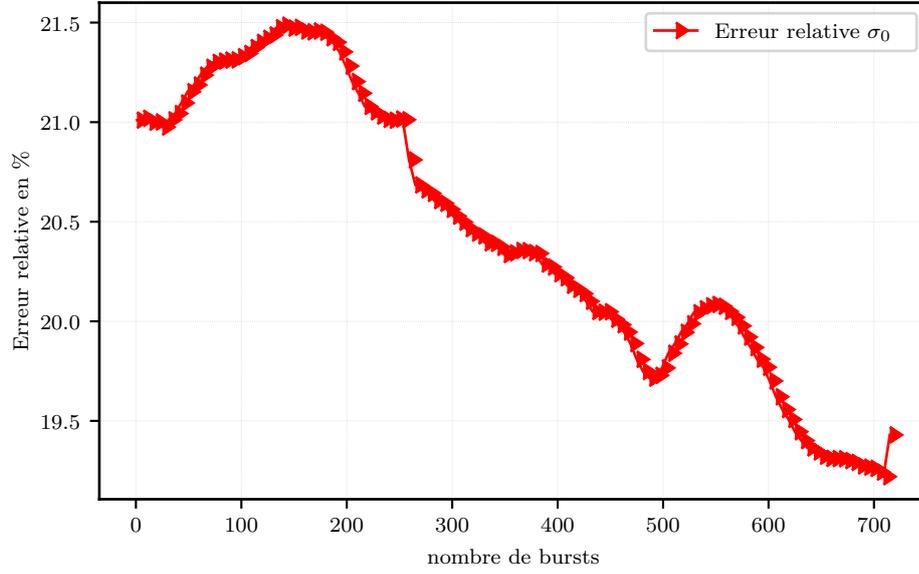
Il est possible de réitérer ce calcul pour les autres valeurs de fréquences de calibration.

3.5.3.4 Quantification de l'erreur liée à l'empreinte radar

L'équation (3.23) montre la contribution de la surface de l'empreinte radar de la scène à notre mesure de rétrodiffusion. Nous rappelons que la centrale inertielle nous donne pour chaque rafale :

- une précision de 0.05° sur le roulis et le tangage,
- l'altitude GPS avec une précision de moins de 2 m.

L'angle de dépointage est mesuré avec une précision de $0,01^\circ$, de même que les angles d'ouverture dans le plan E et H. Ainsi pour chaque rafale nous sommes capables de calculer l'erreur liée au calcul de l'aire. La figure 3.36 illustre l'erreur relative faite sur ce calcul à partir des données réelles acquises en campagne à une altitude de moyenne de 500 m à la fréquence de 33,63 GHz.


 FIGURE 3.37 – Erreur relative faite sur le σ_0 pour la bande IF de 15 MHz

3.5.4 Erreur sur la mesure de σ_0

Afin de prendre en compte la totalité des erreurs définies dans les paragraphes précédents, ces dernières sont sommées de manière quadratique pour obtenir la relation suivante :

$$\Delta\sigma_0 = \sqrt{\Delta\sigma_{0_{Prm}}^2 + \Delta\sigma_{0_{Rm}}^2 + \Delta\sigma_{0_{\beta}}^2 + \Delta\sigma_{0_{\alpha}}^2 + \Delta\sigma_{0_A}^2} \quad (3.30)$$

ce qui donne :

$$\delta\sigma_0 = \sigma_0 \sqrt{\Delta\sigma_{0_{Prm}}^2 + \Delta\sigma_{0_{Rm}}^2 + \Delta\sigma_{0_{\beta}}^2 + \Delta\sigma_{0_{\alpha}}^2 + \Delta\sigma_{0_A}^2} \quad (3.31)$$

Soit pour la fréquence de 33,63 GHz et IF de 15 MHz :

$$\Delta\sigma_0(33.63 \text{ GHz}) = \sqrt{18.461 + \Delta\sigma_{0_{Rm}}^2 + \Delta\sigma_{0_A}^2}$$

et

$$\delta\sigma_0(33.63 \text{ GHz}) = \sigma_0 \times \sqrt{18.461 + \Delta\sigma_{0_{Rm}}^2 + \Delta\sigma_{0_A}^2}$$

La figure 3.37 illustre l'erreur relative faite sur σ_0 à partir des données réelles acquises en campagne à une altitude de moyenne de 500 m à la fréquence de 33,63 GHz. De cela découle l'encadrement (figure 3.38) et l'erreur absolue (figure 3.39). Nous mesurons donc

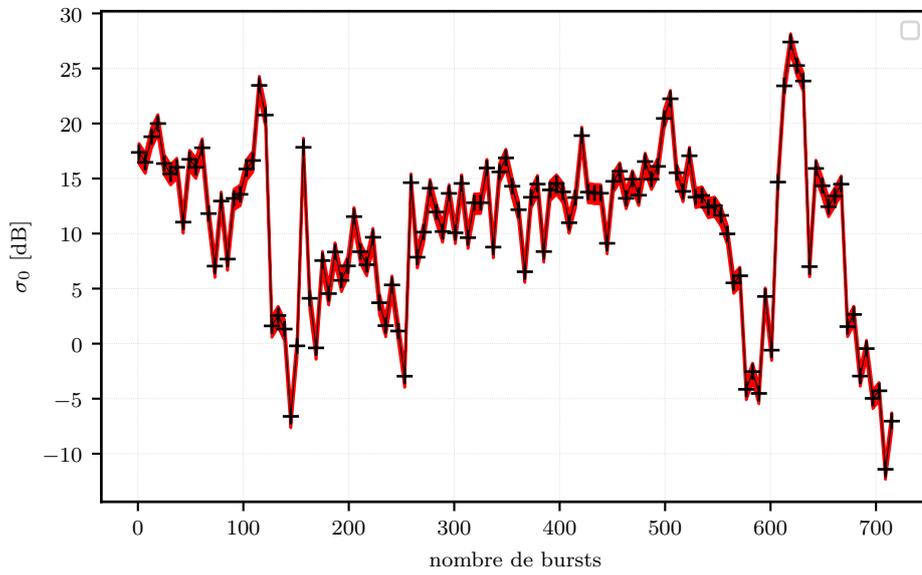


FIGURE 3.38 – Encadrement σ_0 pour la bande IF de 15 MHz

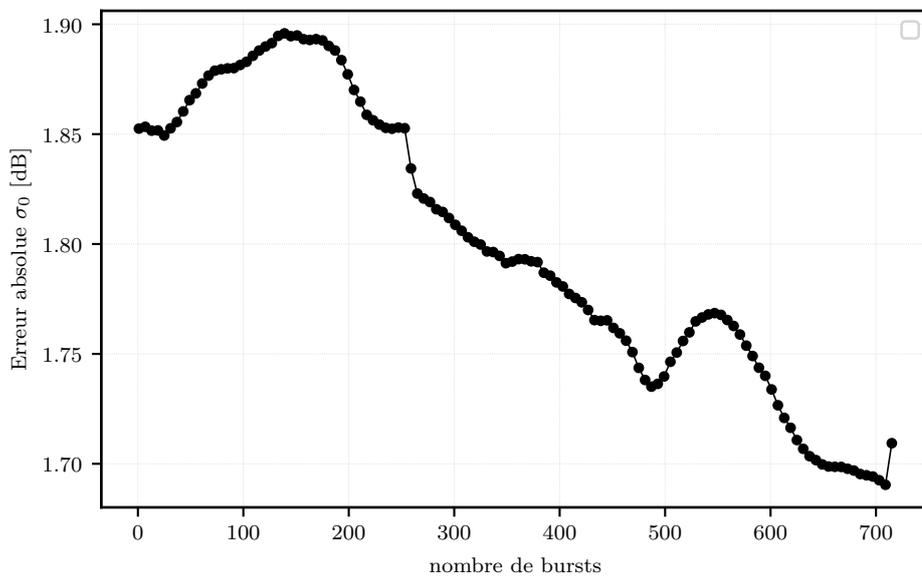


FIGURE 3.39 – Erreur absolue faite sur le σ_0 pour la bande IF de 15 MHz

le coefficient de rétrodiffusion σ_0 avec une précision de 1,8 dB.

Cette erreur absolue, bien qu'acceptable, demeure améliorable. En repartant de l'erreur relative sur l'altitude (figure 3.34), qui dans le cas de notre exemple est de l'ordre de 0,25%, les erreurs relatives de roulis, tangage et d'angle de dépointage étant négligeables, on peut montrer que seule la contribution de l'erreur faite à partir de la précision du modèle numérique d'élévation peut conduire à une telle hausse de l'erreur relative de la distance de visée, environ 3,15%. Cette erreur relative de la distance de visée impacte 4 fois l'erreur relative du σ_0 (équation 3.21 et 2 fois celle de l'aire (découlant de l'équation 3.12. Pour illustration, si au lieu de la précision SRTM de 16 m, nous avons une précision de 6 m, en déroulant tous les calculs (les autres paramètres inchangés), l'erreur absolue sur le coefficient de rétrodiffusion σ_0 devient 0,45 dB au lieu de 1,8 dB. Ainsi, les deux pistes d'amélioration qui s'offrent à nous, consistent à :

- soit l'utilisation un modèle numérique d'élévation beaucoup plus précis que SRTM,
- soit l'utilisation la méthode directe de calcul de la distance de visée sous condition d'avoir une bonne maîtrise du retard induit pas le PNA-X.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les opérations de calibration permettant de relier une puissance mesurée à une valeur de SER d'une cible calibrée. L'estimation de la SER normalisée σ_0 nous permet de définir les grandeurs qui ont une influence sur le résultat final et d'établir une estimation de l'erreur commise en fonction de la précision des paramètres utilisés.

Les capteurs SWALIS et KaRADOC sont donc maintenant entièrement décrits et sont opérationnels pour une utilisation dans des campagnes aéroportées de mesures (eaux continentales ou océan).

ANALYSE DES DONNÉES COLLECTÉES

Sommaire

4.1	Organisation des données	137
4.1.1	Organisation des données initiales (niveau L0)	137
4.1.2	Organisation des données traitées (niveau L1)	138
4.1.2.1	Données interprétées	138
4.1.2.2	Organisation des données L1	139
4.2	Concept SKIM - campagne SUMOS	142
4.2.1	Intégration du système KaRADOc	143
4.2.2	Mesure sur le site de Auch (vol du 11 février 2021)	143
4.3	Mission SWOT - campagne Marmande	146
4.3.1	Configuration de mesure	147
4.3.2	Discrimination et classement des mesures	151
4.3.3	Comparaison de la valeur de σ_0 pour différentes altitudes	154
4.3.4	Angles d'incidence et contraste terre-eau	158
4.3.4.1	Contraste terre-eau : zone T1	158
4.3.4.2	Contraste terre-eau : zone T2	162
4.3.4.3	Contraste terre-eau : zone T3	164
4.3.4.4	Contraste terre-eau : zone T4	165
4.4	Comparaison SWALIS/Sentinel-6	168
4.4.1	Données Sentinel-6 : radargramme de puissance	168
4.4.2	Positions SWALIS/Sentinel-6	172
4.4.3	Puissances SWALIS/Sentinel-6	173
4.4.3.1	Extraction des données	173
4.4.3.2	Comparaison sur la zone T3	173
4.4.3.3	Comparaison sur la zone T4	175

Introduction

Nous avons montré dans le chapitre 3 le processus d’obtention de la valeur de σ_0 en partant des données radar brutes et IMU récupérées pour chaque vol. Nous rappelons que le coefficient de rétrodiffusion σ_0 correspond à la SER normalisée par l’aire d’une cible distribuée. Cela constitue l’un des paramètres essentiels (avec la fréquence Doppler) pour l’analyse de la réflectivité d’une scène. Dans ce chapitre, nous présentons une étude du coefficient de rétrodiffusion sur les données acquises lors des diverses campagnes de mesures faites avec les capteurs SWALIS et KaRADOC [89].

Dans un premier temps, nous abordons la nature des informations fournies par les capteurs SWALIS et KaRADOC. En particulier, nous décrivons l’organisation des différents niveaux de données (L0 et L1) qui nous permettent de fournir à la fois les valeurs de σ_0 obtenues pendant les vols ainsi que la répartition de ces valeurs de puissances reçues et de σ_0 sur une carte de type géographique.

Ensuite, nous abordons les diverses campagnes impliquant SWALIS et KaRADOC. Pour l’utilisation du capteur KaRADOC, nous introduisons la campagne SUMOS 2021 pendant laquelle celui-ci a été utilisé. Cette campagne SUMOS (*SURface Measurements for Oceanographic Satellites*) est destinée à assurer une campagne de calibration/validation de la mission CFOSAT (*Chinese-French Oceanic SATellite*) avec le radar KuROS (*Ku band Radar for Observation of Surfaces*) construit par le LATMOS (*Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales*). Il est également donné l’opportunité de poursuivre les premières mesures effectuées pour SKIM en novembre 2018. Dans cette nouvelle campagne, nous utilisons la version améliorée par nos soins de KaRADOC permettant d’investir plusieurs angles d’incidence et de fournir des données calibrées. Pour cette campagne, nous choisissons de montrer les données exploitées correspondant aux vols tests lors de la phase d’intégration et ce, afin de montrer le potentiel de mesure du capteur KaRADOC. Les données obtenues lors de la campagne dans le golfe de Gascogne sont actuellement en cours d’exploitation et ne sont pas disponibles pour une analyse poussée dans ce document de thèse.

L’utilisation du capteur SWALIS est ici largement décrite par l’intermédiaire d’une campagne de mesure au-dessus de la Garonne afin d’appréhender le potentiel de notre radar dans le cadre des campagnes de calibration/validation de la mission SWOT. Nous présentons d’abord des résultats qualitatifs provenant des mesures d’optimisation de SWALIS dans la zone de Monterfil (retenue d’eau du barrage de la Chèze) et les premiers traite-

ments permettant d'exploiter le potentiel de SWALIS pour des mesures de rétrodiffusion en proche nadir. À travers ces traitements, nous mettons en évidence le contraste de la puissance des échos reçus entre la terre et l'eau (un des attendus du capteur SWALIS) et que nous appliquons sur une campagne d'analyse de la rétrodiffusion de la Garonne (dans les alentours de Marmande). De plus, les dates de cette campagne correspondent aussi au passage du satellite Sentinel-6 [55] sur la Garonne et nous concluons en proposant une analyse de comparaison entre les données Sentinel-6 et SWALIS.

Ainsi, pour exploiter les données enregistrées par les capteurs SWALIS et KaRADOC, il est nécessaire de pouvoir décrire leur organisation ainsi que la synchronisation qui est effectuée avec l'ensemble des données des capteurs intermédiaires (en particulier la centrale inertielle).

4.1 Organisation des données

La livraison des données s'effectue en respectant un rangement des répertoires des données enregistrées et des données traitées.

4.1.1 Organisation des données initiales (niveau L0)

Les données initiales sont de deux ordres : les données brutes radar et les données attitude/position (ces dernières proviennent des centrales inertielles IMU SBG ou IMU ATR). Il faut noter que les données IMU ATR ne sont disponibles que dans le cadre des mesures de la campagne SUMOS.

Les données brutes radar sont enregistrées dans un répertoire référencé avec l'heure d'enregistrement `heure_minute_seconde` et contenues dans des fichiers `.bin` fournis par le PNA-X. Chaque répertoire contient les données de configuration de la mesure et les données de *TimeStamps* pour la synchronisation avec la centrale inertielle SBG. Pour rappel, les données radar brutes fournies par le PNA-X, contiennent les parties réelles et imaginaires du signal reçu et ce, pour chacun des échantillons de toutes les impulsions. Ces données sont ensuite intégrées suivant le post-traitement illustré à la figure 3.1.

Les données des centrales inertielles SBG et ATR (quand les deux sont en service) sont rangées dans le répertoire décrivant différentes tranches horaires. De même, le fichier résumant l'ensemble des données de vol enregistrées par l'ATR est fourni sous cette même arborescence.

Des données intermédiaires sont créées afin d’organiser la synchronisation des mesures brutes radar et des données de la (ou les) centrale(s) inertielle(s) afin de fournir les données finales.

4.1.2 Organisation des données traitées (niveau L1)

Nos systèmes radar enregistrent les données radar dites de niveau L0. De même, la centrale inertielle SBG enregistre simultanément, et indépendamment, les données position, vitesse et attitude au plus près de l’antenne du système opérant. Pour le capteur KaRADOC, les données de la centrale inertielle de l’ATR sont aussi enregistrées et peuvent être utilisées à la place des données SBG. Deux étapes sont nécessaires pour fournir les données calibrées et synchronisées (données de niveau L1) avec les données de la centrale inertielle :

1. Décodage de la totalité des données de la centrale inertielle SBG (sur la durée de chaque vol) et extraction des données synchrones avec les données radar.
2. Synchronisation des données radar L0 avec les données centrale SBG.

De plus, la présentation des données de niveau L1 est aussi effectuée sous la forme de cartes décrivant l’évolution de la puissance reçue en fonction de la position de la trace au sol du lobe d’antenne. Cette position est obtenue en considérant les mouvements du porteur par rapport à son évolution idéale.

4.1.2.1 Données interprétées

Afin de représenter l’évolution de la puissance mesurée (ou de la valeur de σ_0) pendant l’enregistrement et de reporter cette évolution sur une carte, nous procédons au traitement des rafales à partir d’un seuil de sensibilité. Un exemple de ce traitement est décrit sur la figure 4.1. Sur cette figure, nous décrivons une succession de rafales (en rouge) et qui sont repérées par des impulsions très brèves (pics noirs) indiquant le début de chaque rafale. L’amplitude des impulsions représentant chaque rafale et résultant de l’intégration cohérente des N_p impulsions, est analysée en fonction d’un seuil de sensibilité (**sensitivity_level**) calculé avec le niveau moyen de puissance dans chaque rafale. La rafale est considérée comme écho si le niveau moyen de puissance dans cette dernière est supérieur au seuil de sensibilité d’une valeur donnée. C’est le critère de sensibilité nommé **sensitivity_criteria**. Par exemple, pour les mesures KaRADOC, cette valeur est de 3 dB avec un seuil de sensibilité de -69 dBm ($\beta_{(IF)}$) pour $IF = 1$ MHz) ce qui correspond

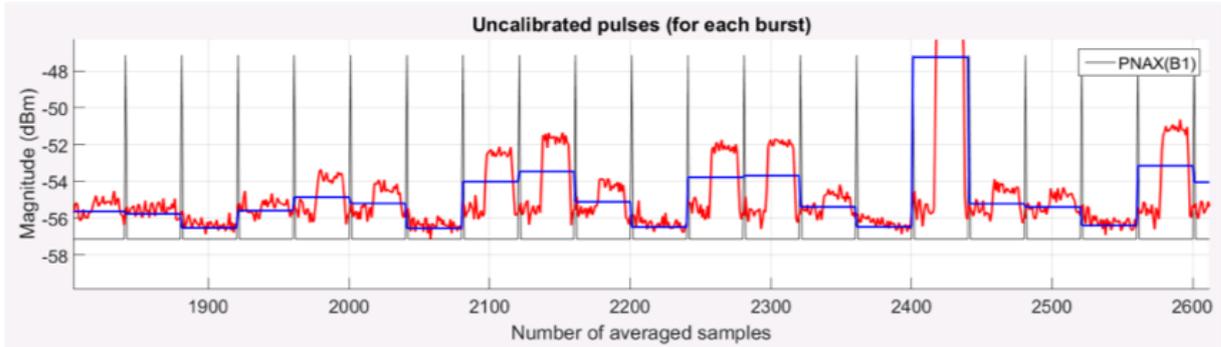


FIGURE 4.1 – Exemple de principe de la détermination de puissance pour chaque rafale (moyenne de N_P impulsions) reçue (en rouge) et le niveau moyen de puissance des échantillons d’une rafale (en bleu).

alors à une information utile (retour d’un écho exploitable). Ainsi nous ne considérons que les échos qui sont 3 dB au-dessus du seuil de sensibilité.

Une autre analyse est effectuée avec les données des centrales inertielles (ATR ou SBG) afin de corriger la position de la trace au sol de l’antenne en fonction des angles attitude (roulis, tangage et lacet). Cette prise en compte est décrite dans le paragraphe 3.3. Nous développons un outil de traitement permettant de placer chaque trace au sol sur une carte géographique. Chaque trace au sol est matérialisée par un cercle dont la couleur dépend de la puissance reçue intégrant la réponse globale de la scène illuminée. Un exemple de résultat est donné sur la figure 4.2. Pour réaliser cette illustration, nous décrivons l’organisation des données L1 disponibles à la suite du traitement des données L0.

4.1.2.2 Organisation des données L1

Nous ne décrivons pas ici la totalité de l’identification des données décrivant les mesures radar (sous un format demandé par le CNES pour la mise à disposition des données radar). Toutefois, nous précisons les grands principes de l’organisation des données L1. Pour un enregistrement, ce format se décompose comme suit :

1. **[DIMENSIONS]** Dimensions de l’enregistrement (fixes pour un enregistrement donné) où nous donnons, entre autres, le nombre de rafales, le nombre d’impulsions par rafale N_P , le nombre d’échantillons par impulsion $N_{\Delta T}$, la puissance en sortie du PNA-X.
2. **[VARIABLES]** Variables de l’enregistrement (données radar et données de la

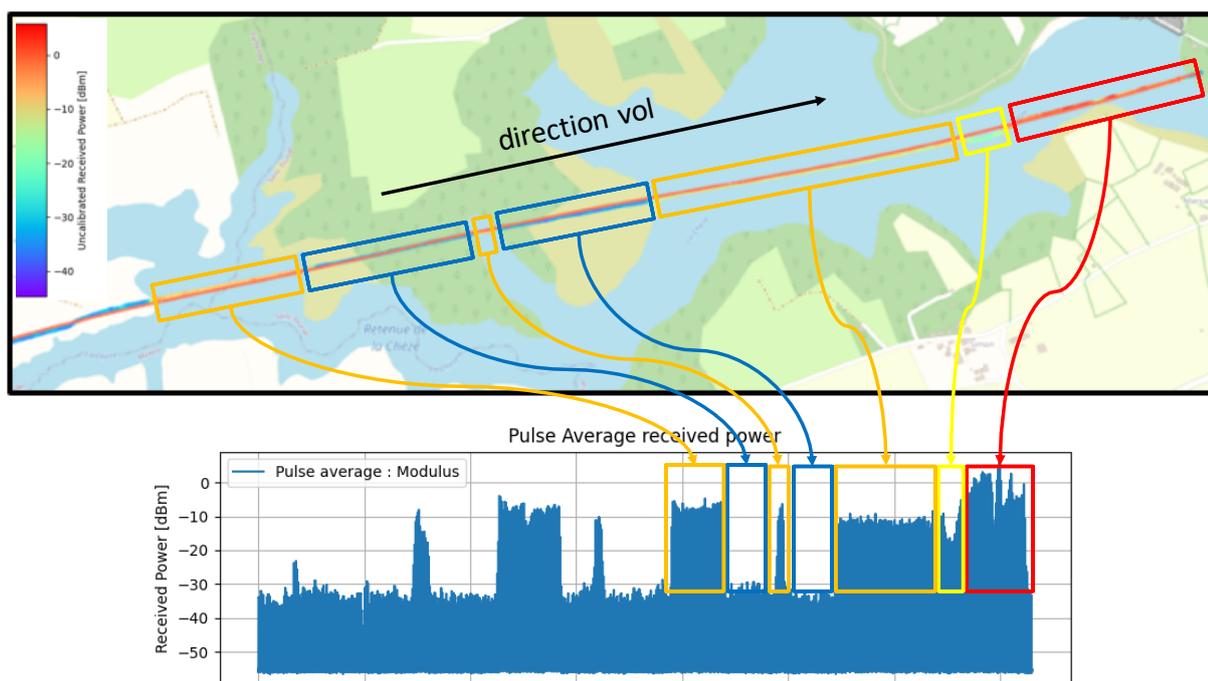


FIGURE 4.2 – Exemple d’une carte des puissances le long d’un transect (zone de la Chèze, 1 février 2022) : données L0 en correspondance avec une zone de rétrodiffusion précise -terre dans l’encadré bleu et eau pour les encadrés jaune, orange et rouge

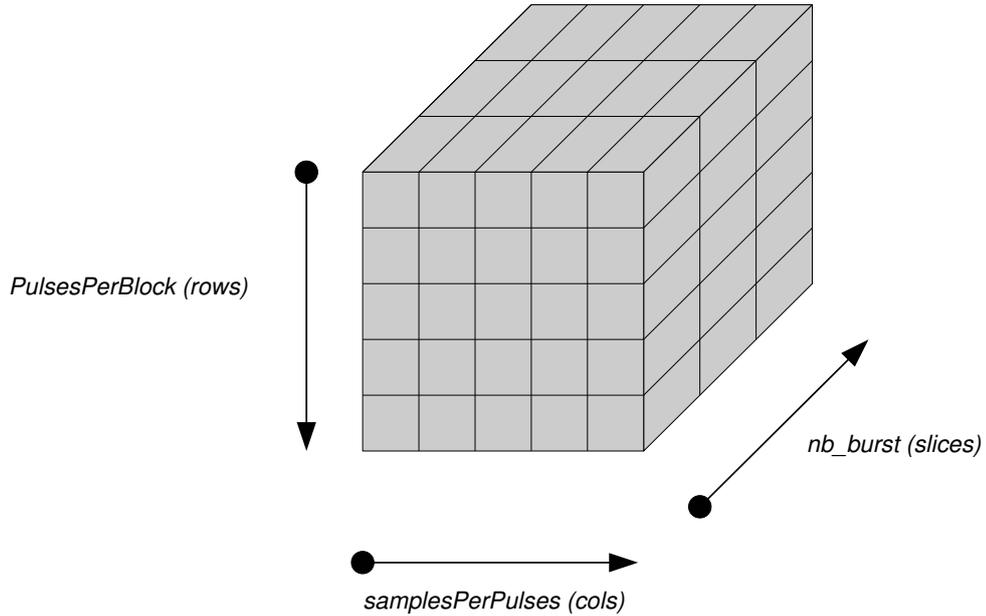


FIGURE 4.3 – Description de l’arrangement des données radar lors du stockage pour la structure de niveau L1 avec le nombre d’échantillons par impulsion, le nombre d’impulsions par rafale et le nombre de rafales.

centrale inertielle qui évoluent durant l’enregistrement) dont nous donnons l’arrangement des parties réelle et imaginaire de la mesure brute sur la figure 4.3. ainsi que l’intégration des impulsions pour 1 rafale donnée ce qui donne la description de la figure 4.4. Nous avons aussi des paramètres décrivant les données attitudes et les grandeurs géométriques calculées (comme la distance radioélectrique) à chaque début de rafale.

L’ensemble des données mesurées par nos capteurs SWALIS et KaRADOC sont maintenant décrites et exploitables au niveau L1 pour pouvoir fournir des informations de σ_0 et de fréquence Doppler pour chaque écho (retour d’une impulsion) et chaque rafale (intégration de N_p impulsions). Nous sommes donc en mesure d’exploiter de manière opérationnelle nos capteurs radar. Dans ce document, nous proposons d’exposer des résultats de la préparation de campagnes de calibration/validation (mission SWOT) au-dessus de la Garonne ainsi que des résultats d’intégration d’une campagne de mesures utilisant le capteur KaRADOC (concept SKIM).

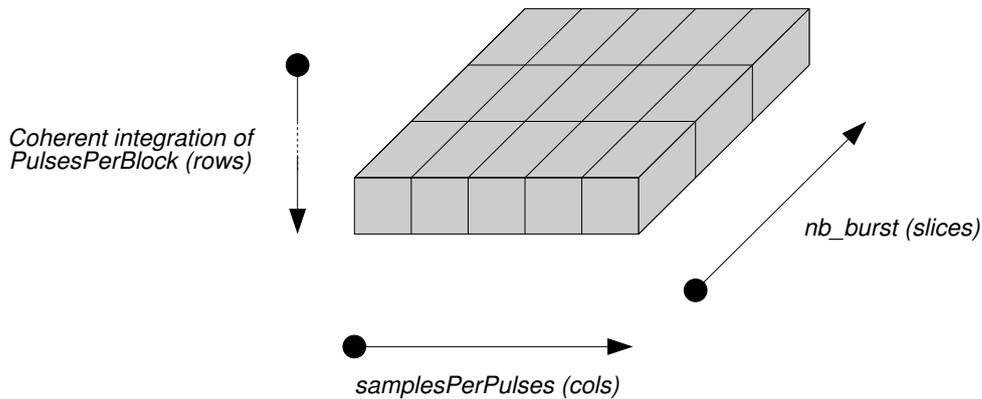


FIGURE 4.4 – Description de l’arrangement des données radar après intégration du nombre des impulsions définissant une rafale (stockage pour la structure de type L1)

4.2 Concept SKIM - campagne SUMOS

L’équipe scientifique de la mission CFOSAT a organisé du 15 février au 5 mars 2021 une campagne (SUMOS) pour valider la qualité des produits vagues de cette mission franco-chinoise. Comme indiqué auparavant, le système radar KuROS, développé par le LATMOS, est intégré à bord d’un ATR-42 opéré par l’UAR CNRS SAFIRE qui a survolé plusieurs traces de la mission CFOSAT au moment du passage du satellite. En parallèle, l’IFREMER a déployé sur mer un ensemble de capteurs pouvant remonter la vérité « terrain » in-situ [90] [91].

Cette campagne a aussi été une opportunité pour prolonger l’expérimentation SKIM réalisée en novembre 2018 (DRIFT4SKIM) et pour laquelle le capteur KaRADOC (à l’époque sous la forme d’un prototype de laboratoire) a pu démontrer la pertinence d’une mesure à très faible angle d’ouverture ($1,5^\circ$) pour fournir une mesure Doppler et accéder à une mesure de courant de surface [59]. Cette mesure est couplée avec une mesure de spectre de vagues (KuROS).

Ainsi, des vols dédiés à la mesure du courant de surface sont ajoutés à la campagne SUMOS sous le nom de « SKIM2020 ». Il s’agit d’utiliser et d’améliorer le capteur KaRADOC afin d’assurer de nouvelles données radar pour consolider l’expérience DRIFT4SKIM. Cette intégration de KaRADOC se fait en participant aux travaux de la campagne de tests et de mesures.

4.2.1 Intégration du système KaRADOC

L'intégration du système KaRADOC a été réalisée du lundi 8 février au vendredi 12 février 2021 sur le site de Franczal, dans le porteur ATR-42 de l'UAR SAFIRE (voir figure 4.5). Durant cette période d'intégration, deux journées de vols ont été réalisées : vol EMI (tests de CEM des capteurs embarqués vis à vis du fonctionnement de l'ATR avec un survol de la Méditerranée à plusieurs altitudes) et vols cibles (lac Puydarieux et aérodrome d'Auch). Nous proposons un exemple de résultats sur l'aérodrome d'Auch après traitement des données KaRADOC.

4.2.2 Mesure sur le site de Auch (vol du 11 février 2021)

Ces résultats concernent les vols cible au-dessus de l'aérodrome de Auch et sur lequel étaient déployés les trièdres cible pour l'étalonnage du capteur KuROS (voir figure 4.6). Les orientations des trièdres ne sont pas optimales pour KaRADOC (visée latérale) ce qui implique que les échos mesurés ne sont pas significatifs mises à part les mesures effectuées dans un environnement hétérogène (zones urbaines, semi-urbaines, rurales, avec cours d'eau). Toutefois, une trajectoire doit permettre de détecter un trièdre au sol : trajectoire « KaRADOC_FL15_3 ».

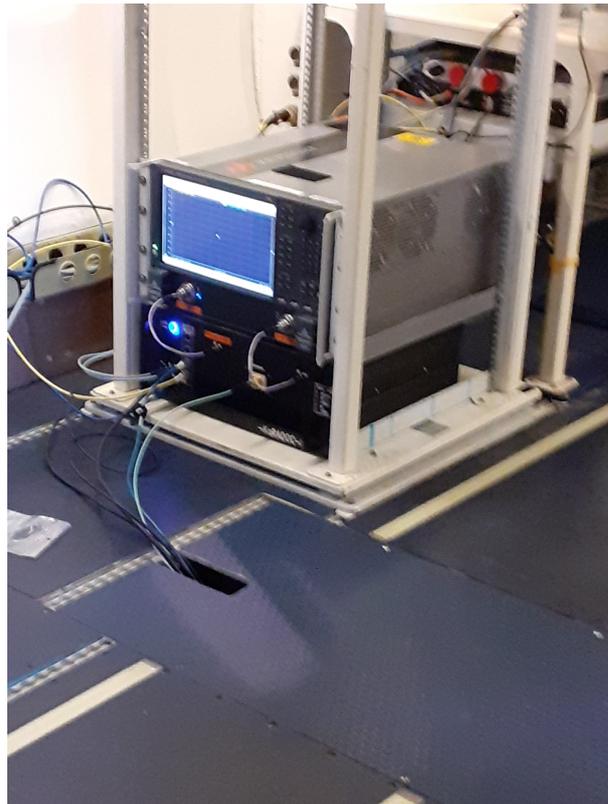
Dans un premier temps, nous décrivons le résultat de la mesure que nous avons sans appliquer de corrections à partir des données IMU (figure 4.7). Après la prise en compte des données attitudes du porteur, nous décrivons sur la figure 4.8 le niveau de puissance mesuré par KaRADOC en fonction de certaines trajectoires au-dessus de Auch (sens ouest-est). Nous pouvons exprimer quelques remarques concernant les mesures de ce vol. Grâce à la correction, nous retrouvons bien le retour d'un trièdre (niveau de puissance rétrodiffusée avec une dynamique de 20 dB au-dessus des retours voisins) placé sur l'aérodrome d'Auch lorsque le porteur passe au travers du champ des trièdres. De plus, nous situons bien la position d'un plan d'eau situé à l'ouest de l'aérodrome : le niveau de puissance rétrodiffusée est inférieur au seuil de sensibilité.

Ces premiers résultats indiquent que la dynamique du système radar KaRADOC permet de détecter et positionner des zones à forte rétrodiffusion (trièdre) comparées à des zones de faible rétrodiffusion (zone d'eau « tranquille » à angle d'incidence local inférieur à 10°). Il est donc envisageable pour KaRADOC d'effectuer des mesures de calibration avec des trièdres au sol permettant de calibrer le système.

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, nous ne présentons pas dans ce do-



(a) Intégration de la bassine dans la trappe ATR et supportant l'antenne et la centrale inertielle



(b) Intégration de KaRADOC dans la baie ATR

FIGURE 4.5 – Intégration dans l'ATR.

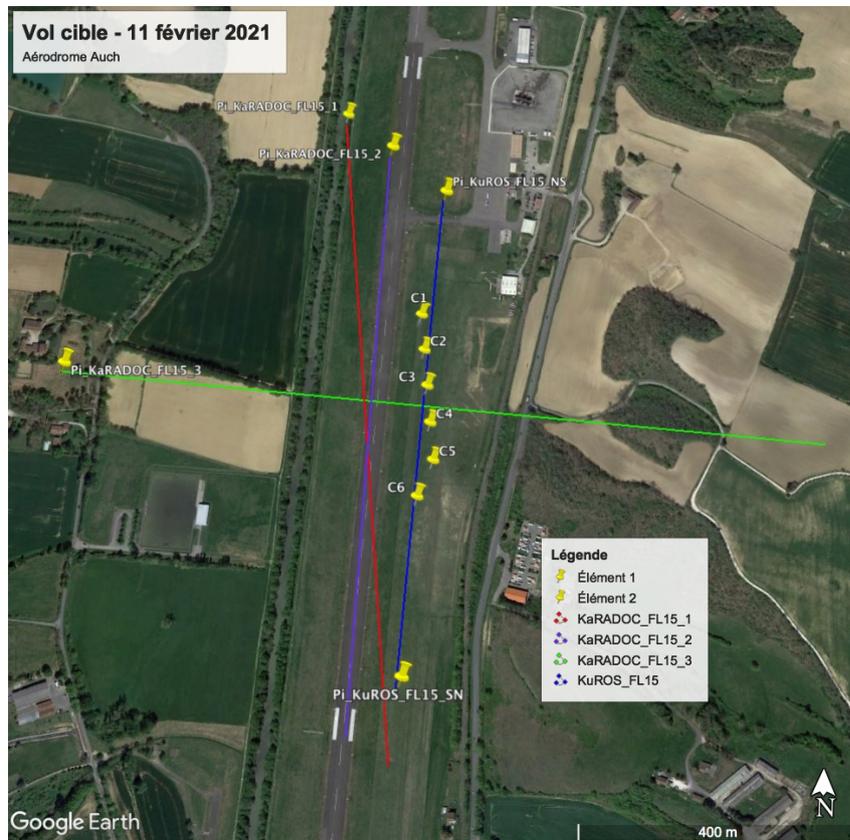


FIGURE 4.6 – Description des trajectoires possibles au-dessus de l’aérodrome d’Auch.



FIGURE 4.7 – Extrait des puissances rétrodiffusées (rétrodiffusion vers le radar importante en rouge et rétrodiffusion vers le radar très faible en violet) lors du vol au-dessus de l’aérodrome de Auch (sans correction)



FIGURE 4.8 – Carte des puissances de rétrodiffusion (rétrodiffusion vers le radar importante en rouge et rétrodiffusion vers le radar très faible en violet) le long de la trace « KaRADOC_FL15_3 » au-dessus de l'aérodrome de Auch (avec corrections).

cument, les résultats obtenus dans le golfe de Gascogne (les résultats sont en cours de consolidation). Nous abordons maintenant la partie utilisant le capteur SWALIS en préparation de campagnes de calibration/validation de la mission SWOT.

4.3 Mission SWOT - campagne Marmande

Dans le cadre de la calibration/validation de la mission SWOT, le capteur SWALIS est destiné à fournir des données de rétrodiffusion afin de permettre une comparaison des données satellitaires avec les données SWALIS. La nature de ces données concerne essentiellement la valeur de σ_0 . Afin de préparer ces campagnes de calibration/validation, nous déployons le capteur SWALIS au-dessus d'un site choisi en France pour la calibration SWOT : la Garonne. Si ce fleuve est très long (529 km), nous nous contentons de valider les mesures SWALIS dans le secteur de Marmande (figure 4.9). Cette campagne (juin-juillet 2022) a pour but dans un premier temps d'effectuer des mesures à différentes hauteurs afin de vérifier la non-dépendance en hauteur de la valeur du σ_0 obtenue à partir des données de SWALIS. Ensuite, nous effectuons des analyses statistiques pour montrer en particulier la capacité du capteur SWALIS à discriminer les zones illuminées par notre système radar. Enfin, nous proposons une comparaison des données de rétrodiffusion du capteur SWALIS avec des données de mesure de puissance issues d'un radargramme fourni par Sentinel-6 lors de son passage sur Marmande les jours de la campagne de mesures.

La première étape du traitement consiste à sélectionner les données provenant de zones « eau » parmi l'ensemble des mesures effectuées (pouvant aussi provenir de zones « terre »). Il est donc essentiel de définir et expliquer la procédure de mesures ainsi que



FIGURE 4.9 – Le bassin de la Garonne et ses principales rivières [92]

la classification de ces mesures.

4.3.1 Configuration de mesure

Les données analysées dans cette partie, sont acquises lors de la campagne Marmande 2022, le 08 juillet, sur la Garonne. Le retour d'expérience d'une campagne de préparation effectuée le 28 juin 2022 nous a permis de définir la configuration à adopter pour cette collecte de données. Le tableau 4.1 résume cette configuration. Pour chaque configuration, nous effectuons des mesures à deux hauteurs différentes afin de comparer le coefficient de rétrodiffusion σ_0 .

Dans le but de pouvoir couvrir toute la Garonne, qui fait environ 120 m de large, nous optons pour une mesure multi-fréquentielle qui induit un balayage du faisceau de l'antenne. Ainsi nous faisons varier la fréquence des rafales de 32,75 GHz à 35,86 GHz soit un dépointage du faisceau d'antenne de $-1,63^\circ$ à $4,37^\circ$ autour du nadir. Le tableau 4.2 récapitule les fréquences choisies et l'angle de dépointage souhaité du faisceau d'antenne associé à chacune de ces fréquences. Toutefois, les angles réels de dépointage du faisceau de l'antenne par rapport au nadir sont différents des angles d'incidence locale à cause de

Largeur d’impulsion τ	1 μ s
Fréquence de répétition des impulsions (PRF)	4 kHz
Largeur de filtre IF	15 MHz
Fréquence d’échantillonnage f_e	20 MHz
Nombre d’échantillons par impulsion	100
Nombre d’impulsions par rafale N_p	50
Nombre de fréquences	6
Vitesse nominale du porteur	40 m/s
Hauteurs nominales	500 m et 700 m

TABLE 4.1 – Configuration de la mesure de SWALIS pour la campagne Marmande 2022 (08 juillet).

f_i (GHz)	32,75	33,63	36,64	35,08	35,29	35,45	35,86
Angle de dépointage ($^\circ$)	-1,63	-0,14	1,83	2,75	3,06	3,57	4,37

TABLE 4.2 – Tableau des fréquences choisies : angle de dépointage souhaité pour la campagne Marmande 2022.

l’attitude du porteur (attitudes roulis et tangage) qui ne sont pas nuls (voir paragraphe 3.3.3). Afin d’éviter les grandes variations de ces angles d’incidence locale, le porteur ne peut pas suivre la trajectoire sinueuse de la Garonne comme l’illustre la figure 4.10 où nous voyons qu’il est compliqué de maintenir les faisceaux de l’antenne sur la zone d’intérêt. Nous avons donc défini quatre transects d’intérêt pour le survol et la mesure (zones en rouge sur la figure 4.11). Sur cette figure, nous indiquons la trace de Sentinel-6, le masque en eau de la Garonne ainsi que les transects de mesure. Ces transects sont choisis selon les critères suivants :

- transects linéaires (pas de « virage »),
- transects les plus longs possibles,
- transects les plus parallèles à la trace de Sentinel-6.

Ainsi du nord vers le sud sur la figure 4.11, nous avons respectivement les zones d’intérêts suivantes :

- la zone T1 pour le transect T1 long de 2 km,
- la zone T2 pour le transect T2 long de 3,3 km,
- la zone T3 pour le transect T3 long de 3,1 km,
- la zone T4 pour le transect T4 long de 3,6 km.

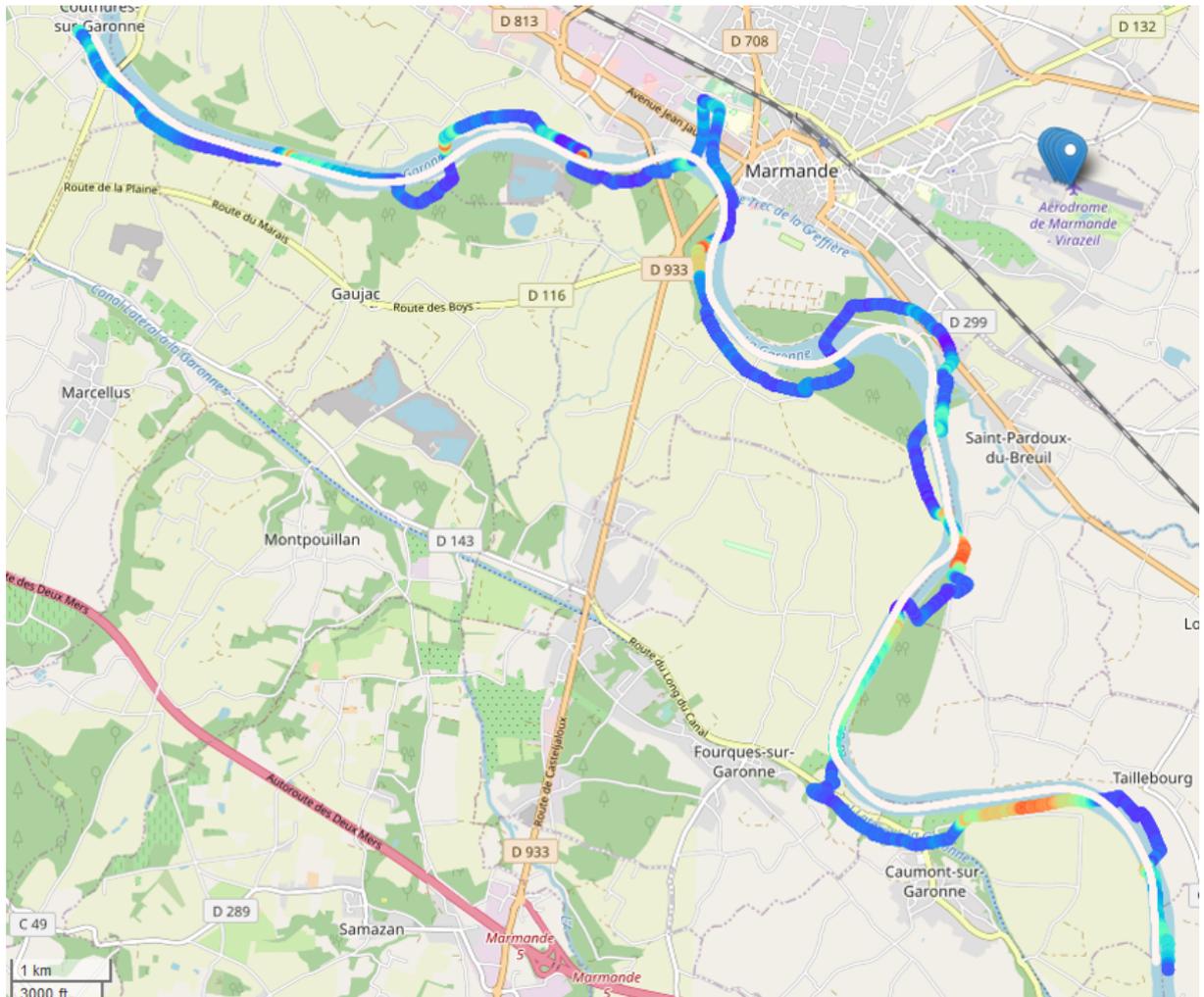


FIGURE 4.10 – Exemple de mesures « longues » le long de la Garonne (rétrodiffusion vers le radar importante en rouge et rétrodiffusion vers le radar très faible en bleu).



FIGURE 4.11 – Trace Sentinel-6 en bleu, contour dynamique de la Garonne en blanc et transects de mesure d'intérêt pour SWALIS en rouge. Fond de carte : google earth

Nous effectuons sur chaque zone huit passages dans la direction nord-sud proche de la rive gauche de la Garonne afin que la plupart de nos rafales correspondent à une visée sur la surface de l'eau. Sur chaque zone, les quatre premiers passages correspondent à des

Zones	Nombre de rafales	Nombre de rafales utiles
Zone T1	2603	1190
Zone T2	4680	3100
Zone T3	3960	2402
Zone T4	5460	3902
Zone terre	2737	2101

TABLE 4.3 – Tableau de répartition des bursts enregistrés et utiles par zones.

acquisitions faites à une altitude de 500 m et les quatre derniers à 700 m.

Nous définissons aussi une zone dite « terre » à côté de la zone T4 afin d’avoir à notre disposition des mesures uniquement au-dessus de zones dites « terre ». Cette zone permet d’avoir un nombre suffisant de mesures afin de pouvoir effectuer des statistiques sur les données « terre ».

Du point de vue du volume des données, nous avons enregistré, toutes zones confondues, un total de 19440 rafales soit 3240 rafales pour chaque angle de dépointage. La répartition de ces mesures en fonction des différentes zones est indiquée dans le tableau 4.3. Dans ce tableau, nous abordons la définition d’une rafale utile comme une rafale dont l’angle d’incidence locale est compris dans l’intervalle $[0^\circ, 5^\circ]$ puisque nos angles de dépointage souhaités vont de $-1,66^\circ$ à $4,37^\circ$ (angles directement déduits du tableau 4.2). Certaines mesures ne satisfaisant pas cette définition, nous remarquons une baisse de la quantité de données à exploiter pour le reste de notre analyse.

En plus de l’acquisition des rafales, le système SWALIS dispose d’un appareil photo permettant d’effectuer des prises de vue de la scène survolée. La figure 4.12 illustre la reconstruction optique des zones T1, T2, T3 et T4 avec les photos prises pendant les vols.

4.3.2 Discrimination et classement des mesures

Pour analyser les données acquises, il faut que nous les classions afin de pouvoir travailler sur celles qui correspondent à une rétrodiffusion sur l’eau ou sur la terre pour chacune des quatre zones. Cette discrimination se fait donc en fonction de la position de la trace au sol, de son rayon et du masque d’eau dynamique de la Garonne fourni par le CNES au moment de la campagne. À partir de ces paramètres, nous mettons en place une routine nous permettant de faire le tri des données. Il faut rappeler que le rayon de



FIGURE 4.12 – Reconstruction optique des zones de T1 (la plus à gauche) à T4 (la plus à droite)

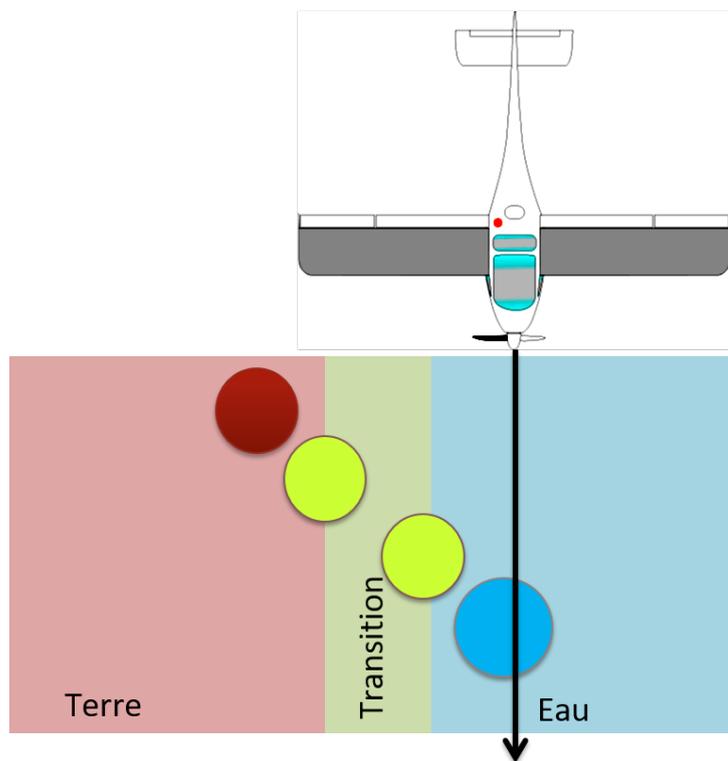


FIGURE 4.13 – Schéma décrivant la stratégie de discrimination

la trace au sol est défini à -3 dB du lobe principal de l'antenne. Ainsi nous distinguons trois classifications de zone de rétrodiffusion possible comme décrit sur la figure 4.13 :

- zone « **EAU** » : la rafale est considérée dans cette zone si toute la trace correspondante est sur l'eau (soit à l'intérieur du masque d'eau),
- zone « **TERRE** » : la rafale est considérée dans cette zone si toute la trace correspondante est sur la terre (soit à l'extérieur du masque d'eau),
- zone « **TRANSITION** » : la rafale est considérée dans cette zone si la trace correspondante chevauche le contour du masque d'eau.

Il est clair que le choix d'avoir une trace appartenant à une zone ou à une autre dépend de la position du centre de la trace mais aussi du rayon de cette trace. Ce rayon correspond à une ouverture du lobe principal à -3 dB. Une étude plus approfondie doit aussi faire évoluer cette valeur. Nous indiquons aussi que cette discrimination est efficace à condition d'avoir un masque d'eau le plus récent possible de la Garonne.

Incidence locale	Zone T1		Zone T2		Zone T3		Zone T4	
	500 m	700 m						
[0 - 1]	42	14	41	75	94	78	143	29
[1 - 2]	96	53	230	266	154	207	457	326
[2 - 3]	188	45	428	240	252	150	546	353
[3 - 4]	215	124	324	187	298	130	476	278
[4 - 5]	130	97	155	177	250	127	242	218

TABLE 4.4 – Nombre de rafales utiles sur l'eau pour les différentes hauteurs par classe d'angle d'incidence locale

4.3.3 Comparaison de la valeur de σ_0 pour différentes altitudes

Le but de cette partie est de voir l'évolution du σ_0 en fonction de la hauteur du porteur lors de l'acquisition et pour les différentes classes d'angle d'incidence locale. Nous cherchons à mettre en évidence ainsi l'indépendance du σ_0 par rapport à la hauteur de mesure mais aussi sa dépendance aux différentes classes d'angle d'incidence locale. Le tableau 4.4 récapitule la quantité de rafales utiles sur l'eau pour les différentes hauteurs par classe d'angle. À partir des données de ce tableau, nous indiquons les moyennes et écart-types pour chaque hauteur et classes d'angles pour toutes les zones d'intérêt. Les moyennes et les écart-types sont calculés, dans cette section, sur l'ensemble des valeurs de σ_0 en dB, car sans dimensions :

$$\sigma_0 [dB] = 10 \log \left(\frac{\sigma [m^2]}{A [m^2]} \right)$$

Nous remarquons que il y a très peu de données sur la zone T1 (transect très court et porteur PIMA peu stable par rapport aux trois autres zones). Les zones T3 et T4 correspondent à un nombre important de données et sont ainsi les zones pouvant fournir les résultats les plus intéressants en terme d'analyse.

La figure 4.14 montre la superposition des mesures pour les quatre zones à 500 m et à 700 m de hauteur. Nous remarquons la tendance décroissante de la valeur σ_0 quelque que soit la configuration de hauteur. Toutefois, nous remarquons un comportement différent suivant les zones d'analyse.

Puisque les zones semblent avoir une influence sur l'analyse de la valeur de σ_0 , nous proposons une description plus détaillée par zone afin d'identifier celles pour lesquelles la

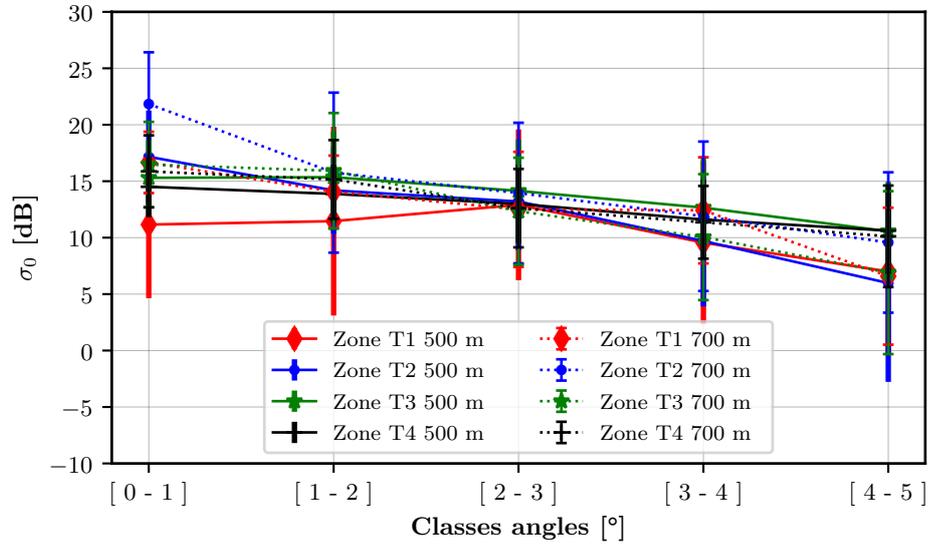


FIGURE 4.14 – Comparaison des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ à différentes altitudes : superposition des mesures pour les quatre zones

valeur de $\langle \sigma_0 \rangle$ est indépendante de la hauteur avec un comportement comparable. Il faut noter aussi que les états de surface de la Garonne ne présentent pas des disparités importantes en moyenne entre les segments. Enfin, nous rappelons que les populations de chaque classe d'angles et pour chaque segment sont renseignées dans le tableau 4.4.

Dans un premier temps, la figure 4.15 représente l'évolution de la valeur de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle sur la zone T1 ainsi que les écart-types associés. Nous remarquons que les écart-types sur les valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ sont suffisamment importants pour englober la disparité des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ mais que les différences sont relativement importantes entre les 2 valeurs de hauteur (de l'ordre de 4 dB et pour certaines gammes d'angle).

Ensuite, la figure 4.16 illustre les valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ pour les deux hauteurs sur la zone T2. Nous observons une variation d'écart pour les mesures entre 500 m et 700 m. Les écart-types sont plus importantes à 700 m en comparaison de ceux à 500 m. Malgré tout, nous observons bien une décroissance en fonction de l'angle d'incidence.

Puis, la figure 4.17 illustre un bon accord des valeurs $\langle \sigma_0 \rangle$ pour les deux hauteurs sur la zone T3. De plus, les écart-types sont plutôt comparables. Nous observons bien une décroissance en fonction de l'angle d'incidence.

Enfin, la figure 4.18 illustre un très bon accord des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ pour les deux

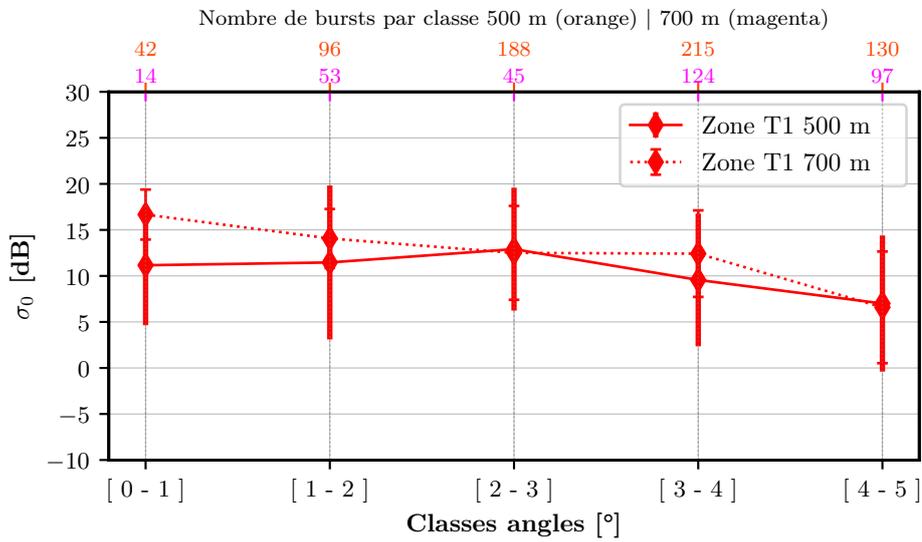


FIGURE 4.15 – $\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle

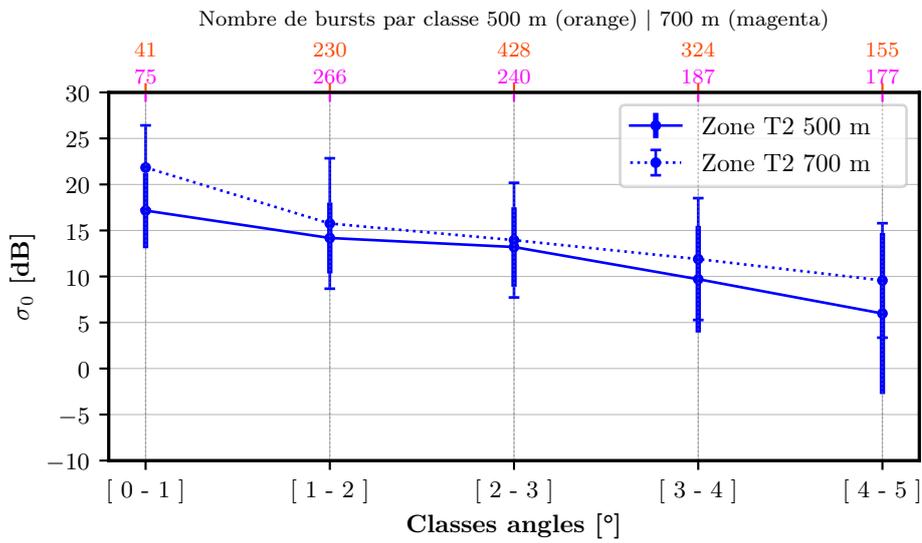
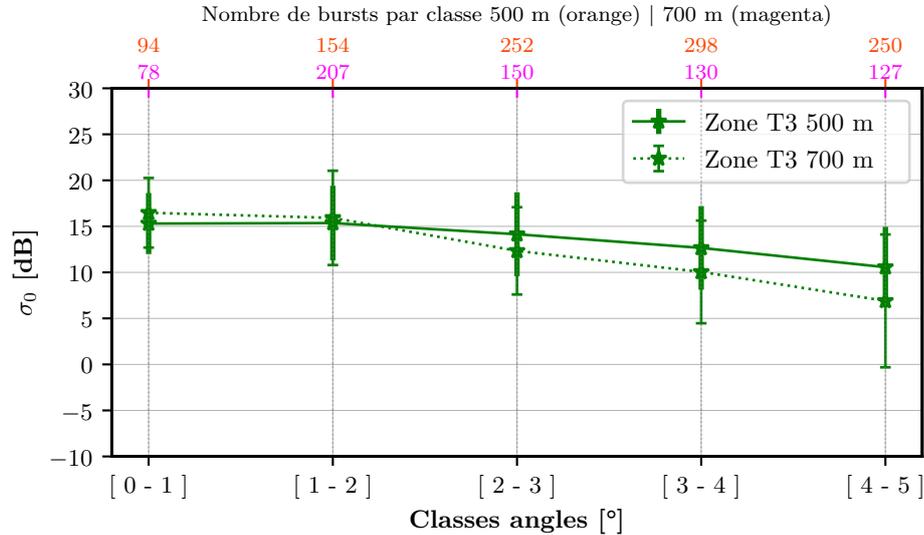


FIGURE 4.16 – $\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle

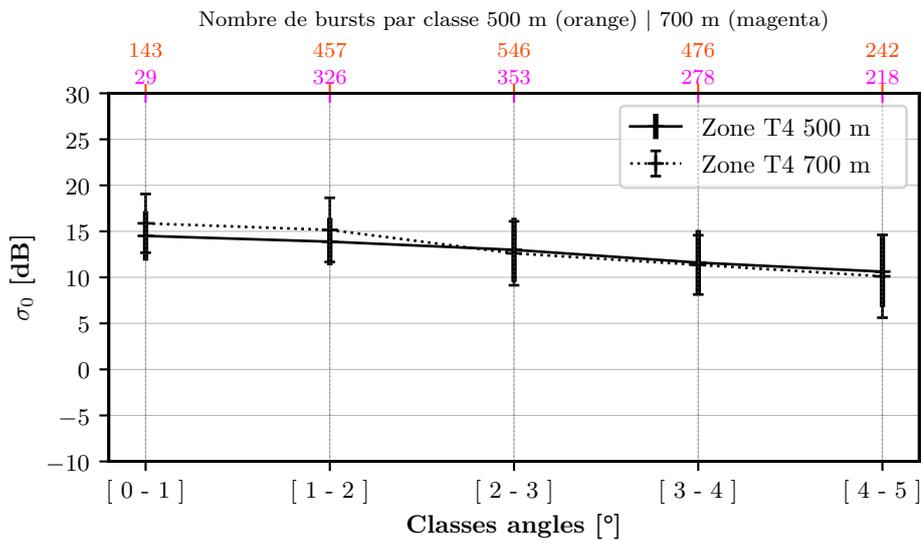
FIGURE 4.17 – $\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle

hauteurs sur la zone T4. Les écart-types sont comparables également. Nous observons bien une décroissance en fonction de l'angle d'incidence.

Une analyse intermédiaire consiste à interpréter les résultats en fonction du petit nombre de données utilisé pour obtenir les résultats de $\langle \sigma_0 \rangle$ et l'écart-type associé en fonction des hauteurs. Pour la zone T3, les classes d'angle pour lesquelles nous avons une différence de $\langle \sigma_0 \rangle$ sont celles qui présentent une différence importante du nombre de données disponibles. Nous n'avons pas cette même différence pour la zone T4 ; zone pour laquelle le nombre de données est plus important et équivalent entre les deux hauteurs d'acquisition. Le faible nombre de données disponibles pour le traitement radar est donc une explication de cette variation de $\langle \sigma_0 \rangle$: pour la zone T3, la valeur finale de $\langle \sigma_0 \rangle$ n'est pas atteinte car nous n'avons pas suffisamment d'échantillons.

Nous concluons cette partie en mettant évidence la décroissance des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des angles d'incidence et surtout son indépendance par rapport à la hauteur de mesure, essentiellement visible sur les zones T3 et T4. Une explication de la différence de $\langle \sigma_0 \rangle$ entre les hauteurs et pour certaines classes d'angle correspond au nombre plus important de données pour les segments T3 et T4 par rapport à T1 et T2.

Une autre manière d'étudier le comportement des mesures est d'effectuer une répartition des données en fonction des angles d'incidence et du type de zone éclairée. Cette répartition doit pouvoir mettre en évidence la capacité à effectuer une discrimination


 FIGURE 4.18 – $\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle

efficace entre les zones « eau » et les zones « terre ».

4.3.4 Angles d'incidence et contraste terre-eau

Comme précédemment, nous effectuons cette analyse pour chaque segment mesuré mais en tenant compte cette fois-ci de la rétrodiffusion des zones « terre ». Nous rappelons que cette classification entre les zones « terre » et « eau » est rendue possible avec la fourniture du masque d'eau sur la Garonne par le CNES.

4.3.4.1 Contraste terre-eau : zone T1

La figure 4.19 représente le masque dynamique de l'eau sur la zone T1 avec deux bancs de sable en gris. Sur ce masque, nous venons superposer les traces du premier passage sur la zone T1 comme illustré sur la figure 4.20a ainsi que les huit passages correspondant à la zone T1 sur le masque d'eau de la zone (figure 4.20b) Nous pouvons constater des données dans le masque d'eau et hors le masque d'eau ce qui correspond à des illuminations pendant des mouvements du porteur non compensés par la nacelle de stabilisation (fortes valeurs de roulis et/ou de tangage).

Ensuite nous procédons au classement des données suivant les zones de rétrodiffusion définies au-dessus (angle d'incidence et altitudes confondus). Nous pouvons ainsi afficher

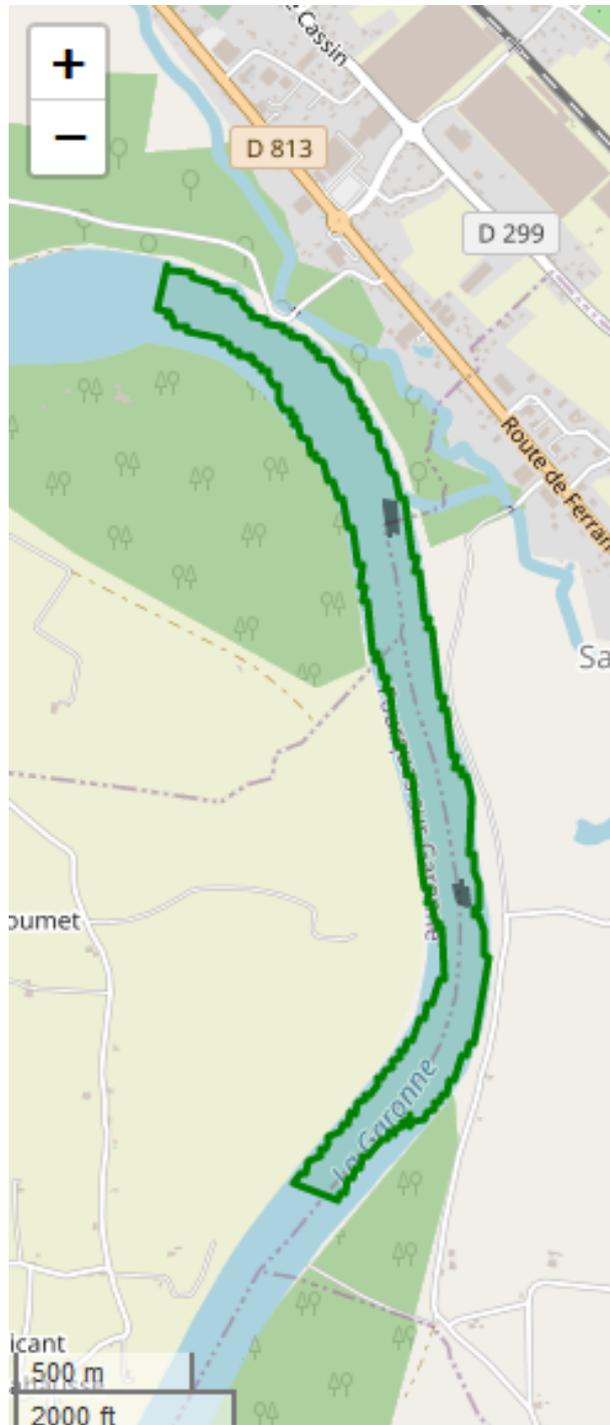
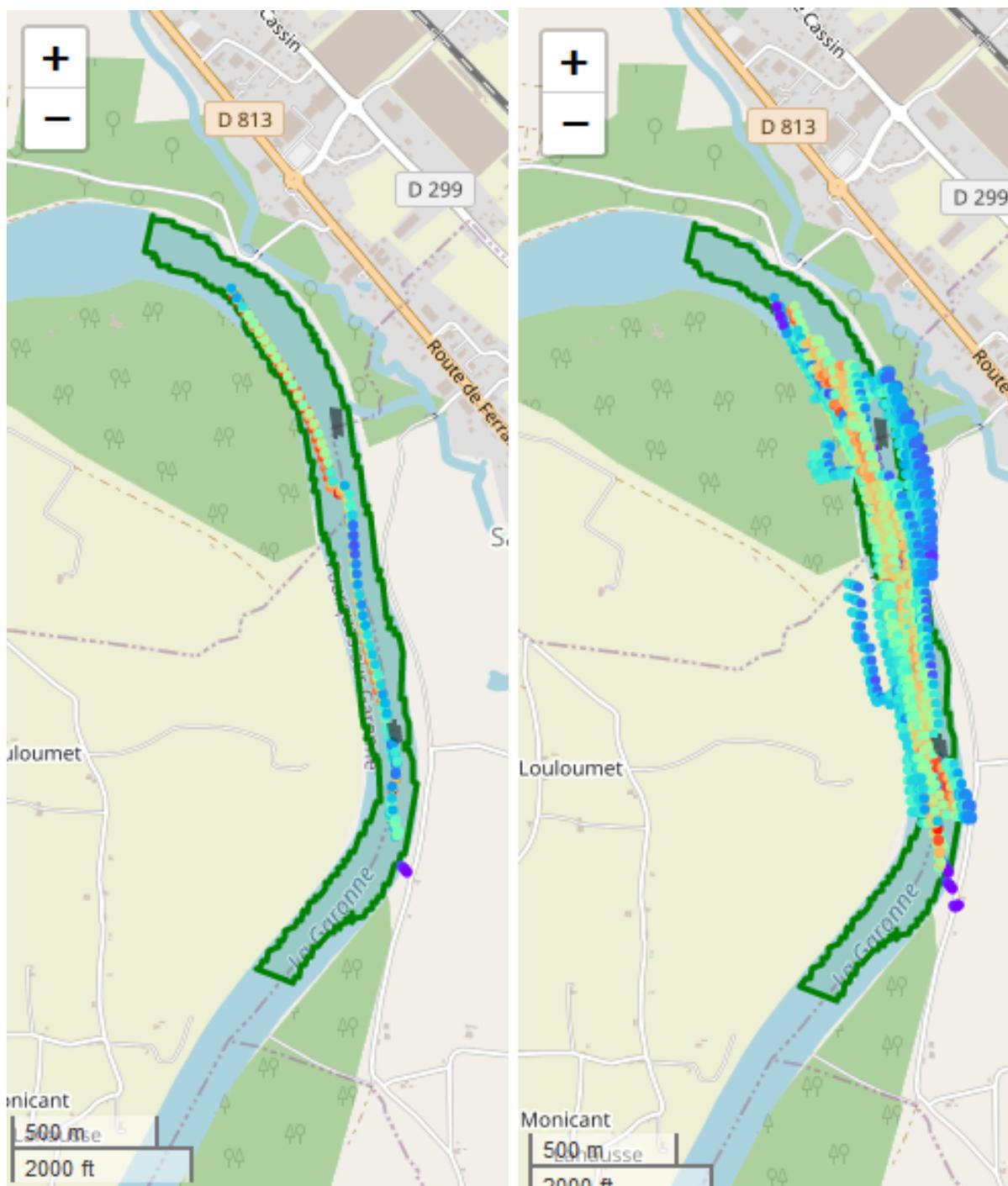


FIGURE 4.19 – Exemple du masque dynamique fourni par le CNES correspondant à la zone T1



(a) Affichage des traces SWALIS du premier passage sur la zone T1
(b) Affichage des traces SWALIS des 8 passages sur la zone T1

FIGURE 4.20 – Affichage des données enregistrées sur la zone T1.

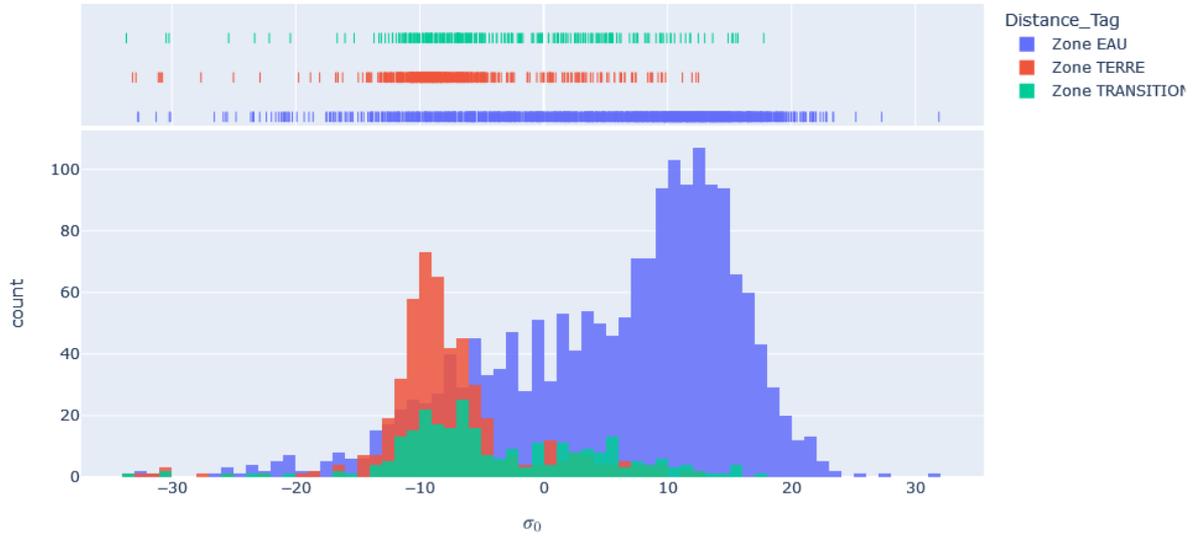


FIGURE 4.21 – Histogramme de $\langle \sigma_0 \rangle$: contraste terre - eau de la zone T1

les histogrammes en fonction des classes que ce soit sur la zone de transition, d'eau ou de terre comme le montre la figure 4.21. Nous remarquons que les données de la zone terre (en rouge) sont centrées autour de -10 dB contrairement à celles de la zone eau autour de 14 à 15 dB. Les données de la zone de transition (en vert) présente des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ plutôt étalées. Nous ne pouvons donc pas faire une nette distinction des données eau et terre à partir cet histogramme.

Avec les données classées nous faisons une répartition par angle d'incidence pour les données utiles terre et eau, et présentons cette répartition sur la figure 4.22. Sur cette figure, nous rappelons aussi le nombre de données (rafales) par classes en bleu pour les rafales provenant de zones « eau » et en rouge celles provenant de zones « terre ». Nous notons une très faible population de données « terre » pour les angles d'incidence faibles ce qui est normal car le porteur se déplace de telle manière que les angles de dépointage correspondent essentiellement à une visée sur l'eau. Les mesures provenant de la rétro-diffusion de la zone terre correspondent à des angles d'incidence élevés. De plus, dans le traitement des données mesurées, nous sommes en mesure d'effectuer une discrimination entre les données pour un angle d'incidence provenant de la droite du porteur (le porteur vole du nord vers le sud) et celles provenant de la gauche. Les données de la zone terre correspondent exclusivement à des données provenant de la droite du porteur. Enfin,

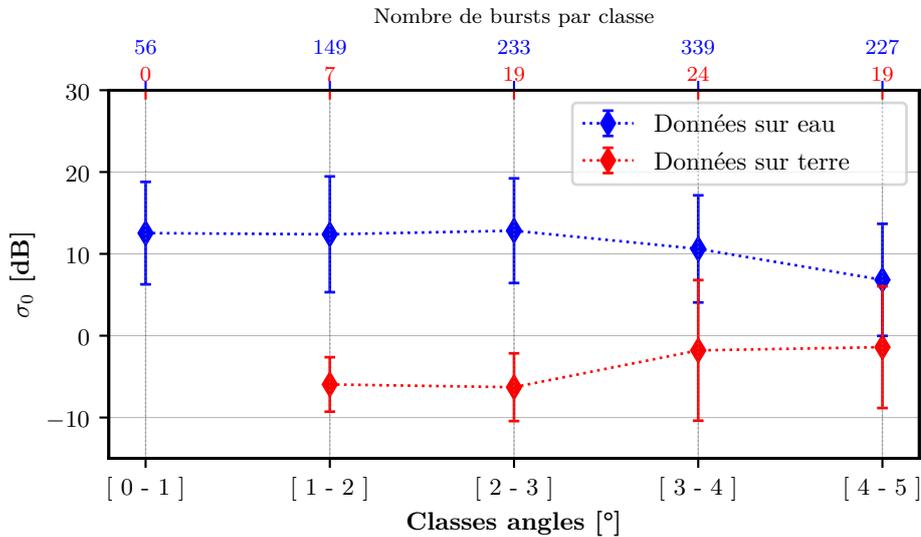


FIGURE 4.22 – Répartition de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle sur la zone T1 : contraste entre terre et eau

nous remarquons également une décroissance de la valeur de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction de l'angle d'incidence sur l'eau.

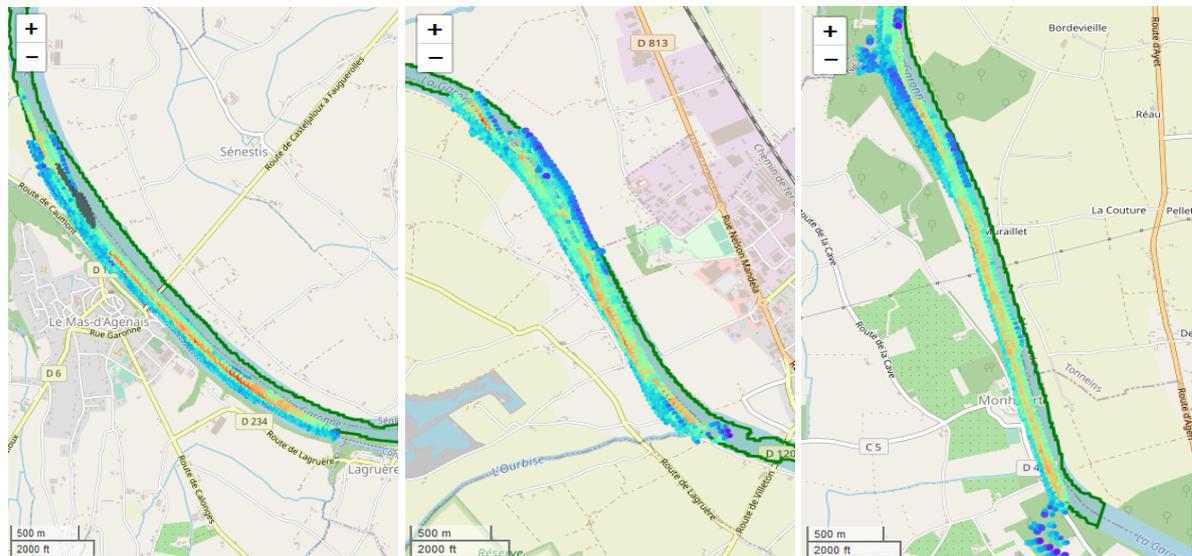
4.3.4.2 Contraste terre-eau : zone T2

De manière analogue à l'étude de la zone T1, nous traçons ainsi les huit passages correspondant à la zone T2 avec le banc de sable en gris (figure 4.23a) sur le masque d'eau de la zone.

La plupart des données se situe autour de la rive gauche, ce qui conduit à penser que le porteur était plus à gauche que prévu.

Ensuite nous procédons au classement des données. Nous pouvons ainsi afficher les histogrammes en fonction des classes que ce soit sur la zone de transition, d'eau ou de terre comme le montre la figure 4.24. Nous remarquons que les données de la zone terre (en rouge) sont centrées au tour de -7 dB contrairement à celles de la zone eau autour de 15 à 16 dB. Celles de la zone de transition (en vert) présentent des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ plutôt étalées et plutôt provenant de la zone terre. Nous pouvons donc faire une nette distinction des données eau et terre à partir cet histogramme.

Avec les données classées nous faisons une répartition par angle d'incidence pour les données terre et eau, comme présentée à la figure 4.25. Comme précédemment, nous



(a) Zone T2

(b) Zone T3

(c) Zone T4

FIGURE 4.23 – Affichage des données enregistrées sur les zones T2, T3 et T4

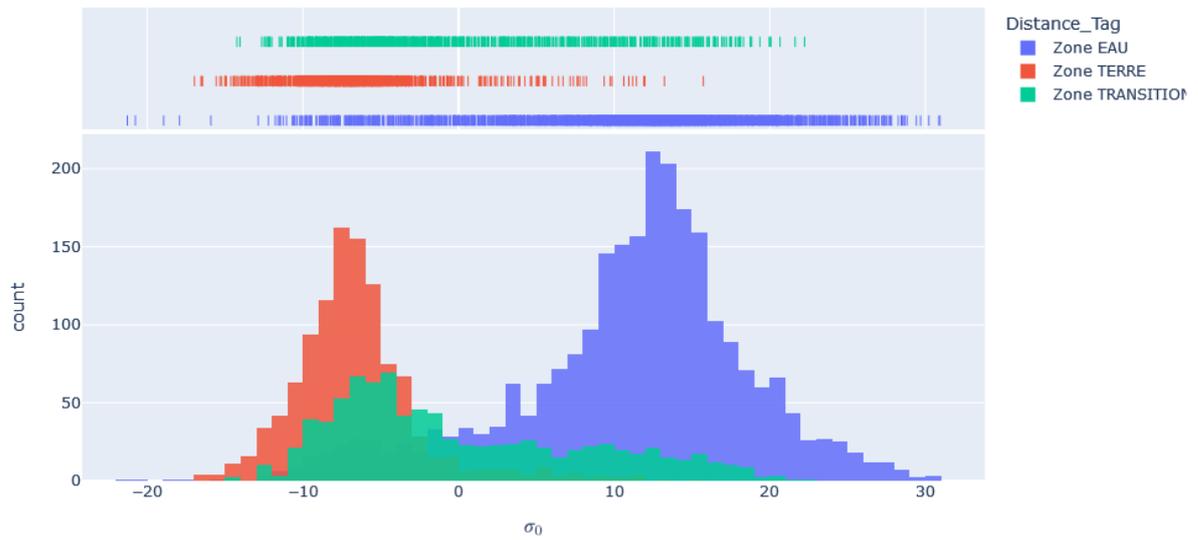


FIGURE 4.24 – Histogramme de $\langle \sigma_0 \rangle$: contraste terre - eau de la zone T2

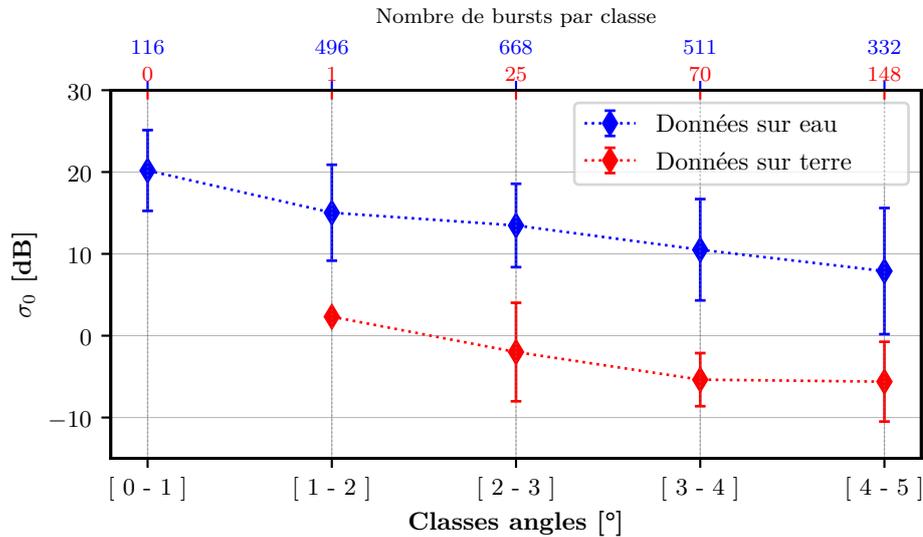


FIGURE 4.25 – Répartition du $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle dans la zone T2 : contraste entre terre et eau

notons une absence de données terre pour les angles d'incidence faibles ce qui est normal car le porteur se déplace de telle manière que la majorité des traces au sol se retrouve essentiellement sur l'eau. Nous remarquons également une décroissance du σ_0 en fonction de l'angle de dépointage pour les scènes sur eau, et le contraste terre-eau est net.

4.3.4.3 Contraste terre-eau : zone T3

De manière analogue, nous traçons ainsi les huit passages correspondant à la zone T3 (figure 4.23b) sur le masque d'eau de la zone. La plupart des données couvre bien la Garonne sur cette zone et il y a beaucoup moins de données « terre » que de données « eau ».

Ensuite nous procédons de nouveau au classement des données. Nous pouvons ainsi afficher les histogrammes en fonction des classes que ce soit sur la zone de transition, d'eau ou de terre comme le montre la figure 4.26. Nous remarquons que les données de la zone terre (en rouge) sont centrées au tour de -7 dB contrairement à celles de la zone eau autour de 15 dB. Celles de la zone de transition (en vert) présente des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ peu étalées et provenant de la zone terre. Nous pouvons donc faire une nette distinction des données eau et terre à partir cet histogramme.

Avec les données classées nous faisons une répartition par angle de dépointage pour

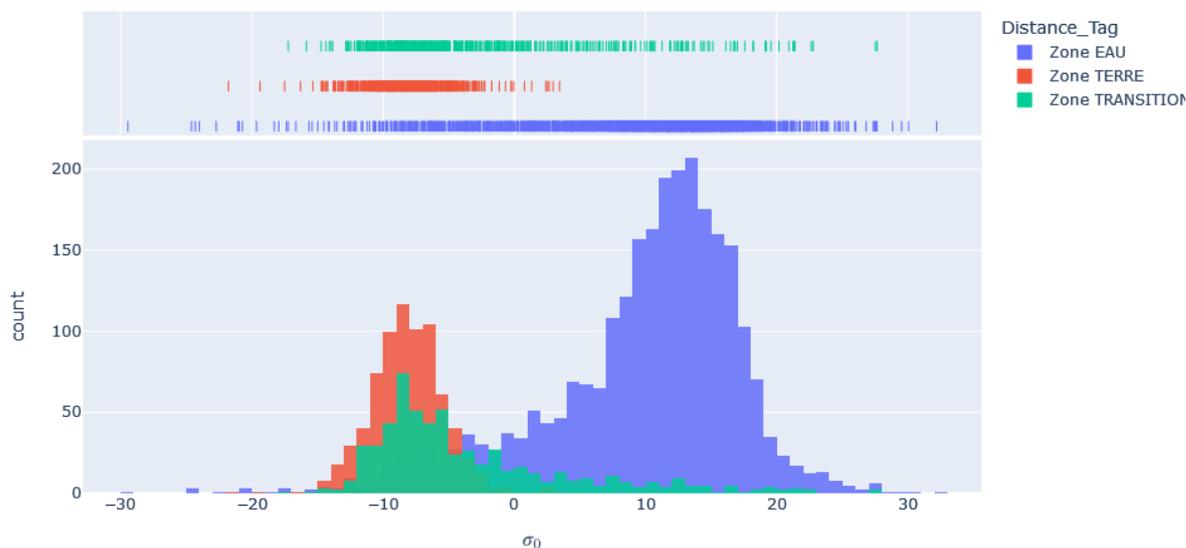


FIGURE 4.26 – Histogramme de $\langle \sigma_0 \rangle$: mise en évidence du contraste terre - eau de la zone T3

les données terre et eau, comme présentée à la figure 4.27. Encore une fois, nous pouvons noter une quasi-absence de données terre sur de faibles valeurs d'angles de dépointage. Nous remarquons également une décroissance du σ_0 en fonction de l'angle de dépointage, et le contraste terre-eau est net.

4.3.4.4 Contraste terre-eau : zone T4

Pour la dernière zone T4, nous traçons aussi les huit passages correspondant à la zone T4 (figure 4.23c) sur le masque d'eau de la zone. La plupart des données couvre plutôt bien la Garonne sur cette zone ce qui induit beaucoup moins de données terre que de données eau. Nous constatons aussi de forts décalages hors de la zone d'eau dus à des variations importantes de roulis et de tangage (essentiellement en début et en fin d'acquisition).

Ensuite nous procédons au classement des données. Nous pouvons ainsi afficher les histogrammes en fonction des classes que ce soit sur la zone de transition, d'eau ou de terre comme le montre la figure 4.28. Nous remarquons que les données de la zone terre (en rouge) sont centrées au tour de -10 dB contrairement à celles de la zone eau autour de 13 dB. Celles de la zone de transition (en vert) présente des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ étalées. Il y a donc une très nette distinction entre des données eau et terre observable sur cet

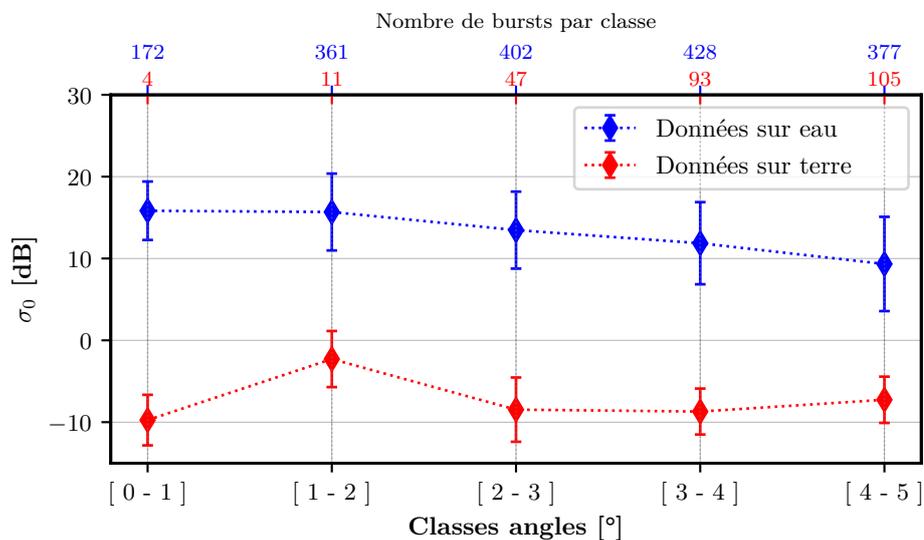


FIGURE 4.27 – Répartition de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle dans la zone T3 : contraste entre terre et eau

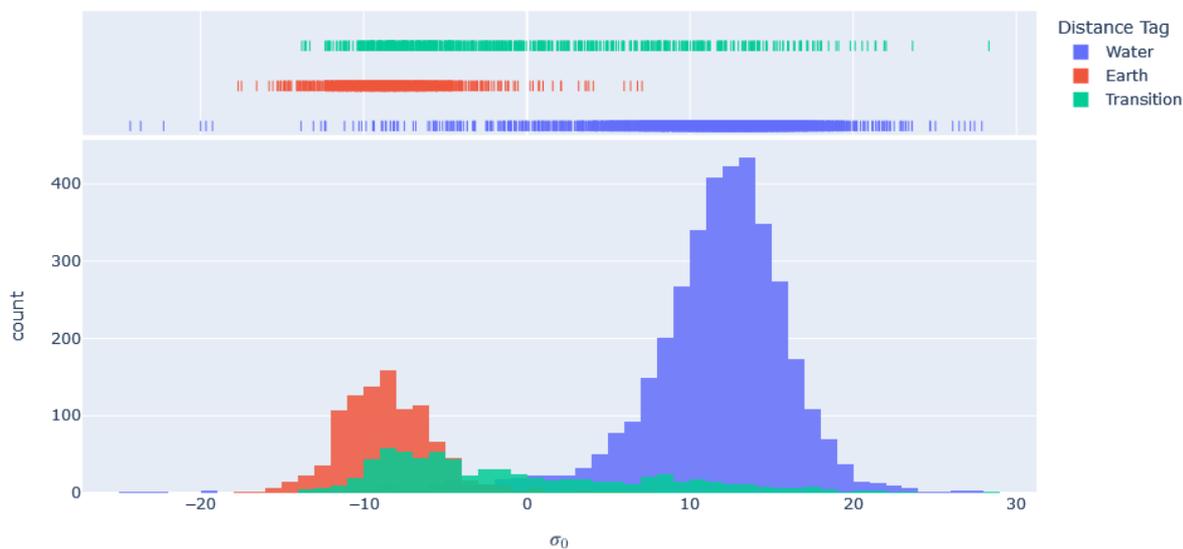


FIGURE 4.28 – Histogramme des valeurs $\langle \sigma_0 \rangle$: mise en évidence du contraste terre - eau de la zone T4

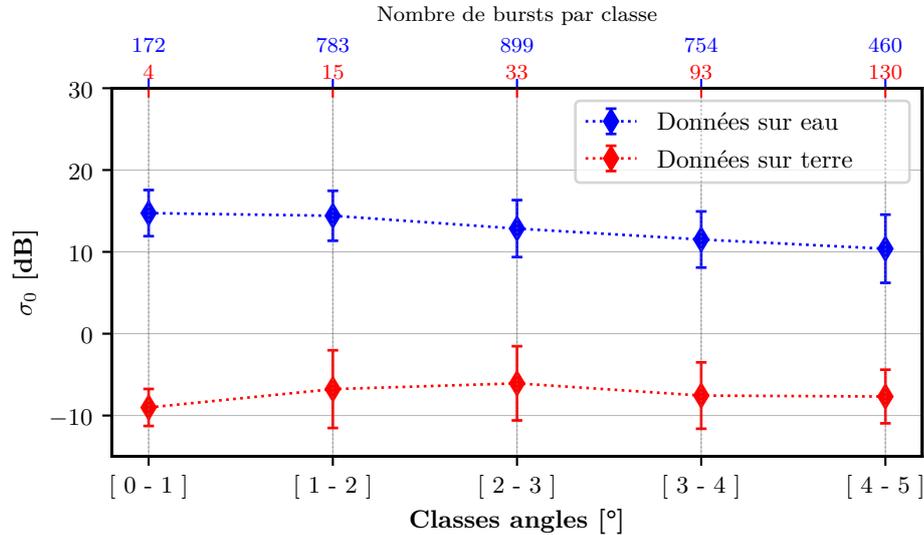


FIGURE 4.29 – Répartition de la valeur $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle de la zone T4 : contraste entre terre et eau

histogramme.

Avec les données classées nous faisons une répartition par angle d'incidence pour les données terre et eau, comme présentée à la figure 4.29. Nous avons toujours très peu de données sur terre pour de faibles angles d'incidence puisque le porteur se déplace afin que la majorité des traces soit sur l'eau. Nous remarquons également une décroissance du $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction de l'angle de dépointage. Le contraste terre-eau est très net.

Sur l'ensemble de nos mesures, nous obtenons un profil de σ_0 et nous observons :

- La décroissance du σ_0 (sur tous les graphes) obtenu par le capteur SWALIS compris entre 12 dB et 20 dB (en proche nadir) et un peu en dessous de 10 dB pour une incidence autour des 5° (ce qui est en concordance avec [46], [72], [71] et [93] même si nous ne disposons pas de données de vent ne permettant pas une comparaison plus précise du profil de σ_0).
- Le contraste terre-eau du σ_0 élevé (typiquement entre 10 et 25 dB, à comparer avec [46], [72] dont la valeur obtenue se situe plutôt entre 10 et 20 dB).

Cependant, ne disposant pas de données vitesse et direction de vent liées à nos mesures suffisamment fiables, nous ne pouvons donc pas faire une correspondance fine entre les profils obtenus avec SWALIS et ceux obtenus par [46], [72].

En guise de conclusion intermédiaire, nous pouvons énoncer deux aspects liés au cap-

teur SWALIS :

1. la direction de visée de l'antenne est globalement très bien maîtrisée même s'il reste des aspects de dépointage vers la zone « terre » non voulu,
2. en utilisant les données provenant des zones terre, nous pouvons indiquer que le capteur SWALIS présente une très bonne discrimination entre les zones terre et les zones eau. Ainsi, il est facile de pouvoir extraire les données radar provenant des zones eau,
3. afin de pouvoir effectuer des statistiques fiables, il est important d'obtenir un nombre suffisant de données.

Pour clore cette étude de performances du capteur SWALIS, nous utilisons le passage simultané de Sentinel-6 pour effectuer une comparaison entre les données radar enregistrées par SWALIS et celle fournies par Sentinel-6 sous la forme d'un radargramme de puissance.

4.4 Comparaison SWALIS/Sentinel-6

Cette campagne Marmande 2022 concorde avec le passage du satellite Sentinel-6 [55], un radar altimètre en bande C et Ku avec traitement SAR along-track, permettant une résolution azimutale pouvant atteindre 300 m. Il est donc intéressant de faire une comparaison entre les données acquises par Sentinel-6 et celles de SWALIS. L'angle d'incidence correspondant aux données Sentinel-6 fournies par le CNES est de $0, 5^\circ$. Il faut donc, dans le but de pouvoir comparer les mêmes choses, ne travailler que sur la classe d'angle la plus proche, soit la classe $[0^\circ, 1^\circ]$.

Dans cette partie, nous présentons les données fournies par Sentinel-6 sur la Garonne, puis nous les superposons aux données SWALIS avec le logiciel QGIS dans le but de faire une analyse qualitative. Le logiciel QGIS est un logiciel libre de SIG (Système d'Information Géographique). Les transects choisis correspondent aux zones T3 et T4 puisqu'elles correspondent aux transects sur lesquels nous avons un maximum de données.

4.4.1 Données Sentinel-6 : radargramme de puissance

Les données Sentinel-6 qui nous sont fournies par le CNES, sont des radargrammes : puissance rétrodiffusée géolocalisée. Nous sélectionnons ceux correspondant aux zones T3 et T4. La figure 4.30a illustre la version RGB (couleur) du radargramme de la zone T3 et

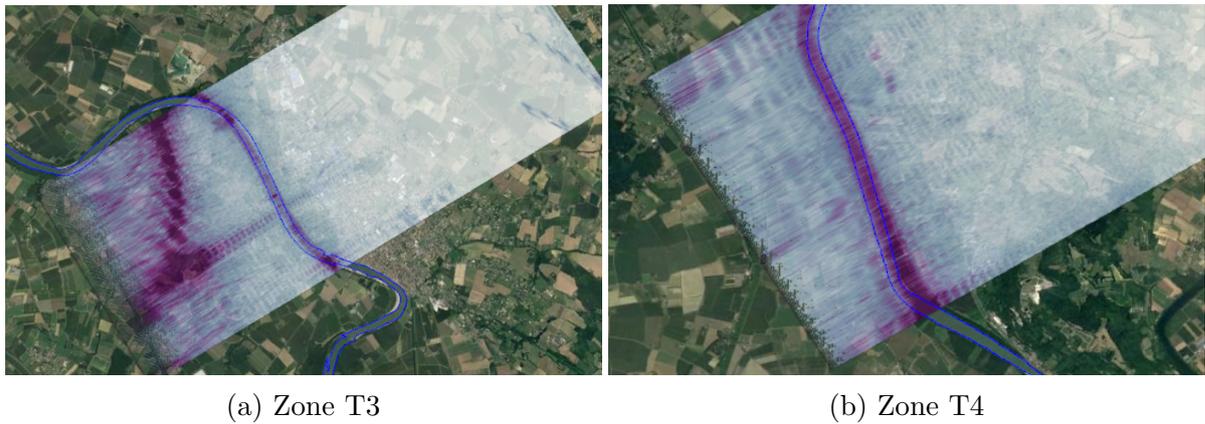


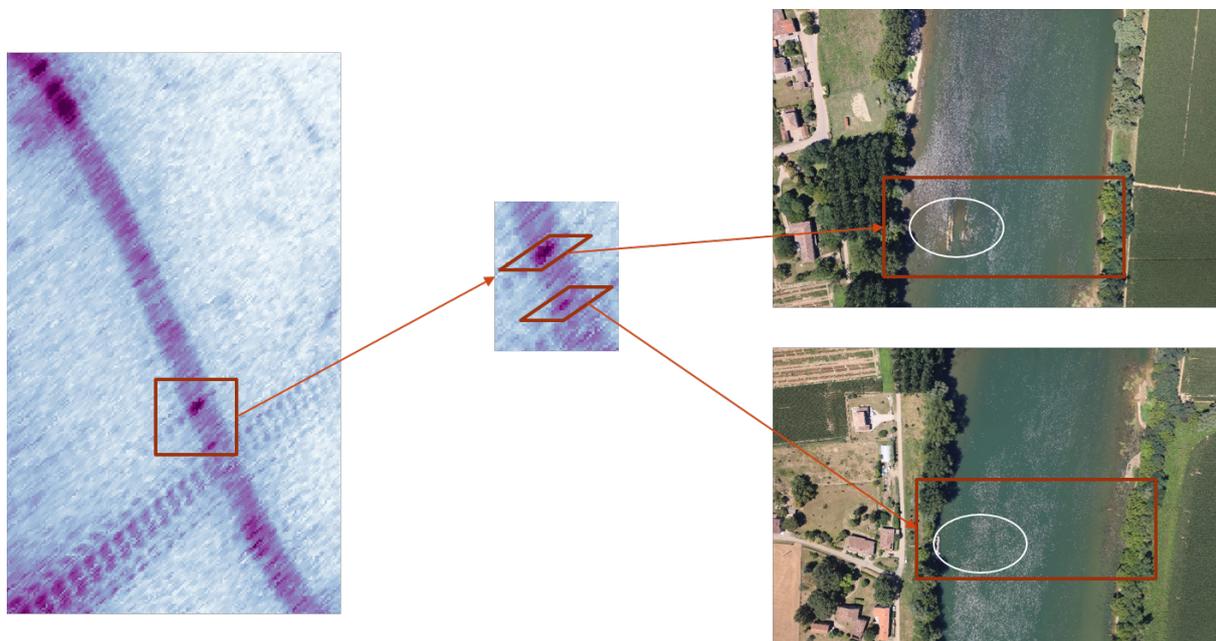
FIGURE 4.30 – Radargramme de puissance Sentinel-6 sur fond de carte Google Earth

la figure 4.30b celle de la zone T4. Il est important de noter que les radargrammes décrits ici sont modifiés par rapport aux radargrammes fournis initialement. Pour exploiter ces radargrammes avec les données SWALIS, il est nécessaire de corriger les décalages en distance des radargrammes d'origine afin de faire concorder le masque d'eau de la Garonne (bleu foncé sur la figure 4.30) avec la réponse radar de Sentinel-6 de cette même Garonne.

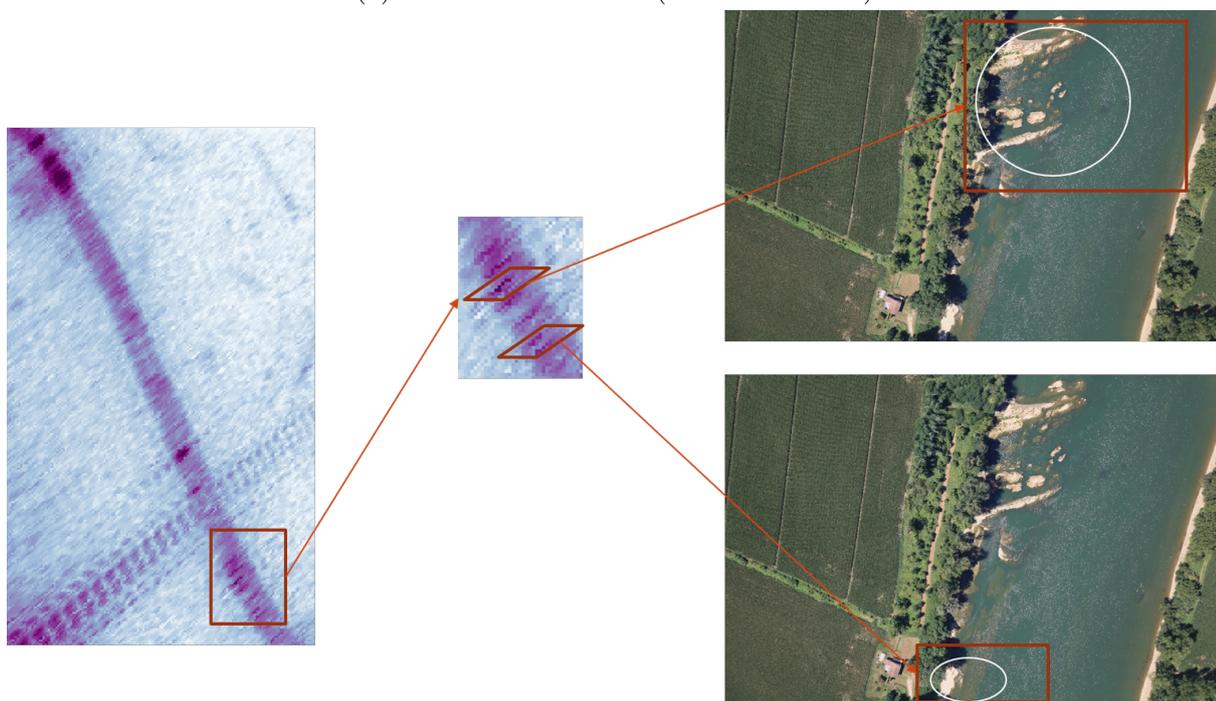
Les radargrammes RGB utilisés fournissent une information « visuelle » de la puissance rétrodiffusée. Nous avons donc une forte puissance provenant des zones « eau » ce qui permet de facilement identifier la Garonne sur les zones T3 et T4. Au premier ordre, la puissance est plutôt homogène sur la zone T4 par rapport à la T3.

Sur la zone T3, nous remarquons une forte puissance rétrodiffusée en début et fin de transects (violet foncé) ainsi que des zones plus rétrodiffusantes sur le cours d'eau. En couplant le radargramme de la zone T3 avec les photos fournies par le capteur SWALIS, on constate que le point brillant central correspond à un banc de sable au milieu de la Garonne (figure 4.31a). Cette discontinuité du fond de cours d'eau apporte de fortes variations de la surface de l'eau qui modifie la rugosité de la surface de l'eau. Il en est de même pour la berge et bancs de sable situés plus au sud de la zone précédente (figure 4.31b). Il est donc intéressant de comparer les données SWALIS avec le radargramme pour retrouver les variations de puissances rétrodiffusées le long de la Garonne sur les zones étudiées.

Pour effectuer une étude comparant les données SWALIS avec celles de Sentinel-6, nous utilisons le radargramme de puissance contenant une seule bande (pas en RGB) et nous donnant l'information de puissance comme l'illustre la figure 4.32. Ces radargrammes représentent la puissance rétrodiffusée en dBW et mesurée par Sentinel-6. Ils sont donc

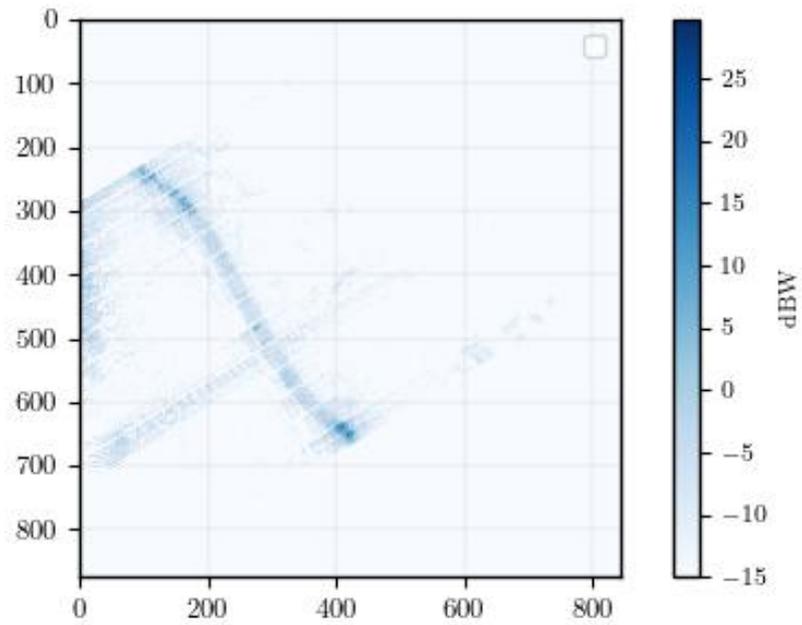


(a) Effet banc de sable (milieu Garonne)

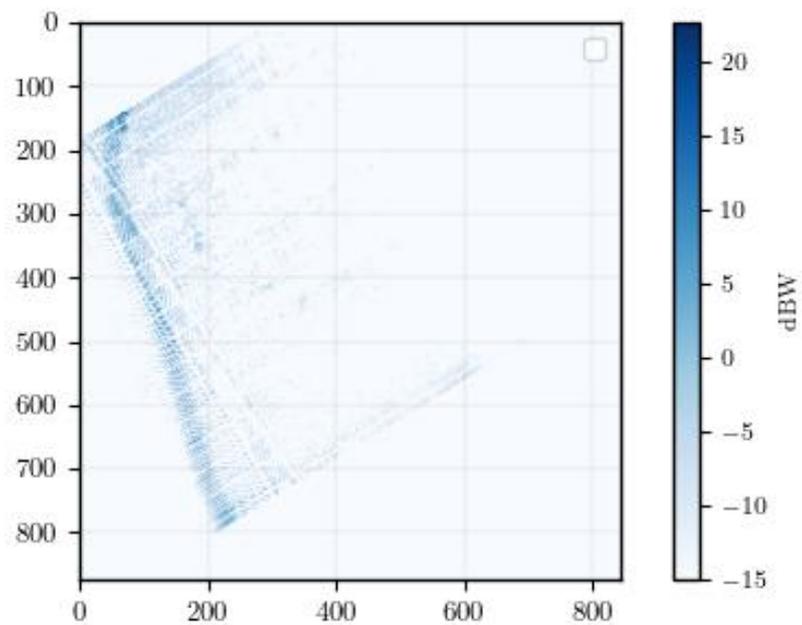


(b) Effet banc de sable (bord Garonne)

FIGURE 4.31 – Comparaison radargramme - photo par recalage de photos SWALIS



(a) Zone T3



(b) Zone T4

FIGURE 4.32 – Radargramme de puissance de Sentinel-6

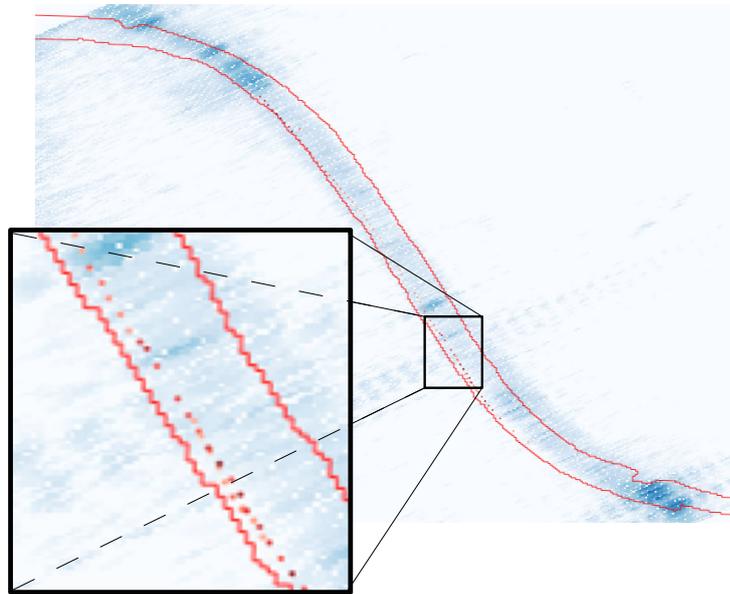


FIGURE 4.33 – Superposition des données SWALIS sur le radargramme Sentinel-6 (zone T3). Nous effectuons un agrandissement sur une zone de la Garonne et afin de visualiser la taille des tâches de l’antenne SWALIS par rapport à la largeur de la Garonne.

utilisés pour extraire directement la puissance de Sentinel-6 pour la comparer avec celle de SWALIS. Ainsi nous comparons le σ_0 SWALIS en dB avec des dBW Sentinel 6.

Nous remarquons que la puissance mesurée par Sentinel-6 semble en moyenne plus faible sur la zone T3 que sur la zone T4 sans que des explications physiques (comportement des surfaces d’eau par exemple) permettent d’expliquer cette différence. La seule différence observée concerne un positionnement plus lointain de la trace nadir de Sentinel-6 pour la zone T3 que pour la zone T4.

4.4.2 Positions SWALIS/Sentinel-6

Afin de comparer les données provenant de SWALIS et de Sentinel-6, il est important de pouvoir faire correspondre géographiquement parlant les données SWALIS et les données Sentinel-6. L’utilisation de QGIS nous assure (entre autres) cette fonctionnalité. Dans le cadre de nos traitements, il permet de lire les fichiers geotiff qui sont les formats des différents radargrammes fournis. Nous pouvons donc grâce à ce logiciel, superposer facilement les données SWALIS au radargramme Sentinel-6 afin d’avoir un premier aperçu de la position des traces SWALIS sur le radargramme. Nous avons maintenant une correspondance géographique entre les données SWALIS et les données Sentinel-6. Il convient

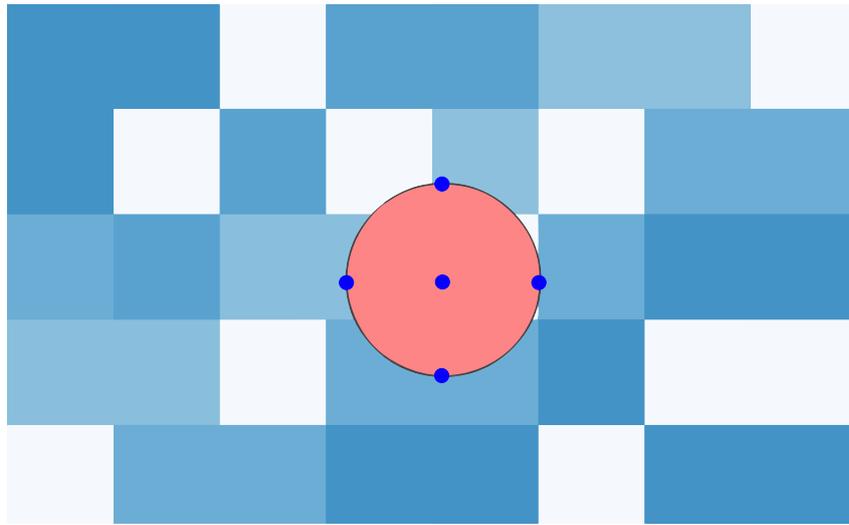


FIGURE 4.34 – Extraction des données du radargramme Sentinel-6 correspondant aux traces SWALIS : le disque orange correspond à la trace SWALIS, les carrés bleus aux pixels du radargramme Sentinel-6, les petits disques bleus correspondent aux points d'extraction.

alors de comparer les puissances provenant de chaque capteur pour une même position.

4.4.3 Puissances SWALIS/Sentinel-6

4.4.3.1 Extraction des données

Avec la superposition géographique des données SWALIS sur le radargramme de puissance de Sentinel-6, nous pouvons effectuer une étude comparative en extrayant l'information de puissance correspondant à une trace antenne SWALIS. Cette trace antenne peut chevaucher plusieurs pixels du radargramme Sentinel-6. Nous effectuons alors une opération de moyenne sur les pixels Sentinel-6 associés à la trace SWALIS : information de puissance correspondant au centre de la trace SWALIS et quatre autres informations sur le bord de la trace SWALIS (voir figure 4.34). Nous rappelons que le calcul de la surface de la trace SWALIS est effectué à partir de l'ouverture à mi-puissance de l'antenne correspondant à la fréquence d'émission.

4.4.3.2 Comparaison sur la zone T3

Les données SWALIS utilisées proviennent des données de la classe des angles d'incidence locale compris entre 0° et 1° . Pour cette classe d'angle, nous comparons l'allure des puissances aux positions des traces SWALIS, aux puissances extraites du radargramme

(figure 4.35). Sur ces figures sur lesquelles nous superposons les données SWALIS et les

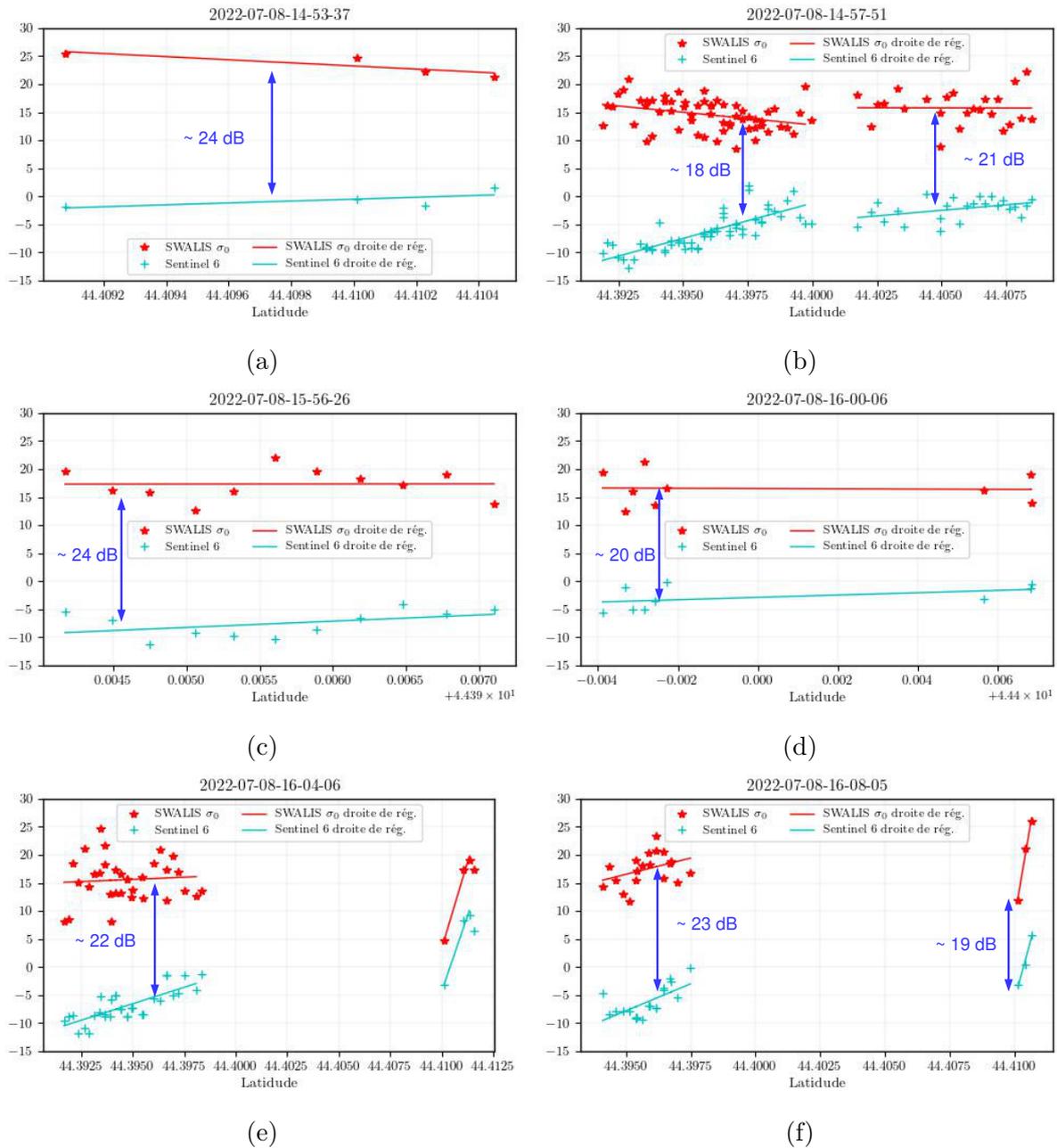


FIGURE 4.35 – Comparaison des σ_0 de SWALIS et des puissances extraites du radar-gramme Sentinel-6 sur la zone T3

puissances extraites du radargramme pour 6 enregistrement sur la zone T3, nous avons ajouté une analyse de type régression linéaire sur les nuages de points concernant les données SWALIS et les données Sentinel-6. En fonction de la répartition des données, cette

analyse peut se faire sur la totalité du tronçon ou sur des parties différentes. À partir du tracé des droites de régression d'ordre 1, plusieurs commentaires peuvent être effectués.

Le premier concerne le biais que nous pouvons globalement retrouver sur l'ensemble des transects entre les données SWALIS et les données Sentinel-6. Si ce biais n'est pas strictement constant sur l'ensemble des transects, nous pouvons tout de même le situer autour de 20 dB (excepté pour une section visible sur la figure 4.35e) entre les latitudes 44,4100° et 44,4125°).

Le deuxième commentaire aborde la dynamique d'évolution des droites de régression entre les données SWALIS et Sentinel-6. Mis à part le transect entre les latitudes 44,3925° et 44,4000° de la figure 4.35b, les dynamiques des mesures SWALIS et Sentinel-6 sont identiques. En particulier, cette dynamique est remarquable sur les figures 4.35e et 4.35f autour de la latitude de 44,4100°.

Le troisième commentaire est lié à l'échantillonnage spatial de la surface réalisé par le capteur SWALIS. Il est clair sur cette première campagne Marmande 2022 que le nombre de mesures et la couverture de la surface de la Garonne ne sont pas suffisants pour obtenir une information statistique satisfaisante. Pour les prochaines campagnes, il convient donc d'avoir une configuration de mesure permettant un meilleur échantillonnage des surfaces éclairées.

4.4.3.3 Comparaison sur la zone T4

De manière identique que pour la zone T3, nous effectuons la comparaison et l'analyse des données SWALIS et Sentinel-6 sur le transect de la zone T4. Ainsi, nous décrivons les données en fonction de la latitude puisque le transect de la zone T4 est aussi orienté Sud-Nord. De plus, nous affichons par tronçon de transects, une droite de régression linéaire fournissant une allure d'évolution des données (SWALIS et Sentinel-6). Nous décrivons l'ensemble de ces courbes sur la figure 4.36. Le premier commentaire concernant l'ensemble de ces comparaisons des données sur la zone T4 traite de la valeur « moyenne » entre les données SWALIS et Sentinel-6. Sur l'ensemble de mesures, nous avons une répétabilité de cette valeur moyenne puisque nous mesurons un écart relativement constant sur les enregistrements significatifs de la zone T4. Cet écart est grossièrement estimé à 8 dB et correspond donc à une comparaison entre des données de type σ_0 et des données en puissance (dBW).

Comparativement à l'étude de la zone T3, nous retrouvons aussi une dynamique identique entre les données SWALIS et Sentinel-6 et en particulier sur les figures 4.36c, 4.36e

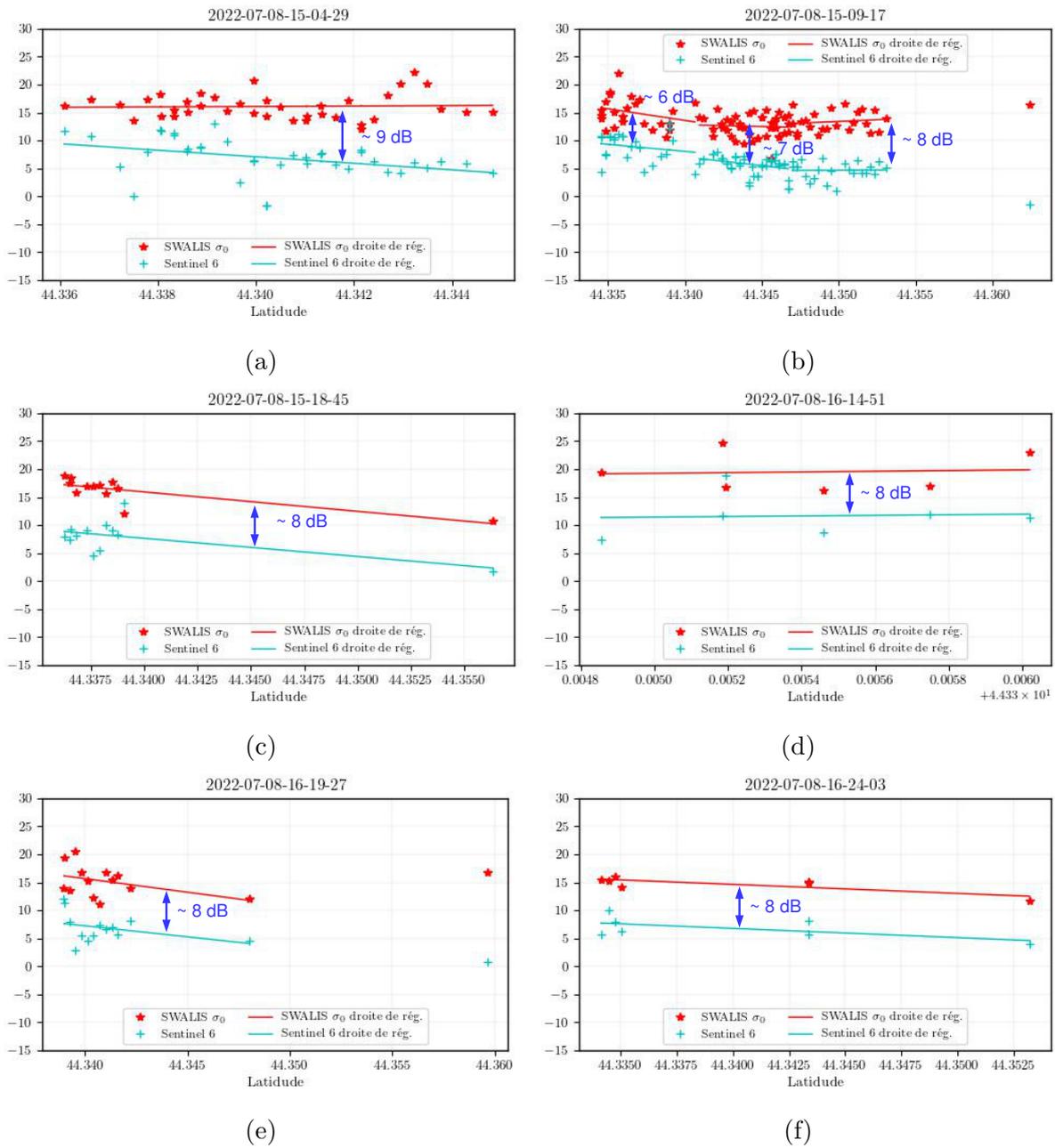


FIGURE 4.36 – Comparaison des σ_0 de SWALIS et des puissances extraites du radar-gramme Sentinel-6 sur la zone T4

et 4.36f (mais moins pour la figure 4.36a). Toutefois, cette dynamique est moins marquée et ceci étant dû à une variabilité moins importante sur le transect de la zone T4.

Enfin, nous pouvons indiquer que les données SWALIS (valeurs de σ_0) se situent dans une fourchette de quelques dB autour de 15 dB. Nous ne retrouvons pas cette valeur moyenne pour les données Sentinel-6 entre les zones T3 et T4 sinon un biais constant pour chaque zone.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les capacités et performances de mesure des capteurs SWALIS et KaRADOc par l'intermédiaire respectivement des campagnes Marmande et SUMOS.

Les données de la campagne SUMOS-2021 sont actuellement en cours d'analyse. Toutefois, le dépouillement des données des vols cibles permettent d'indiquer que le capteur KaRADOc présente une excellente dynamique de mesure. Cette dynamique de mesure permet de discriminer des phénomènes aussi différents que la rétrodiffusion d'un trièdre ou d'une surface d'eau avec ou sans rugosité de surface. La dynamique de mesure est aussi un paramètre fondamental pour assurer une extraction suffisante du Doppler des zones illuminées (traitement *pulse-pair*).

Pour le capteur SWALIS, l'utilisation des données de la campagne de Marmande-2022 (mesure des puissances de rétrodiffusion au-dessus de la Garonne) permet de montrer les capacités du radar à mesurer le coefficient de rétrodiffusion σ_0 . Nous vérifions que cette valeur de σ_0 est bien indépendante de la hauteur du porteur (en considérant les différences rapportées aux différences de nombre de données). Un autre point d'intérêt correspond au contraste « terre-eau ». Nous mettons en évidence que ce contraste est très bien mesuré par le capteur SWALIS. De même, nous vérifions bien la décroissance de σ_0 avec l'augmentation des angles d'incidence, pour les surfaces d'eau.

Le survol de la zone de la Garonne autour de Marmande par le satellite Sentinel-6 au moment de nos mesures, nous permet de confronter qualitativement les données SWALIS avec les données Sentinel-6. Même si les natures des données Sentinel-6 et SWALIS ne sont pas identiques (dBW et dB), l'analyse de ces données sur les zones T3 et T4 permettent d'indiquer une bonne adéquation comportementale entre les mesures SWALIS et Sentinel-6

— biais quasiment identique entre les enregistrements du transect de la zone T3 et ce

qui se retrouve sur la zone T4

— dynamique identique sur certains tronçons des différentes zones.

ce qui permet d'indiquer que le comportement des données SWALIS est qualitativement similaire à des données satellitaires. Il est important de noter que la comparaison entre SWALIS et Sentinel-6 est possible au prix de la « déformation » tronçon par tronçon du radargramme fourni par Sentinel-6. Il convient donc d'indiquer deux éléments essentiels en conclusion de cette étude :

1. pour effectuer une analyse quantitative des données SWALIS avec des données satellitaires, il est important de pouvoir comparer directement ces données sans avoir à effectuer une transformation et ainsi assurer une concordance géographique entre ces données,
2. le faible échantillonnage des surfaces d'eau par SWALIS lors de la campagne Marmande-2022 nous montre que pour une analyse fine des informations de rétrodiffusion de zones d'eau (ici, l'exemple de la Garonne), il est nécessaire d'effectuer de nombreux passages au-dessus des zones étudiées pour en extraire une information basée sur des statistiques fiables.

Pour atteindre ces deux éléments, il faut choisir la mission satellitaire en concordance avec la capacité de mesure du capteur SWALIS (donc ici SWOT). De plus, il est important de faire le choix des configurations de mesure assurant un échantillonnage spatial suffisant considérant les zones survolées. Une première piste est d'effectuer une mesure en monoincidence. Une autre possibilité est de dimensionner en fonction de la géométrie de vol les caractéristiques de mesure (nombre d'impulsion par rafale entre autres).

L'ensemble de ces considérations est un point important dans la définition des futures campagnes pour tenir compte des capacités du capteur SWALIS.

CONCLUSION

Sommaire

Résumé du projet de recherche	180
Perspectives	182

Résumé du projet de recherche

Dans le cadre actuel du réchauffement climatique, l'importance d'avoir une bonne connaissance sur les stocks et variations des ressources d'eau douce disponibles n'est plus à démontrer. Cette connaissance est primordiale pour l'anticipation et la gestion de cette ressource. Il en est de même pour les océans jouant un rôle primordial de régulateur thermique de la planète et en particulier les courants à la surface de l'océan sont une variable climatique essentielle qui joue un rôle déterminant dans les échanges air-mer. Afin d'avoir une fine mesure et analyse de ces ressources, plusieurs missions satellitaires sont déjà lancées (ENVISAT, Altika, MEGHA-TROPIQUES, etc). Ces missions satellitaires s'appuient sur des concepts qui sont validés par des mesures aéroportées en parallèle de mesures in-situ. La réalisation d'un système de télédétection aéroporté permet de fournir des informations essentielles sur le comportement des surfaces observées. Ces informations couplées avec des mesures in-situ permettent alors de consolider le concept de mesures proposé. Un exemple est fourni par la mission CFOSAT avec le capteur radar KuROS qui permet de faire des mesures de vagues [94]. De la même manière, après le lancement de la mission satellitaire, ce même capteur aéroporté joue le rôle de système pouvant valider et calibrer les données fournies par le satellite. La validation doit vérifier que les données satellite s'accordent avec le système aéroporté. La calibration doit fournir une « correction » des données satellite par l'intermédiaire celles aéroportées en relation avec les mesures in-situ. Ainsi, les travaux de cette thèse s'inscrivent dans cette logique, à savoir la conception de systèmes radars aéroportés destinés à la préparation de missions satellitaires dans un premier temps et à la réalisation de campagnes de calibration/validation des missions satellitaires dans un second temps.

Dans le chapitre 1, nous avons introduit la mission SWOT, avec le satellite lancé le 16 décembre 2022, et chargé de recenser et mesurer finement plus de 97% des eaux douces de la surface terrestre (hydrologie continentale) et aussi faire la topographie des océans. La mission SWOT embarque le système KaRIn permettant de faire de l'altimétrie bidimensionnelle et qui repose sur le concept de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture altimétrique et interférométrique. La mission SWOT fournit une couverture du globe en 21 jours. Dans ce même chapitre, nous avons également évoqué le concept SKIM dont le but est de mesurer les courants de surface des océans ainsi que les vagues afin d'estimer leurs impacts sur l'évolution de la température de ces mêmes océans. La mission SKIM a été candidate -malheureuse- lors de l'appel à projet de l'agence spatiale européenne

Earth Explorer 9 (EE9) mais des campagnes de mesure ont pu valider ce concept et qui est maintenant étendu sur d'autres missions (exemples d'HARMONY ou d'ODYSEA [63] pour la mesure de la vitesse totale des courants de surface [95]).

À partir des descriptions du cahier des charges proposé, le chapitre 2 est dédié à la description détaillée des capteurs aéroportés SWALIS et KaRADOc développés par l'IETR en collaboration avec le CNES pour répondre aux demandes de Cal/Val de la mission SWOT ainsi que de la validation du concept SKIM. Ces capteurs fonctionnent donc en bande Ka et fournissent une information de puissance reçue par la rétrodiffusion d'une scène illuminée par un faisceau d'antenne de très faible angle d'ouverture (de l'ordre de $1,5^\circ$) et dont le dépointage est fonction de la fréquence d'émission (ce qui permet aussi un balayage d'angle d'incidence locale de ce faisceau). De plus, les capacités de ces capteurs permettent aussi de retrouver une information Doppler de la surface éclairée permettant ainsi la détermination de la vitesse radiale de la surface éclairée. Nous avons aussi décrit l'ensemble de l'instrumentation choisie afin de géoréférencer l'ensemble des mesures, de stabiliser le faisceau d'antenne ou d'obtenir simultanément des images optiques en lien avec les mesures radar. Nous avons aussi expliqué les différences existant entre les capteurs SWALIS et KaRADOc.

Dans notre travail de thèse (chapitre 3), nous nous sommes focalisés sur la mesure des valeurs du σ_0 à savoir la puissance reçue par rapport à la surface éclairée. Après une description des grandeurs disponibles (des données L0 aux données L1), nous avons décrit les opérations de calibration qui permettent de relier une mesure de puissance provenant de cibles calibrées (trièdre) à la valeur de SER de ces cibles. Ensuite, afin de déterminer la surface éclairée, nous avons présenté les corrections géométriques précisant la géolocalisation de la surface éclairée par le radar mais aussi la taille de cette surface. Ces corrections prennent en compte l'ensemble des attitudes du porteur pour définir la direction du vecteur de propagation de l'antenne. Dans ce chapitre 3, nous avons dérivé l'ensemble des paramètres qui régissent le calcul de σ_0 afin de fournir une quantification de l'ensemble des postes d'erreur. Cette quantification globale permet de dimensionner l'erreur commise sur la mesure de σ_0 .

Dans le chapitre 4, nous avons illustré le fonctionnement de nos capteurs SWALIS et KaRADOc par l'intermédiaire de résultats de campagnes. Pour le capteur KaRADOc, nous nous sommes surtout intéressés à une analyse de certains vols cibles significatifs. Pour le radar SWALIS, nous avons fourni une analyse poussée des données de mesure collectées lors de la campagne Marmande 2022 au-dessus de la Garonne. De nombreux

traitements ont été réalisés pour décrire la capacité du capteur SWALIS à discriminer une mesure provenant de la rétrodiffusion d'une surface « eau » d'une mesure d'une surface « terre ». Nous avons pu aussi montrer que la valeur des mesures de σ_0 ne dépendait pas de la hauteur de vol du capteur SWALIS. Nous avons également pu vérifier que cette valeur de σ_0 sur l'eau est bien décroissante lorsque l'angle d'incidence locale augmente. Enfin, nous avons comparé à des comparaisons qualitatives et quantitatives avec des données de puissances reçues provenant d'un radargramme lors du passage de Sentinel-6 au-dessus de la Garonne. Enfin, la fin des mesures consacrées à la validation du capteur SWALIS ainsi que les analyses qualitatives et quantitatives associées, a pratiquement coïncidé avec le lancement de SWOT mi-décembre 2022. Il ressort de cette étude de thèse que le capteur SWALIS doit fournir un certain nombre d'information de rétrodiffusion sur les sites de calibration et de validation de la mission SWOT choisis sur le territoire français. Plusieurs sites sont actuellement identifiés et, entre autres, le site du Rhin (portion sud de Strasbourg), le site des retenues d'eau de Gondrexange et celui de la baie du Mont Saint-Michel. Les premières images de SWOT (avril 2023) indiquent déjà un intérêt très fort pour comprendre certaines dynamiques de variation de σ_0 dans les zones choisies pour cette calibration. Des mesures sont programmées pendant la période de revisite quotidienne de SWOT sur les zones d'intérêt.

Perspectives

Pour la suite des études, une première direction reviendrait à préciser la surface effectivement éclairée par le système SWALIS (ou KaRADOC). Actuellement, cette surface est calculée à partir de l'angle d'ouverture pris à -3 dB du maximum du lobe principal. Ce choix est arbitraire et il conviendrait de l'étendre. En particulier, la prise en compte de la totalité du lobe d'antenne (pour chaque fréquence d'analyse) doit être plus précise pour définir la surface réellement éclairée. Nous pouvons imaginer une limite asymptotique de la puissance interceptée par le lobe d'antenne pour choisir l'angle « d'ouverture » qui serait celui qui intégrerait toute la puissance rétrodiffusée par la surface éclairée.

Une autre direction possible pour la suite de cette étude est le dépouillement des données KaRADOC pour la détermination de la valeur de σ_0 en bande Ka de la surface de l'océan. Nous avons une base de données correspondant à la campagne SUMOS qui n'a pas encore été exploitée sinon pour une première analyse du Doppler. De plus, pour cette campagne, nous avons suffisamment d'états de mer différents et de mesures de puissance

pour des angles azimuts différents pour proposer des résultats inédits en bande Ka pour des angles d'incidence en proche nadir.

Enfin, en dehors des opérations de calibration/validation auxquelles le capteur SWALIS est destiné, il présente d'énormes potentiels que nous avons observés lors de son exploitation. Dans le futur il pourra servir, au cours de campagnes dédiées, à la caractérisation fine des zones présentant un intérêt scientifique :

- zones d'eau (fleuves, lacs, réservoirs d'eau),
- zone de terre (forêts, terres nues, champs, routes),
- zone humide (marécages),
- zone de transition (berges).

Pour l'IETR, cette première génération de capteurs (SWALIS et KaRADOC) sert également de référence pour la conception de nouvelles générations de radars dédiés à l'observation terrestre et en support à de nouvelles missions spatiales.

LES PLATES-FORMES DE MESURES

A.1 Introduction

Dans cette annexe, nous présentons les différentes plates-formes qui ont été utilisées durant les phases de validation et de calibration des capteurs SWALIS et KaRADOC ainsi que durant les différentes campagnes d'expérimentation aéroportées.

A.1.1 Le plateau technique MERISE

A.1.1.1 Introduction

Le plateau technique MERISE (MontErfil station for RadIo and remote SEnsing) est une station expérimentale de l'Université de Rennes, qui est exploitée depuis près de 60 ans pour le développement de systèmes de mesures originaux et dédiée à plusieurs activités de recherches scientifiques : biologie, goniométrie, propagation, calibration, ... Cette station expérimentale est localisée sur la commune de Monterfil (35160) autour de trois zones cadastrales (A, ZD et ZE) qui sont situées sur la lande de Trébiand, au Gué Charet ainsi que sur le Landier des laderussiaux. La surface totale de ce territoire, qui fait partie du domaine public de l'état, est de 30ha 47a. Cet espace unique possède plusieurs sites de mesures en basse fréquence et accueille la « Zone Aviation » de la plate-forme PIMA. Une vue aérienne permettant de visualiser les différentes zones d'expérimentation implantées sur les 30 ha de la base est reportée sur l'image A.1.

A.1.2 Activités scientifiques

Le plateau technique MERISE permet à ce jour d'adresser les domaines scientifiques suivants : antennes actives et le traitement d'antennes, radiogoniométrie HF en intégrant des capteurs hétérogènes sur des réseaux ayant une diversité d'espace ou colocalisés sans



FIGURE A.1 – Vue aérienne du plateau technique MERISE sur la station expérimentale de Monterfil



FIGURE A.2 – Exemples d’antennes déployées sur la station de Monterfil

diversité d’espace, communications numériques haut débit SIMO-MIMO en bande HF, propagation et sondage ionosphérique.

La station expérimentale est également adaptée à des campagnes de mesures en lien avec des problématiques de radio-localisation toutes bandes de fréquences et en lien avec des activités de guerre électronique.

La station regroupe les principaux équipements suivants : Une antenne décamétrique de type log spirale à polarisation circulaire large bande (diamètre de 80 m), qui permet de sonder le omportement de la couche ionosphérique, ainsi que des réseaux de radiogoniométrie HF utilisant des capteurs hétérogènes avec ou sans diversité d’espace.

La base expérimentale héberge également des antennes actives de réception, développées à l’IETR, comme le montre la figure A.2. Il s’agit de cadres croisés ou de cadres simples, de capteurs colocalisés (constitués de cinq antennes ; 3 cadres croisés : 2 verticaux et 1 horizontal, 2 dipôles en V inversé croisés) -le capteur colocalisé est positionné sur un mat mobile LERC. La base expérimentale dispose également de fouets verticaux (Rohde & Schwartz) qui sont parfois implantés dans les réseaux à diversité d’espace.

Un récepteur numérique ICS 554 (Interactive Circuits and Systems LDT) est disponible sur le site. Il est constitué de quatre convertisseurs synchrones et de quatre quadruples DDC (Digital Downconverter Chip) indépendants dont la fréquence maximale est de 100 Méchantillons/s. Les récepteurs numériques sont également utilisés pour les signaux de sondage de canal ou de transmission en très large bande. Le site dispose également de deux récepteurs numériques (80MS/s) sur IP (SDR-IP) de la société RFSPACE.

A.1.2.1 La tour « UnseenLabs »

L'IEETR collabore avec l'entreprise UnseenLabs depuis 2015 dans le cadre de collaborations de recherche, études et mesures de systèmes électroniques, antennes, traitement du signal, destinés à être embarqués à bord de satellites (format cube satellites), dont les premiers ont été lancés en 2019.

L'Université de Rennes 1 a consenti à la mise à disposition de terrains, locaux et matériels de la station de Monterfil sollicités par l'entreprise UnseenLabs afin d'y exercer son activité de suivi et guidage de satellites, de réception au sol et du pré-traitement des données spatiales acquises par ceux-ci.

Le local principal mis à disposition de l'entreprise UnseenLabs concerne la tour métallique située entre le bâtiment AC12 et l'antenne HF log verticale positionnée sur la parcelle A02 (973) comme le montre les photos de la figure A.3. La réhabilitation de la tour métallique, son instrumentation et sa sécurisation ont totalement été prises en charge par l'entreprise UnseenLabs en 2018. Une fois les travaux de réhabilitation réalisés, la société Bureau VERITAS Exploitation / SODIA Région Ouest a réalisé le 28 mars 2019 une expertise sur l'état de conservation du pylône treillis grande hauteur et a émis un avis favorable sur l'état de conservation du pylône et de son utilisation en accord avec la réglementation des protections collectives d'accès et de sécurisation (rapport VERITAS-7257852).

Le 1^e étage de cette tour métallique est désormais accessible pour la réalisation d'expérimentations scientifiques et permet, entre autres, la calibration des systèmes de mesures dans une configuration de propagation de type espace libre.

A.1.3 La Plate-forme PIMA

A.1.3.1 Introduction

Créée puis progressivement mise en place au cours de l'année 2015, la plate-forme PIMA (Plate-forme d'Ingénierie Multimodale Aéroportée) a été labellisée Plate-forme de Recherche de l'Université de Rennes 1 par la Commission Plates-formes de Recherche de l'Université de Rennes en sa séance du 7 juin 2017.

L'objectif de la plate-forme PIMA est développer une plateforme aéroportée pouvant accueillir des capteurs couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique (de l'optique jusqu'aux micro-ondes). En effet, l'imagerie aéroportée (active ou passive) constitue une composante essentielle dans la mise en œuvre rapide de techniques d'observation à la pointe de



FIGURE A.3 – Tour « UnseenLabs » sur la station de Monterfil

l'innovation, la validation de nouveaux concepts méthodologiques ou technologiques, à la préparation de futures missions spatiales de télédétection ou à la calibration/validation des nouveaux systèmes spatiaux d'observation de la terre. Elle permet également d'explorer des pistes instrumentales pouvant à terme être transférées vers l'opérationnel (transfert de technologie vers l'industrie) sur un porteur dédié avec une instrumentation adaptée aux besoins, et sert enfin de base d'images pour former la communauté scientifique mais également les pouvoirs publics et les industriels à l'utilisation de ces nouvelles données.

La plate-forme PIMA a été entièrement financée par les fonds européens (FEDER), la Région Bretagne, Rennes Métropole et l'Université de Rennes1¹.

A.1.3.2 Localisation

- L'aéronef PIMA ainsi que les équipements aéronautiques sont localisés à l'ACRIV (AéroClub de Rennes Ile et Vilaine) aéroport de Rennes – Saint Jacques (LFRN).
- La Zone Aviation est située sous la TMA 1 (Terminal Manoeuvring Area) de la CTR (Control Traffic Region) de Rennes (LFRN) dans le SIV Sud en classe G. Elle est localisée au sein de la station expérimentale de l'IETR à Monterfil au lieu dit « Lande de Trébian et du Gué Charet · » sur les parcelles cadastrées n°A969, A970, A971, A972 et ZD8.

A.1.3.3 Équipements

La plate-forme de recherche PIMA est constituée des principaux équipements suivants :

- Un avion 3 axes, biplace, monomoteur (catégorie ULM classe 3, VFR-VMC) : CTLS 100 (Flight Design).
- Cet aéronef est équipé :
 - d'un pilote automatique,
 - de systèmes de navigation et de radiocommunications permettant l'évolution dans des espaces aériens contrôlés,
 - d'un parachute balistique de survie et balises de détresse,
 - d'un système de positionnement (x,y,z ou t,r,l) à centrale inertielle (Ekinox-N) couplé à un système GPS différentiel haute résolution (GNSS RTK UHF - ABX 100),
 - d'une radio-modem UHF ADL Vantage 430-470 MHz,

1. Une description détaillée est disponible sur le site <https://www.ietr.fr/pima/>

-
- d'un container sous voileure, dénommé cargo-pod, homologué et amovible pour équipement métrologique,
 - d'une nacelle gyrostabilisée SOMAG CSM 130 couplée à une IMU interne,
 - d'un pack de 12 batteries lithium - gamme aviation - dédié pour l'alimentation des équipements scientifiques (SB12V19E-EC - 12 V-19 AH), associé à un onduleur sinus vrai 220VAC 700W,
 - d'une batterie à élément unique, nouvelle génération, (12V, 105 AH) intégrant un unique système électronique de protection embarqué (BMS : Battery Management System).
 - Équipements aviation complémentaires (hélice tripale + cône, GMP 912 UL, kit injection haute altitude, pneus, roues, analyseur de vibrations, balance ...).
 - Équipements de sécurité : parachutes individuels Spekon 5L-5+, pack régulateur 02-D2 avec embout alu AL415 + détendeur, canot de sauvetage Life-raft 1P-Brick pack hermetically sealed (ISPLR.1002.5), moyen de communication de secours étanche (IP68).
 - Caméra optique : Canon EOS 5DSR (50Mpx).
 - Systèmes radar altimétrique –SWALIS / KaRADOC / HOMARDS.
 - Système radar imageur - PoSAR-X (Pocket SAR – bande X).
 - Une Zone Aviation qui comporte :
 - Une aire d'atterrissage et de décollage de classe UA (200m x 40m), de nature herbe et sol compacté pour avions légers de type ULM qui a été agréée le 9 février 2011 et renouvelée le 24 avril 2017 par la préfecture de Rennes, la DGAC-Ouest, la FFA et la FFPLUM. Cet agrément a été accordé à titre permanent le 7 décembre 2021.
 - Les surfaces de dégagement (plans de trouée et surfaces latérales) telles que définies dans le guide technique de la DGAC - ITAC 13-4²,
 - Un taxiway reliant l'aire d'atterrissage et de décollage au hangar aviation,
 - Un hangar de 225m² (15m x 15m x 6m) dédié aux activités aéronautiques.
 - Une tour métallique d'essais et d'expérimentations dénommée Tour Unseen-Labs.

Une vue aérienne de la Zone Aviation est reportée sur l'image de la figure A.4.

2. http://www.ffplum.info/structures/clubs_loi_1901/les_textes_de_base.html



FIGURE A.4 – Zone Aviation implantée sur les parcelles A969, A970, A971, A972 et ZD8 de la station expérimentale de Monterfil. La Zone Aviation comprend une aire d'atterrissage et de décollage avec ses dégagements, un taxiway ainsi qu'un bâtiment (hangar) dédié aux activités aéronautiques.



FIGURE A.5 – Photo en vol de l’aéronef de la plate-forme PIMA, Crédit photos : ©Jean-Claude MOSCHETTI/IETR/CNRS Photothèque.

A.1.3.4 Activités scientifiques

Afin de pouvoir tester et valider des systèmes d’acquisition ou de mesures développés dans ses équipes, l’IETR a souhaité se doter d’un système aéroporté permettant d’emporter des équipements scientifiques et capteurs implantés dans un container sous voilure appelé cargo-pod. Pour cela, la plate-forme PIMA dispose, entre autres, d’un aéronef de catégorie ULM de classe 3, qui est présenté sur la figure A.5. D’autres photographies de l’aéronef et de la plate-forme PIMA sont également accessibles sur le site du CNRS³.

L’aéronef de la plate-forme PIMA dispose des qualifications suivantes :

- Vidéo et photographie aérienne haute résolution,
- Vol très basse altitude (< 150 m - 500 ft),
- Vol haute altitude (4000 m - 14500 ft jusqu’à 6000 m - 19700 ft possible),
- Survol maritime (canot sauvetage, VHF marine, combinaison de survie),

3. à partir de https://images.cnrs.fr/photo/20220104_0059 jusqu’à https://images.cnrs.fr/photo/20220104_0083

-
- Vol haute montagne (altiport / altisurface),
 - Vol en condition VFR - VMC (vol de jour avec bonne visibilité verticale et horizontale).

Cette plateforme aéroportée permet une avancée significative dans la compréhension des écosystèmes en milieux marins, côtiers, terrestres et urbains, répondant ainsi à l'initiative Européenne NEREUS et plus largement au programme Européen COPERNICUS (ex GMES).

La plate-forme PIMA est désormais un élément fédérateur de la communauté scientifique bretonne de la télédétection en mettant à la disposition des laboratoires et des entreprises un moyen d'acquisition optique/radar aéroporté unique dans le milieu académique Européen.

Ses principaux domaines d'expertise sont les suivants :

- Développement de systèmes d'imagerie optique et radar aéroportée, par la mise au point de capteurs couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique,
- Télédétection et imagerie radar à synthèse d'ouverture d'environnements naturels,
- Participation aux campagnes CalVal (calibration / validation) des nouveaux systèmes spatiaux d'observation de la terre,
- Recherches en nouveaux dispositifs communicants intégrés et en dispositifs faible coût, à faible impact environnemental, et/ou avec une sécurité et discrétion accrue répondant aux exigences de l'aéronautique du futur.

Disposer d'un avion biplace non certifié, qui vole sous régime déclaratif et sur lequel il est facile d'installer des systèmes de mesures, standardisés ou prototypes développés à l'IETR, permet une forte réactivité quant au déploiement d'un système aéroporté pour réaliser et tester en configuration réelle de vol, des systèmes de mesures ou de caractérisations. Cette force indéniable fait que la plate-forme de recherche PIMA est à ce jour unique dans le milieu académique Européen.

A.1.4 La Plate-forme SAFIRE

La plate-forme SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement) est une Unité d'Appui et de Recherche (UAR 2859) commune au CNRS, à Météo France et au CNES. Elle est localisée à l'aéroport de Toulouse Francazal⁴.

4. Une présentation de la plate-forme SAFIRE est accessible à partir du lien : <https://www.safire.fr/fr/>



FIGURE A.6 – L’ATR-42 du SAFIRE lors d’un décollage, crédit photos : © SAFIRE.

La plate-forme SAFIRE dispose à ce jour de deux avions : un ATR-42 et un Piper-Aztec (le Falcon-20 ayant été retiré du service en février 2022).

Ces deux appareils ont été modifiés et constituent de véritables laboratoires volants ayant chacun des spécificités pour mieux répondre aux besoins de la recherche. En particulier, l’ATR-42 (présenté sur la figure A.6) a embarqué le capteur KaRADOC lors des campagnes aéroportées DRIFT4SKIM et SUMOS. D’autres photographies de la plate-forme SAFIRE sont également accessibles à partir du site du CNRS⁵.

5. <https://images.cnrs.fr/reportage-photo/rep000449>

PUBLICATIONS PERSONNELLES

1. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S., POTTIER É., GRUNFELDER G., The SWALIS project : First results for airborne radar measurements in Ka band, In proceedings of European Radar Conference (EuRAD 2020), Jan 2021, Utrecht, Netherlands.
2. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S., POTTIER É., CHINAUD J., GRUNFELDER G., PICOULT G., MALLET A., SWALIS/KaRADOc Sensors : A Specific Calibration Procedure for Radar Systems for Hydrologic Remote Sensing Applications, In proceedings of European Radar Conference (EuRAD 2022), Sep 2022, Milan, Italy.
3. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S., POTTIER É., CHINAUD J., GRUNFELDER G., PICOULT G., MALLET A., SWALIS/KaRADOc Sensors : A Specific Calibration Procedure for Radar Systems for Hydrologic Remote Sensing Applications, Living Planet Symposium, ESA, May 2022, Bonn, Germany.
4. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S., POTTIER É., GRUNFELDER G., HIMDI M., LECONTE C., LEROY P., CHINAUD J., MALLET A., Projet SWALIS. Mesures radar aéroportées en bande Ka : premiers résultats, In proceedings of Journées Nationales Micro-ondes, Juin 2022, Limoges, France.
5. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S. et al., Mise en oeuvre d'une plateforme de mesure aéroportée pour la préparation de la mission altimétrique spatiale EU/US SWOT (projet SWALIS), Instrumentation pour le suivi environnemental / INSIS-INSU, Session Radar, le 7 juillet 2021
6. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S. et al, KaRADOc : campagne de mesures dans le golfe de Gascogne -février/mars 2021, rapport de contrat, projet KaRADOc (radar en bande Ka pour applications océanographiques), convention CNES 202280/00, mars 2022.
7. **KOUMI, J.-C.**, MÉRIC S., Radar aéroporté pour mesures en bande Ka à faibles incidences pour l'hydrologie continentale, rapport de contrat CNES, convention DA 10147346, mars 2023.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Le groupe de travail G7 Océan*. adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Speich_G7Ocean_MTES_20Dec2018.pdf.
- [2] *How is climate change impacting the world's ocean*. adresse : <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/ocean-impacts>.
- [3] *L'eau dans l'univers*. adresse : <https://www.cieau.com/connaitre-leau/connaitre-leau/leau-dans-lunivers/>.
- [4] S. BROWN, C. RUF, S. KEIHM et A. KITTIYAKARA, « Preliminary validation and performance of the Jason microwave radiometer », in *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, t. 2, Toulouse, France : IEEE, 2003, p. 1077-1079.
- [5] W. BANNOURA, A. WADE et D. SRINIVAS, « NOAA Ocean Surface Topography Mission Jason-2 Project Overview », in *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, Washington, DC, USA : IEEE, 2005, p. 1-5.
- [6] F. MAIWALD, O. MONTES, S. PADMANABHAN, D. MICHAELS, A. K. IYAKARA, R. JARNOT, S. T. BROWN, D. DAWSON, A. WU, W. HATCH, P. STEK et T. GAIER, « Reliable and Stable Radiometers for Jason-3 », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, t. 9, 6, p. 2754-2762, juin 2016.
- [7] J. RICHARD, B. DURAND, F. ROBERT, N. TAVENEAU, N. STENOUE et P. SENGENES, « AltiKa Instrument for Space Altimetry with Improved Performances and Ocean Sampling : Development Status and First Test Results », in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, MA, USA : IEEE, 2008, p. III – 67–III -70.
- [8] Y.-L. DESNOS, C. BUCK, J. GUIJARRO, G. LEVRINI, J.-L. SUCHAIL, R. TORRES, H. LAUR, J. CLOSA et B. ROSICH, « The ENVISAT advanced synthetic aperture radar system », in *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet : The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, t. 3, Honolulu, HI, USA : IEEE, 2000, p. 1171-1173.

-
- [9] S. MECKLENBURG, « ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission - An overview on the mission's performance and scientific results », p. 1997, 1^{er} mai 2014, Conference Name : EGU General Assembly Conference Abstracts ADS Bibcode : 2014EGUGA..16.1997M.
- [10] M. MARTIN-NEIRA, R. OLIVA, R. ONRUBIA, I. CORBELLO, N. DUFFO, R. RUBINO, J. KAINULAINEN, J. CLOSA, A. ZURITA, J. DEL CASTILLO, F. CABOT, A. KHAZAAL, E. ANTERRIEU, J. BARBOSA, G. LOPES, D. BARROS, J. TENERELLI, R. DIEZ-GARCIA, V. RODRIGUEZI, J. FAUSTE, J. M. CASTRO CERON, A. TURIEL, V. GONZALEZ-GAMBAU, R. CRAPOLICCHIO, L. DI CIOLO, G. MACELLONI, M. BROGIONI, F. MONTOMOLI, P. VOGEL, B. H. ORTEGA, E. C. CORTES et M. SUESS, « SMOS Instrument Performance After More than 11 Years in Orbit », in *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium : IEEE, 11 juill. 2021, p. 7744-7747.
- [11] J.-L. ROUJEAN, B. BHATTACHARYA, P. GAMET, M. R. PANDYA, G. BOULET, A. OLIOSO, S. K. SINGH, M. V. SHUKLA, M. MISHRA, S. BABU, P. V. RAJU, C. S. MURTHY, X. BRIOTTET, A. RODLER, E. AUTRET, I. DADOU, D. ADLAKHA, M. SARKAR, G. PICARD, A. KOURAEV, C. FERRARI, M. IRVINE, E. DELOGU, T. VIDAL, O. HAGOLLE, P. MAISONGRANDE, M. SEKHAR et K. MALLICK, « TRI-SHNA : An Indo-French Space Mission to Study the Thermography of the Earth at Fine Spatio-Temporal Resolution », in *2021 IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)*, Ahmedabad, India : IEEE, 6 déc. 2021, p. 49-52.
- [12] G. SKOFRONICK-JACKSON, G. HUFFMAN, E. STOCKER et W. PETERSEN, « Successes with the Global Precipitation Measurement (GPM) mission », in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, China : IEEE, juill. 2016, p. 3910-3912.
- [13] C. KUMMEROW, W. BARNES, T. KOZU, J. SHIUE et J. SIMPSON, « The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package », *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, t. 15, 3, p. 809-817, juin 1998.
- [14] J. AGUTTES, J. SCHRIVE, C. GOLDSTEIN, M. ROUZE et G. RAJU, « MEGHATROPIQUES, a satellite for studying the water cycle and energy exchanges in the tropiques », in *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet : The Role of Remote Sensing*

-
- in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, t. 7, Honolulu, HI, USA : IEEE, 2000, p. 3042-3044.
- [15] XIAODONGWU, LINGDU, FEIHUANG et JIELI, « Retrieval of sea ice thickness of Ross Sea with ICESat/GLAS measurements », in *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, Nanjing, China : IEEE, juin 2011, p. 4381-4384.
- [16] J. BECKERS, J. A. CASEY, S. HENDRICKS, R. RICKER, V. HELM et C. HAAS, « Characteristics of CryoSat-2 signals over multi-year and seasonal sea ice », in *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, Melbourne, Australia : IEEE, juill. 2013, p. 220-223.
- [17] G. RAMILLIEN, A. CAZENAVE et O. BRUNAU, « Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry : global time variations of hydrology from GRACE », *Geophysical Journal International*, t. 158, 3, p. 813-826, 27 juill. 2004.
- [18] *AR6 Synthesis Report, Climate Change 2023*. adresse : https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- [19] E. NJOKU, J. STACEY et F. BARATH, « The Seasat scanning multichannel microwave radiometer (SMMR) : Instrument description and performance », *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, t. 5, 2, p. 100-115, avr. 1980.
- [20] R. KROODSMA, S. BILANOW, Y. JI et D. MCKAGUE, « TRMM Microwave Imager (TMI) updates for final data version release », in *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Fort Worth, TX : IEEE, juill. 2017, p. 1216-1219.
- [21] T. LEE, J. GOERSS, J. HAWKINS, J. TURK, Z. JELENAK et P. CHANG, « Windsat applications for weather forecasters and data assimilation », in *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.*, t. 6, Seoul, Korea : IEEE, 2005, p. 4022-4025.
- [22] D. M. LE VINE, G. S. E. LAGERLOEF, F. PELLERANO et F. R. COLOMB, « The Aquarius/SAC-D mission and status of the Aquarius instrument », in *2008 Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*, Florence, Italy : IEEE, mars 2008, p. 1-4.

-
- [23] F. T. ULABY et D. G. LONG, *Microwave radar and radiometric remote sensing*. Ann Arbor : University of Michigan press, 2014.
- [24] T. LE TOAN, « A P-band SAR for global forest biomass measurement : The BIOMASS mission », in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, Beijing, China : IEEE, août 2014, p. 1-2.
- [25] D. LONG, « NSCAT views land and ice », in *IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. (Cat. No.98CH36174)*, Seattle, WA, USA : IEEE, 1998, 1973-1975 vol.4.
- [26] L. KUNZ et D. LONG, « Calibrating SeaWinds and QuikSCAT scatterometers using natural land targets », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, t. 2, 2, p. 182-186, avr. 2005.
- [27] CONGLING NIE et D. G. LONG, « Simultaneous wind and rain retrieval for ERS scatterometer measurements », in *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain : IEEE, 2007, p. 4455-4458.
- [28] J. VERSPEEK, A. STOFFELEN, M. PORTABELLA, A. VERHOEF et J. VOGELZANG, « ASCAT Scatterometer Ocean Calibration », in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, MA, USA : IEEE, 2008, p. V – 248–V -251.
- [29] A. ZIEGER, D. HANCOCK, G. HAYNE et C. PURDY, « NASA radar altimeter for the TOPEX/POSEIDON Project », *Proceedings of the IEEE*, t. 79, 6, p. 810-826, juin 1991.
- [30] I. HAJNSEK et M. EINEDER, « TerraSAR-X : science exploration of polarimetric and interferometric SAR », in *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.*, t. 7, Seoul, Korea : IEEE, 2005, p. 4882-4885.
- [31] S. LEHNER, J. HORSTMANN et J. SCHULZ-STELLENFLETH, « TerraSAR-X for oceanography mission overview », in *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004*, t. 5, Anchorage, AK, USA : IEEE, 2004, p. 3303-3306.

-
- [32] T. GRELIER, T. AMIOT, C. TISON, L. DELAYE, D. HAUSER et P. CASTILLAN, « The SWIM instrument, a wave scatterometer on CFOSAT mission », in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, China : IEEE, juill. 2016, p. 5793-5796.
- [33] S. HENSLEY, J. VAN ZYL, M. LAVALLE, M. NEUMANN, T. MICHEL, R. MUELLERSCHOEN, N. PINTO, M. SIMARD et M. MOGHADDAM, « L-band and P-band studies of vegetation at JPL », in *2015 IEEE Radar Conference*, Johannesburg, South Africa : IEEE, oct. 2015, p. 516-520.
- [34] A. TABATABAEENEJAD, R. H. CHEN, M. S. BURGIN, X. DUAN, R. H. CUENCA, M. H. COSH, R. L. SCOTT et M. MOGHADDAM, « Assessment and Validation of AirMOSS P-Band Root-Zone Soil Moisture Products », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 58, 9, p. 6181-6196, sept. 2020.
- [35] S. HENSLEY, B. CHAPMAN, M. LAVALLE, B. HAWKINS, B. RIEL, T. MICHEL, R. MUELLERSCHOEN, Y. LOU et M. SIMARD, « Uavsar L-Band and P-Band Tomographic Experiments in Boreal Forests », in *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia : IEEE, juill. 2018, p. 8679-8682.
- [36] R. AKBAR, R. CHEN, A. TABATABAEENEJAD et M. MOGHADDAM, « Synergistic use of AirMOSS P-band SAR with the SMAP L-band radar-radiometer for soil moisture retrieval », in *2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Cairns, Australia : IEEE, sept. 2016, p. 793-795.
- [37] E. CHAPIN, A. CHAU, J. CHEN, B. HEAVEY, S. HENSLEY, Y. LOU, R. MACHUZAK et M. MOGHADDAM, « AirMOSS : An Airborne P-band SAR to measure root-zone soil moisture », in *2012 IEEE Radar Conference*, Atlanta, GA : IEEE, mai 2012, p. 0693-0698.
- [38] R. H. CHEN, A. TABATABAEENEJAD et M. MOGHADDAM, « Retrieval of permafrost active layer properties using P-band airmoss and L-band UAVSAR data », in *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Fort Worth, TX : IEEE, juill. 2017, p. 1415-1418.
- [39] *SWOT Mission Overview*. adresse : <https://swot.jpl.nasa.gov/mission/overview/>.

-
- [40] S. BIANCAMARIA, D. P. LETTENMAIER et T. M. PAVELSKY, « The SWOT mission and its capabilities for land hydrology », *Surveys in Geophysics*, t. 37, 2, p. 307-337, mars 2016.
- [41] E. H. ALTENAU, T. M. PAVELSKY, D. MOLLER, C. LION, L. H. PITCHER, G. H. ALLEN, P. D. BATES, S. CALMANT, M. DURAND et L. C. SMITH, « AirSWOT measurements of river water surface elevation and slope : tanana river, AK », *Geophysical Research Letters*, t. 44, 1, p. 181-189, 16 jan. 2017.
- [42] E. H. ALTENAU, T. M. PAVELSKY, D. MOLLER, L. H. PITCHER, P. D. BATES, M. T. DURAND et L. C. SMITH, « Temporal variations in river water surface elevation and slope captured by AirSWOT », *Remote Sensing of Environment*, t. 224, p. 304-316, avr. 2019.
- [43] Y. YOON, E. BEIGHLEY, H. LEE, T. PAVELSKY et G. ALLEN, « Estimating flood discharges in reservoir-regulated river basins by integrating synthetic SWOT satellite observations and hydrologic modeling », *Journal of Hydrologic Engineering*, t. 21, 4, p. 05 015 030, avr. 2016.
- [44] *The CEOS database*. adresse : <http://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=646>.
- [45] R. FJORTOFT, J.-M. GAUDIN, N. POURTHIE, C. LION, A. MALLET, J.-C. SOUYRIS, C. RUIZ, F. KOUDOGBO, J. DURO, P. ORDOQUI et A. ARNAUD, « KaRIn - the Ka-band radar interferometer on SWOT : Measurement principle, processing and data specificities », in *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, HI, USA : IEEE, juill. 2010, p. 4823-4826.
- [46] R. FJORTOFT, J.-M. GAUDIN, N. POURTHIE, J.-C. LALAURIE, A. MALLET, J.-F. NOUVEL, J. MARTINOT-LAGARDE, H. ORIOT, P. BORDERIES, C. RUIZ et S. DANIEL, « KaRIn on SWOT : Characteristics of Near-Nadir Ka-Band Interferometric SAR Imagery », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 52, 4, p. 2172-2185, avr. 2014.
- [47] M. SOUMEKH, *Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms*. New York : J. Wiley, 1999, 616 p.
- [48] *Hydrologie continentale et SWOT*. adresse : https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/kiosque/education/hydro-swot/04-Swot_principe-FR.pptx.

-
- [49] J.-S. LEE et E. POTTIER, *Polarimetric Radar Imaging : From Basics to Applications*, 1^{re} éd., J.-S. LEE et E. POTTIER, éd. CRC Press, 19 déc. 2017.
- [50] G. R. VALENZUELA, « Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves - a review », *Boundary-Layer Meteorology*, t. 13, 1, p. 61-85, jan. 1978.
- [51] F. ARDHUIN, Y. AKSENOV, A. BENETAZZO, L. BERTINO, P. BRANDT, E. CAUBET, B. CHAPRON, F. COLLARD, S. CRAVATTE, J.-M. DELOUIS, F. DIAS, G. DIBARBOURE, L. GAULTIER, J. JOHANNESSEN, A. KOROSOV, G. MANUCHARYAN, D. MENEMENLIS, M. MENENDEZ, G. MONNIER, A. MOUCHE, F. NOUGUIER, G. NURSER, P. RAMPAL, A. RENIERS, E. RODRIGUEZ, J. STOPA, C. TISON, C. UBELMANN, E. van SEBILLE et J. XIE, « Measuring currents, ice drift, and waves from space : the sea surface KInematics multiscale monitoring (SKIM) concept », *Ocean Science*, t. 14, 3, p. 337-354, 15 mai 2018.
- [52] F. ARDHUIN, P. BRANDT, L. GAULTIER, C. DONLON, A. BATTAGLIA, F. BOY, T. CASAL, B. CHAPRON, F. COLLARD, S. CRAVATTE, J.-M. DELOUIS, E. DE WITTE, G. DIBARBOURE, G. ENGEN, H. JOHNSEN, C. LIQUE, P. LOPEZ-DEKKER, C. MAES, A. MARTIN, L. MARIÉ, D. MENEMENLIS, F. NOUGUIER, C. PEUREUX, P. RAMPAL, G. RESSLER, M.-H. RIO, B. ROMMEN, J. D. SHUTLER, M. SUESS, M. TSAMADOS, C. UBELMANN, E. van SEBILLE, M. van den OEVER et D. STAMMER, « SKIM, a Candidate Satellite Mission Exploring Global Ocean Currents and Waves », *Frontiers in Marine Science*, t. 6, p. 209, 30 avr. 2019.
- [53] F. NOUGUIER, B. CHAPRON, F. COLLARD, A. A. MOUCHE, N. RASCLE, F. ARDHUIN et X. WU, « Sea Surface Kinematics From Near-Nadir Radar Measurements », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 56, 10, p. 6169-6179, oct. 2018.
- [54] S. DINARDO, C. MARALDI, J.-A. DAGUZE, S. AMRAOUI, F. BOY, T. MOREAU, M. FORNARI, R. CULLEN et N. PICOT, « Sentinel-6 MF Poseidon-4 Radar Altimeter In-Flight Calibration and Performances Monitoring », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 60, p. 1-16, 2022.
- [55] R. CULLEN, C. DONLON, M. FORNARI et L. GIULICCHI, « Sentinel-6 Michael Freilich Poseidon-4 Altimeter In-Orbit Performance », in *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Kuala Lumpur, Malaysia : IEEE, 17 juill. 2022, p. 6791-6794.

-
- [56] S. ABEYSEKERA, « Performance of pulse-pair method of Doppler estimation », *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, t. 34, 2, p. 520-531, avr. 1998.
- [57] S. ABEYSEKERA, « Efficient frequency estimation using the pulse-pair method at various lags », *IEEE Transactions on Communications*, t. 54, 9, p. 1542-1546, sept. 2006.
- [58] T. LUPI, W. DI NICOLANTONIO, A. DI CINTIO, F. TOMINETTI, L. PEUBE, C. BREDIN, C. MALASSINGNE, C. TABART, E. MATARAZZO, N. GATTI, E. VETRANO, L. S. DRIOLI et P. COLUCCI, « MicroWave Imager for MetOp-SG : development status and Instrument verification », in *2020 16th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing for the Environment (MicroRad)*, Florence, Italy : IEEE, 16 nov. 2020, p. 1-4.
- [59] L. MARIÉ, F. COLLARD, F. NOUGUIER, L. PINEAU-GUILLOU, D. HAUSER, F. BOY, S. MÉRIC, P. SUTHERLAND, C. PEUREUX, G. MONNIER, B. CHAPRON, A. MARTIN, P. DUBOIS, C. DONLON, T. CASAL et F. ARDHUIN, « Measuring ocean total surface current velocity with the KuROS and KaRADOC airborne near-nadir doppler radars : a multi-scale analysis in preparation for the SKIM mission », *Ocean Science*, t. 16, 6, p. 1399-1429, 13 nov. 2020.
- [60] G. CAUDAL, D. HAUSER, R. VALENTIN et C. LE GAC, « KuROS : a new airborne ku-band doppler radar for observation of surfaces », *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, t. 31, 10, p. 2223-2245, 1^{er} oct. 2014.
- [61] D. HAUSER, G. CAUDAL, C. LE GAC, R. VALENTIN, L. DELAYE et C. TISON, « KuROS : A new airborne Ku-band Doppler radar for observation of the ocean surface », in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec City, QC : IEEE, juill. 2014, p. 282-285.
- [62] B. C. DOMINGUEZ, C. PACHOT, H. OETJEN, F. MARIANI, S. RIEL, A. TROMBA, D. LAJAS, D. SCHUETTEMAYER, B. SIERK, N. LEVEQUE, M.-G. KOLM, H. KORSWAGEN et W. POSSELT, « The Far-Infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring (Forum) Mission. ESA's 9th Earth Explorer », in *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Waikoloa, HI, USA : IEEE, 26 sept. 2020, p. 6035-6038.

-
- [63] T. LEE, S. GILLE, F. ARDHUIN, J. BOLAND, M. BOURASSA, P. CHANG, S. CRAVATTE, T. FARRAR, M. FEWINGS, G. JACOBS, Z. JELENAK, F. LYARD, J. MAY, E. REMY, L. RENAULT, E. RODRIGUEZ, C. UBELMANN, B. VILLAS BÔAS et A. WINETEER, « A satellite mission concept to unravel small-scale ocean dynamics and air-sea interactions : ODYSEA (Ocean Dynamics and Surface Exchange with the Atmosphere) », oral, other, 22 fév. 2023.
- [64] H. MASUKO, K. OKAMOTO, M. SHIMADA et S. NIWA, « Measurement of microwave backscattering signatures of the ocean surface using X band and K_a band airborne scatterometers », *Journal of Geophysical Research*, t. 91, p. 13065, C11 1986.
- [65] F. DYER, M. GARY et G. EWELL, « Radar sea clutter at 9.5, 16.5, 35, and 95 GHz », in *1974 Antennas and Propagation Society International Symposium*, t. 12, Atlanta, Georgia, USA : Institute of Electrical et Electronics Engineers, 1974, p. 319-322.
- [66] E. J. WALSH, D. C. VANDEMARK, C. A. FRIEHE, S. P. BURNS, D. KHELIF, R. N. SWIFT et J. F. SCOTT, « Measuring sea surface mean square slope with a 36-GHz scanning radar altimeter », *Journal of Geophysical Research : Oceans*, t. 103, p. 12587-12601, C6 15 juin 1998.
- [67] E. J. WALSH, C. W. WRIGHT, M. L. BANNER, D. C. VANDEMARK, B. CHAPRON, J. JENSEN et S. LEE, « The southern ocean waves experiment. part III : sea surface slope statistics and near-nadir remote sensing », *Journal of Physical Oceanography*, t. 38, 3, p. 670-685, 1^{er} mars 2008.
- [68] A. NEKRASOV et P. HOOGEBOOM, « A ka-band backscatter model function and an algorithm for measurement of the wind vector over the sea surface », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, t. 2, 1, p. 23-27, jan. 2005.
- [69] S. TANELLI, S. DURDEN et E. IM, « Simultaneous measurements of ku- and ka-band sea surface cross sections by an airborne radar », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, t. 3, 3, p. 359-363, juill. 2006.
- [70] P. H. Y. LEE, J. D. BARTER, K. L. BEACH, C. L. HINDMAN, B. M. LAKE, H. RUNGALDIER, J. C. SHELTON, A. B. WILLIAMS, R. YEE et H. C. YUEN, « X band microwave backscattering from ocean waves », *Journal of Geophysical Research*, t. 100, p. 2591, C2 1995.

-
- [71] F. NOUGUIER, A. MOUCHE, N. RASCLE, B. CHAPRON et D. VANDEMARK, « Analysis of Dual-Frequency Ocean Backscatter Measurements at Ku- and Ka-Bands Using Near-Nadir Incidence GPM Radar Data », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, t. 13, 9, p. 1310-1314, sept. 2016.
- [72] O. BOISOT, S. PIOCH, C. FATRAS, G. CAULLIEZ, A. BRINGER, P. BORDERIES, J.-C. LALAURIE et C.-A. GUÉRIN, « Ka-band backscattering from water surface at small incidence : a wind-wave tank study : KA-BAND WIND-WAVE TANK STUDY », *Journal of Geophysical Research : Oceans*, t. 120, 5, p. 3261-3285, mai 2015.
- [73] O. BOISOT, F. NOUGUIER, B. CHAPRON et C.-A. GUERIN, « The GO4 Model in Near-Nadir Microwave Scattering From the Sea Surface », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 53, 11, p. 5889-5900, nov. 2015.
- [74] *Pulse pair Method*. adresse : https://apollo.nvu.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/radar/doppler/two_pulses.html.
- [75] IETR, *Projet SWALIS (Still Water Low Incidence Scattering) : Radar aéroporté pour mesures en bande Ka à faibles incidences en milieu hydrologique*, rapport de recherche, convention recherche 161 457/00, nov. 2018.
- [76] S. MÉRIC, J.-C. LALAURIE, M.-D. LO, G. GRUNFELDER, C. LECONTE, P. LEROY et É. POTTIER, *SWALIS/KaRADOc : an airplane experiment platform developed for physics measurement in Ka band. Application to SWOT and SKIM mission preparations*, In proceedings of 6th Workshop on Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments & 4th Ka-band Earth Observation Radar Missions (ARSI'19 & KEO'19), nov. 2019.
- [77] J.-C. K. KOUMI, S. MERIC, E. POTTIER et G. GRUNFELDER, « The SWALIS project : first results for airborne radar measurements in Ka band », in *2020 17th European Radar Conference (EuRAD)*, Utrecht, Netherlands : IEEE, 10 jan. 2021, p. 194-197.
- [78] F. B. GROSS, *Frontiers in antennas : next generation design & engineering*. New York : McGraw-Hill, 2012, OCLC : 824744565.
- [79] CNES, *Compte rendu d'essais du tiroir démonstrateur RF Pulse du diffusiomètre aéroporté SWALIS*, DSO/RF/HNO-2021.0007642, juin 2021.

-
- [80] J.-C. K. KOUMI, S. MERIC, J. CHINAUD, E. POTTIER, G. GRUNFELDER, G. PICOULT et A. MALLET, « SWALIS/KaRADOC Sensors : Calibration Procedure for Radar Systems for Hydrologic Remote Sensing Applications », in *2022 19th European Radar Conference (EuRAD)*, Milan, Italy : IEEE, 28 sept. 2022, p. 1-4.
- [81] S. ORFANIDIS, *Electromagnetic Waves and Antennas*. Sophocles J. Orfanidis, 2016. adresse : <https://books.google.fr/books?id=4n5ezQEACAAJ>.
- [82] *Scikit-Learn Linear regression*. adresse : https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html.
- [83] R. GRAY et D. NEUHOFF, « Quantization », *IEEE Transactions on Information Theory*, t. 44, 6, p. 2325-2383, oct. 1998.
- [84] K. SARABANDI, C. BROWN, L. PIERCE, D. ZAHN, R. AZADEGAN, K. BUELL, M. CASCIATO, I. KOH, D. LAWRENCE et M. PARK, « Calibration and validation of the Shuttle Radar Topography Mission height data for southeastern Michigan », in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, t. 1, Toronto, Ont., Canada : IEEE, 2002, p. 167-169.
- [85] M. BAO, J. SCHULZ-STELLENFLETH, S. LEHNER et M. EINEDER, « First results on ocean wave imaging from the Shuttle Radar Topography Mission », in *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217)*, t. 1, Sydney, NSW, Australia : IEEE, 2001, p. 584-586.
- [86] L. TIGHE et D. CHAMBERLAIN, « ACCURACY COMPARISON OF THE SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP® USA DIGITAL TERRAIN MODEL OVER SEVERAL USA STUDY SITES », jan. 2009.
- [87] *Bushnell ELITE TACTICAL 1M*. adresse : <https://www.bushnell.com/rangefinders/>.
- [88] *N5224B/25B Data Sheet and Technical Specifications for Option 210 and 410 : Keysight 2-Port and 4-Port PNA Network Analyzer*. adresse : <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-04179/technical-specifications/9018-04179.pdf>.
- [89] IETR, *Extension SWALIS pour exploitation de mesures radar aéroporté en bande Ka à faibles incidences pour l'hydrologie continentale*, convention recherche DA 10145304, mars 2023.

-
- [90] *Campagne "SUrface Measurements for Oceanographic Satellites"*. adresse : <https://www.umr-lops.fr/Le-LOPS/Actualites/Campagne-SUMOS-1-Atalante-a-rendez-vous-avec-le-satellite-CFOSAT>.
- [91] *Mesures de surface pour les satellites océanographiques : la campagne SUMOS in-situ et aéroportée*. adresse : <https://www.aviso.altimetry.fr/fr/actualites/image-du-mois/2021/juil-2021-mesures-de-surface-pour-les-satellites-oceanographiques-la-campagne-sumos-in-situ-et-aeroportee.html>.
- [92] A. IBARRA, « Les peuplements de poissons comme outil pour la gestion de la qualité environnementale du réseau hydrographique de la Garonne », jan. 2004.
- [93] C. JIANG, L. REN, J. YANG, Q. XU et J. DAI, « Wind speed retrieval using global precipitation measurement dual-frequency precipitation radar ka-band data at low incidence angles », *Remote Sensing*, t. 14, 6, p. 1454, 18 mars 2022.
- [94] *Projet CFOSAT et support KuROS*. adresse : <https://www.energiesdelamer.eu/2017/01/19/these-observations-par-radar-aeroportee-de-la-surface-marine/>.
- [95] *Projet ESA/Ocean Predict*. adresse : <https://oceanpredict.org/science/projects/a-tscv/#section-home>.

TABLE DES FIGURES

1.1	Classes et sous classes de capteurs de télédétection [23]	15
1.2	Spectre électromagnétique (source : <i>www.radartutorial.eu</i>)	16
1.3	Transmission (en pourcentage) à travers l'atmosphère terrestre suivant la direction verticale par temps clair (source : [23])	17
1.4	Une vue d'artiste de SWOT (source : JPL/NASA)	18
1.5	Illustration de la couverture par cycle complet : partielle après trois jours (gauche) et totale après 21 jours (droite) (source : JPL/NASA)	18
1.6	Angles d'incidence SWOT comparés aux autres missions © Cnes/Mira Production	19
1.7	Ensemble des instruments embarqués par la mission SWOT © TAS	21
1.8	Principe de l'interférométrie [23]	22
1.9	Diagramme de collectes de données SWOT par les deux interféromètres et l'altimètre nadir [43]	23
1.10	Configuration d'émission de capteur KaRIn [48]	24
1.11	Configuration d'émission de capteur KaRIn [48]	25
1.12	Principe radar : onde émise (vert), onde réfléchi (rouge)	27
1.13	Notion de SER : mesure de diagramme azimutal du signal rétrodiffusé par un avion B-26 à 10 cm de longueur d'onde [23])	29
1.14	Aperçu de la réflectivité en fonction de l'état de la surface (lisse ou rugueuse) et de l'angle d'incidence [48].	30
1.15	Illustration de la méthode du Doppler Pulse-Pair (source : [74])	32
2.1	Description générale : vue d'ensemble sur les éléments formant le système SWALIS et leur agencement sur PIMA.	37
2.2	Géométrie de prise de vue : ouverture, trace au sol et dépointage	39
2.3	Forme d'onde : impulsion, salve et fréquence porteuse d'émission	40
2.4	Empreinte au sol au cours de l'avancée de l'avion et du balayage en incidence (vue de dessus) et formules géométriques associées	44
2.5	Empreinte au sol de l'antenne ($N_p = 30$) avec $\tau_f = 80$ ms.	45

2.6	Empreinte au sol de l'antenne ($N_p = 100$) avec $\tau_f = 80$ ms.	45
2.7	Description d'une impulsion élémentaire et la réception de cette impulsion après réflexion sur le sol (cas de l'échantillonnage de l'impulsion de retour).	47
2.8	Schéma synoptique global du capteur SWALIS	49
2.9	Antenne du système SWALIS	51
2.10	Convention de signe des angles de dépointage de l'antenne en fonction des ports d'alimentation (P1 ou P2)	51
2.11	Mesures des angles d'ouverture dans les plans E et H de l'antenne SWALIS.	52
2.12	Description de l'adaptation du port 2 ($S_{11} < -10$ dB) en fonction des angles de dépointage	53
2.13	Choix des angles de mesure (en rouge).	54
2.14	Ouverture à mi-puissance du lobe d'antenne en fonction de la fréquence.	55
2.15	Gain de l'antenne	56
2.16	Diagramme de rayonnement normalisé de l'antenne dans le plan E et me- suré avec alimentation sur le port 1 dans la bande [34 ; 39] GHz)	58
2.17	Diagramme de rayonnement normalisé de l'antenne dans le plan E et me- suré avec alimentation sur le port 2 dans la bande [34 ; 39] GHz)	59
2.18	Diagramme de rayonnement normalisé de l'antenne dans le plan H et me- suré avec alimentation sur le port 1 dans la bande [34 ; 39] GHz)	60
2.19	Diagramme de rayonnement normalisé de l'antenne dans le plan H et me- suré avec alimentation sur le port 2 dans la bande [34 ; 39] GHz)	61
2.20	Schéma synoptique simplifié du module RF SWALIS	63
2.21	Mesures de la transmission du segment RF SWALIS	64
2.22	Gain en réception du segment RF du capteur SWALIS	65
2.23	Isolation du segment RF du capteur SWALIS	66
2.24	Tableau indiquant les fréquences d'échantillonnage en fonction de la largeur IF (extrait de la documentation technique Keysight du PNA-X 5224B).	67
2.25	Interface « SWALIS PIMA » : onglet PNA-X ouvert	73
2.26	Stratégie de marquage pour la centrale inertielle de l'instant de début de chaque rafale	74
2.27	Installation de la nacelle SOMAG CSM130 dans le cargo-pod	74
2.28	Description du synoptique global de KaRADOC pour une intégration sur la plateforme PIMA	76
2.29	Photos des vues face avant et face dessus de KaRADOC	76

2.30	Mesures de la transmission du segment RF KaRADOC	79
2.31	Gain réception du segment RF du capteur KaRADOC	80
3.1	Description du processus de traitement de données.	84
3.2	Configuration géographique pour les opérations de calibration (extrait Google Earth).	86
3.3	Illustration de l'ellipsoïde de Fresnel [81].	87
3.4	Exemple d'un trièdre utilisé pour les opérations de calibration.	88
3.5	Description du banc de mesures de calibration.	89
3.6	Mesures des paramètres S_{11} pour les ports 1 et 2 de l'antenne SWALIS/KaRADOC	89
3.7	Références cartésiennes et angulaires d'un trièdre.	90
3.8	Directions particulières pour la détermination de la SER_{max} et SER à -3 dB	91
3.9	SER des trièdres utilisés pour la calibration pour les valeurs des fréquences décrites dans le tableau 3.1	92
3.10	Configuration pour la calibration en considérant l'environnement de mesure.	93
3.11	Principe de calibration	94
3.12	Chronogramme pour l'enregistrement d'un fichier de mesure	95
3.13	Puissance reçue en fonction de la SER des trièdres pour un filtre IF de 15 MHz	97
3.14	Régression linéaire pour la fréquence de 35,08 GHz pour un filtre IF de 15 MHz.	98
3.15	Puissance reçue en fonction de la SER des trièdres	101
3.16	Régression linéaire pour la fréquence de 34,64 GHz pour un filtre IF de 1 MHz.	102
3.17	Définition du roulis (sens positif défini par la flèche orange)	104
3.18	Définition du tangage (sens positif défini par la flèche bleue)	104
3.19	Définition du lacet (sens positif défini par la flèche grise)	105
3.20	Prise en compte du roulis	106
3.21	Prise en compte du tangage	107
3.22	Incidence locale réelle, calculée à partir de la position de la trace au sol A_{0f} de la zone illuminée.	109
3.23	Description d'une impulsion élémentaire et de la réception de cette impulsion après réflexion sur le sol (cas de l'échantillonnage de l'impulsion de retour).	111

3.24	Définition de la hauteur du porteur par rapport au géoïde de référence . . .	112
3.25	Estimation de la distance par méthode indirecte	113
3.26	Estimation des axes a et b de l'ellipse correspondant à l'empreinte de l'an- tenne au sol en condition nadir sans roulis ni tangage.	113
3.27	Estimation des axes a et b de l'ellipse correspondant à l'empreinte de l'an- tenne au sol en condition autre que la visée nadir	114
3.28	Arbre de contribution des différents postes d'erreur au σ_0	117
3.29	Puissance moyenne mesurée pour chaque trièdre pour la bande IF de 15 MHz	120
3.30	Puissance moyenne mesurée en pour chaque trièdre pour la bande IF de 5 MHz	121
3.31	Puissance moyenne mesurée en pour chaque trièdre pour la bande IF de 1 MHz	122
3.32	Erreur relative par trièdre pour la bande IF de 15 MHz	122
3.33	Erreur relative faite sur l'estimation indirecte de la distance de visée pour la bande IF de 15 MHz	126
3.34	Erreur relative faite sur la mesure de l'altitude (données acquises).	126
3.35	Erreur relative par arête de trièdre	128
3.36	Erreur relative de l'aire pour la bande IF de 15 MHz	130
3.37	Erreur relative faite sur le σ_0 pour la bande IF de 15 MHz	131
3.38	Encadrement σ_0 pour la bande IF de 15 MHz	132
3.39	Erreur absolue faite sur le σ_0 pour la bande IF de 15 MHz	132
4.1	Exemple de principe de la détermination de puissance pour chaque rafale (moyenne de N_P impulsions) reçue (en rouge) et le niveau moyen de puis- sance des échantillons d'une rafale (en bleu).	139
4.2	Exemple d'une carte des puissances le long d'un transect (zone de la Chèze, 1 février 2022) : données L0 en correspondance avec une zone de rétrodif- fusion précise -terre dans l'encadré bleu et eau pour les encadrés jaune, orange et rouge	140
4.3	Description de l'arrangement des données radar lors du stockage pour la structure de niveau L1 avec le nombre d'échantillons par impulsion, le nombre d'impulsions par rafale et le nombre de rafales.	141
4.4	Description de l'arrangement des données radar après intégration du nombre des impulsions définissant une rafale (stockage pour la structure de type L1)	142
4.5	Intégration dans l'ATR.	144

4.6	Description des trajectoires possibles au-dessus de l'aérodrome d'Auch. . .	145
4.7	Extrait des puissances rétrodiffusées (rétrodiffusion vers le radar importante en rouge et rétrodiffusion vers le radar très faible en violet) lors du vol au-dessus de l'aérodrome de Auch (sans correction)	145
4.8	Carte des puissances de rétrodiffusion (rétrodiffusion vers le radar importante en rouge et rétrodiffusion vers le radar très faible en violet) le long de la trace « KaRADOC_FL15_3 » au-dessus de l'aérodrome de Auch (avec corrections).	146
4.9	Le bassin de la Garonne et ses principales rivières [92]	147
4.10	Exemple de mesures « longues » le long de la Garonne (rétrodiffusion vers le radar importante en rouge et rétrodiffusion vers le radar très faible en bleu).	149
4.11	Trace Sentinel-6 en bleu, contour dynamique de la Garonne en blanc et transects de mesure d'intérêt pour SWALIS en rouge. Fond de carte : google earth	150
4.12	Reconstruction optique des zones de T1 (la plus à gauche) à T4 (la plus à droite)	152
4.13	Schéma décrivant la stratégie de discrimination	153
4.14	Comparaison des valeurs de $\langle \sigma_0 \rangle$ à différentes altitudes : superposition des mesures pour les quatre zones	155
4.15	$\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle	156
4.16	$\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle	156
4.17	$\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle	157
4.18	$\langle \sigma_0 \rangle$ et écart-type par classe d'angle	158
4.19	Exemple du masque dynamique fourni par le CNES correspondant à la zone T1	159
4.20	Affichage des données enregistrées sur la zone T1.	160
4.21	Histogramme de $\langle \sigma_0 \rangle$: contraste terre - eau de la zone T1	161
4.22	Répartition de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle sur la zone T1 : contraste entre terre et eau	162
4.23	Affichage des données enregistrées sur les zones T2, T3 et T4	163
4.24	Histogramme de $\langle \sigma_0 \rangle$: contraste terre - eau de la zone T2	163
4.25	Répartition du $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle dans la zone T2 : contraste entre terre et eau	164

4.26	Histogramme de $\langle \sigma_0 \rangle$: mise en évidence du contraste terre - eau de la zone T3	165
4.27	Répartition de $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle dans la zone T3 : contraste entre terre et eau	166
4.28	Histogramme des valeurs $\langle \sigma_0 \rangle$: mise en évidence du contraste terre - eau de la zone T4	166
4.29	Répartition de la valeur $\langle \sigma_0 \rangle$ en fonction des classes d'angle de la zone T4 : contraste entre terre et eau	167
4.30	Radargramme de puissance Sentinel-6 sur fond de carte Google Earth . . .	169
4.31	Comparaison radargramme - photo par recalage de photos SWALIS	170
4.32	Radargramme de puissance de Sentinel-6	171
4.33	Superposition des données SWALIS sur le radargramme Sentinel-6 (zone T3). Nous effectuons un agrandissement sur une zone de la Garonne et afin de visualiser la taille des tâches de l'antenne SWALIS par rapport à la largeur de la Garonne.	172
4.34	Extraction des données du radargramme Sentinel-6 correspondant aux traces SWALIS : le disque orange correspond à la trace SWALIS, les carrés bleus aux pixels du radargramme Sentinel-6, les petits disques bleus correspondent aux points d'extraction.	173
4.35	Comparaison des σ_0 de SWALIS et des puissances extraites du radargramme Sentinel-6 sur la zone T3	174
4.36	Comparaison des σ_0 de SWALIS et des puissances extraites du radargramme Sentinel-6 sur la zone T4	176
A.1	Vue aérienne du plateau technique MERISE sur la station expérimentale de Monterfil	186
A.2	Exemples d'antennes déployées sur la station de Monterfil	187
A.3	Tour « UnseenLabs » sur la station de Monterfil	189
A.4	Zone Aviation implantée sur les parcelles A969, A970, A971, A972 et ZD8 de la station expérimentale de Monterfil. La Zone Aviation comprend une aire d'atterrissage et de décollage avec ses dégagements, un taxiway ainsi qu'un bâtiment (hangar) dédié aux activités aéronautiques.	192
A.5	Photo en vol de l'aéronef de la plate-forme PIMA, Crédit photos : ©Jean-Claude MOSCHETTI/IETR/CNRS Photothèque.	193
A.6	L'ATR-42 du SAFIRE lors d'un décollage, crédit photos : © SAFIRE. . . .	195

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Paramètres de simulation fixés pour l'expérimentation	43
2.2	Paramètres déduits pour la simulation (avec le tableau 2.1) avec $N_p = 30$ et $\tau_f = 80$ ms.	43
2.3	Paramètres déduits pour la simulation (avec le tableau 2.1) avec $N_p = 100$ et $\tau_f = 80$ ms.	46
2.4	Correspondance entre les fréquences d'illumination et les angles de dépointage (absolu et compensés).	54
2.5	Paramètres définis pour chaque enregistrement dans le fichier XML.	69
2.6	Largeurs de bande de filtre IF choisies pour le capteur SWALIS et KaRADOC.	70
3.1	Tableau des fréquences choisies : angle de dépointage et angle d'incidence associés dans la configuration SWALIS	90
3.2	Fréquences d'émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 15 MHz, $\beta_{s(IF)} = 19.9526 \times 10^{-7}$ mW (SWALIS).	99
3.3	Fréquences d'émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 5 MHz, $\beta_{s(IF)} = 5.011872 \times 10^{-7}$ mW (SWALIS).	99
3.4	Fréquences d'émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 1 MHz, $\beta_{s(IF)} = 1.258925 \times 10^{-7}$ mW (SWALIS).	100
3.5	Fréquences d'émission et coefficients de calibration associés pour une distance $R_0 = 351$ m à 1 MHz, $\beta_{s(IF)} = 1.258925 \times 10^{-7}$ mW (KaRADOC).	103
3.6	Valeur de l'erreur relative ΔP_{rm} % par filtre IF et fréquence	123
3.7	Largeurs de bande de filtres IF choisies pour SWALIS et écart-type associé. Pour KaRADOC le filtre IF le plus utilisé est celle de 1 MHz	124
3.8	Récapitulatif des postes d'erreur provenant du coefficient de calibration.	129
4.1	Configuration de la mesure de SWALIS pour la campagne Marmande 2022 (08 juillet).	148
4.2	Tableau des fréquences choisies : angle de dépointage souhaité pour la campagne Marmande 2022.	148

4.3	Tableau de répartition des bursts enregistrés et utiles par zones.	151
4.4	Nombre de rafales utiles sur l'eau pour les différentes hauteurs par classe d'angle d'incidence locale	154

Titre : Projet SWALIS : mise en œuvre d'un système radar aéroporté dans le cadre de la mission spatiale SWOT pour l'analyse de la réflectivité des eaux continentales.

Mot clés : Karin, SWOT, SKIM, SWALIS, KaRADOC, bande Ka , PIMA, réflectivité de l'eau, proche-nadir

Résumé : Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, recenser et monitorer en temps réel les ressources d'eaux douces de surface (ressources essentielles pour l'Humanité), comprendre les mécanismes à grande et petite échelles des courants surfaciques océaniques impactant la régulation thermique de la planète, sont donc d'une importance vitale. Dans ce travail de thèse, nous avons développé, en collaboration avec le CNES (dans le cadre de la mission spatiale SWOT lancée le 16 décembre 2022), le capteur aéroporté SWALIS. Le travail de cette thèse a consisté à réaliser et tester le capteur SWALIS (embarqué sur la plateforme aéroportée de l'IETR -PIMA). Nous avons dimensionné les performances de SWALIS et validé le traitement des données à travers plusieurs campagnes de mesures (Monterfil, Marmande). Nous avons mis en évidence

le contraste terre-eau de coefficient de rétrodiffusion, son indépendance en fonction de l'altitude, et aussi sa décroissance en fonction de l'angle d'incidence. À la suite de cette thèse, le capteur SWALIS est valide afin de pouvoir effectuer des opérations de calibration et validation (Cal/Val) de la mission SWOT et dans les configurations géométriques de SWOT (sur les sites de Cal/Val français du Rhin et de la baie du Mont Saint-Michel).

Concernant le capteur KaRADOC, la version étendue « océan » de SWALIS, et qui implémente le concept SKIM, nous disposons d'une base de données conséquente et obtenue pendant la campagne SUMOS (Golfe de Gascogne) afin de traiter le Doppler des scènes océaniques et la valeur du σ_0 des surfaces océaniques en bande Ka.

Title: SWALIS project: implementation of an airborne radar system in the framework of the SWOT space mission for the reflectivity analysis of continental water.

Keywords: Karin, SWOT, SKIM, SWALIS, KaRADOC, Ka-band, PIMA, water backscattering, near-nadir

Abstract: In the current context of global warming, identifying and monitoring in real time the surface freshwater resources (essential for drinking water), understanding the mesoscale and subscale mechanisms of oceanic surface currents impacting the thermal regulation of the planet, ocean wave spectra are therefore of vital importance. In this thesis work, we have developed, in collaboration with CNES (within the framework of the SWOT space mission launched on 16 December 2022), the SWALIS airborne sensor. The work of this thesis has consisted in the realization and testing of the SWALIS sensor (embarked on the airborne platform of the IETR -PIMA). We dimensioned the performances of SWALIS and validated the data processing through several measurement campaigns (Monterfil, Mar-

mande). We have highlighted the land-water contrast of the backscattering coefficient, its independence as a function of altitude, and also its decreasing effect as a function of the incidence angle. As a result of this thesis, the SWALIS sensor is valid for calibration and validation operations (Cal/Val) of the SWOT mission and in the geometric configurations of SWOT (at the French Cal/Val sites of the Rhine and Mont Saint-Michel Bay).

Concerning the KaRADOC sensor, the SWALIS oceanic version that implements the SKIM concept, we have a large radar measurement database from the SUMOS campaign (Gulf of Gascogne) to be processed in order to extract the Doppler from the oceans scenes and the ocean σ_0 values in Ka band.