



HAL
open science

Extraction de hauteurs d'eau géolocalisées par interférométrie radar dans le cas de SWOT

Damien Desroches

► **To cite this version:**

Damien Desroches. Extraction de hauteurs d'eau géolocalisées par interférométrie radar dans le cas de SWOT. Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2016. Français. NNT : 2016TOU30030 . tel-01474028

HAL Id: tel-01474028

<https://theses.hal.science/tel-01474028v1>

Submitted on 22 Feb 2017

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

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Damien Desroches

le lundi 14 mars 2016

Titre :

Extraction de hauteurs d'eau géolocalisées par interférométrie radar dans le cas de SWOT

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED SDU2E : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Unité de recherche :

Collecte Localisation Satellites

Directeur/trice(s) de Thèse :

Didier Massonnet

Philippe Gaspar

Jury :

Fabio Rocca, rapporteur

Florence Tupin, rapporteur

Didier Massonnet, directeur de thèse

Benoit Laignel, examinateur

Ernesto Rodriguez, examinateur

Isabelle Dadou, examinateur

Roger Fjørtoft, co-encadrant



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Damien Desroches

le lundi 14 mars 2016

Titre :

Extraction de hauteurs d'eau géolocalisées par interférométrie radar dans le cas de SWOT

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED SDU2E : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Unité de recherche :

Collecte Localisation Satellites

Directeur/trice(s) de Thèse :

Didier Massonnet

Philippe Gaspar

Jury :

Fabio Rocca, rapporteur

Florence Tupin, rapporteur

Didier Massonnet, directeur de thèse

Benoit Laignel, examinateur

Ernesto Rodriguez, examinateur

Isabelle Dadou, examinateur

Roger Fjørtoft, co-encadrant

REMERCIEMENTS

Malgré l'indéniable caractère passionnant d'une compression en distance et du déroulement de phase d'un interférogramme, les remerciements constituent souvent la partie la plus amusante d'une thèse sur le radar. C'est aussi un exercice particulièrement dangereux et sensible, certains oublis pouvant parfois entraîner une rancune terrible. Je vais donc essayer de faire de mon mieux, et d'oublier le moins de monde possible !

Tout d'abord, je tiens à remercier tout l'équipage avec qui j'ai travaillé (et ramé !) pendant ces trois années. Au gouvernail, le vaillant capitaine Roger Fjørtoft a su mener la barque en évitant les nombreux écueils sur la route. Avec lui, mon directeur de thèse Didier Massonnet, qui ne vogue plus sur les eaux troubles du radar, mais travaille désormais à terre sur une horloge peu commune, a toujours été disponible pour me faire partager son expérience et ses conseils. A la vigie, Nadine Pourthié avec sa gentillesse et sa disponibilité, a toujours veillé à nous éviter les ennuis et les tempêtes. Enfermé à fond de cale avec moi, le marin Jean-Marc Gaudin m'a appris que, contrairement aux hommes politiques, le radar, lui, émet des signaux cohérents. Cécile Cheymol, notre maître charpentier, a soigneusement tâché de réparer régulièrement les instruments malmenés par le voyage. Du côté de CLS, le second François Soulat et le pilote Pierre Dubois ont également énormément apporté au travail mené, surfant sur la vague SWOT, ainsi que leurs partenaires catalans, Xavier Banque et Javier Duro.

Je n'oublie pas les différents maîtres d'équipage qui se sont succédés, Jean-Claude Souyris et Juliette Lambin, ni le cuisinier Alain Mallet qui a su maintenir l'équipage en forme. Le canonier, Nicolas Picot, a assuré sa fonction avec détermination. Au fond du quartier d'équipage, dans son hamac, le vieux matelot Christophe Goldstein m'a enseigné le fruit de ses nombreuses années d'expérience sur la gestion de son énergie en milieu hostile. Les quartiers maîtres Sylvie Koleck et Edith Reynaud ont veillé sur nous avec tendresse (des fois) et hurlements stridents (souvent) pour tenter de maintenir l'équipage à flot (et à jour). Je remercie également tous les marins avec qui j'ai passé de supers moments et des quarts à protéger la machine à café : Thierry Amiot, François Boy, Denis Carbonne, Philippe Durand, Thomas Grelier, Thierry Koleck, Sophie Le Gac, Jean-Luc Courrière, Alexandre Guérin, Jean-Claude Lalaurie, Raquel Rodriguez-Suquet, Claire Pottier, Cedric Tourrain, Céline Tison et Denis Blumstein. Il ne faut pas oublier tous les mousses avec qui j'ai pu travailler pendant ces années : Simon, Ané, Paul et Nicolas.

Je tiens également à remercier ma famille et tous mes amis qu'ils soient espions, résistants ou agricoles ! Un grand merci aux grimpeurs de l'ASC avec qui j'ai pu me réfugier sur une montagne quand la marée montait. Je remercie les rapporteurs de thèse Fabio Rocca, Florence Tupin qui vont devoir vaillamment lire et corriger ce manuscrit.

Je souhaite un bon courage à ceux qui vont continuer à lire à partir d'ici. A l'abordage !

RESUME

La mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography), menée par le CNES et le JPL et dont le lancement est prévu pour 2020, marque un tournant majeur pour l'altimétrie spatiale, à la fois en océanographie et en hydrologie continentale. Il s'agit de la première mission interférométrique SAR dont l'objectif spécifique est la mesure de la hauteur des eaux. L'instrument principal de la mission, KaRIn, un radar interférométrique en bande Ka, présente des caractéristiques particulières : angle de visée proche du nadir (0.6 à 3.9°), faible longueur d'onde (8.6 mm) et courte base stéréoscopique (10 m). Ces spécificités techniques entraînent des particularités propres à SWOT, à la fois en termes de phénoménologie et de traitement des données. Par ailleurs, du fait de la nature et du grand volume des données, de nouvelles méthodes de traitement sont envisagées, qui se distinguent de celles des missions interférométriques antérieures. Pour le mode « Low Rate » (LR) dédié à l'océanographie, une grande partie du traitement se déroulera à bord pour limiter le volume de données à transmettre au sol. Le mode « High Rate » (HR) visant principalement l'hydrologie continentale, présente lui aussi des originalités en termes de traitement, essentiellement réalisé au sol, de par la grande diversité de structure des surfaces d'eau qui seront observées. Pour les deux modes, la stratégie d'inversion de la phase en hauteurs géolocalisées ne peut être calquée sur celles des missions antérieures, fondées sur le déroulement spatial de la phase interférométrique. L'approche retenue est d'utiliser, autant que possible, un modèle numérique de terrain (MNT) de référence pour lever l'ambiguïté de phase et procéder directement à l'inversion de hauteur. Ceci permet à la fois de gagner en temps de traitement et de s'affranchir de l'utilisation des points de contrôle, difficiles à obtenir sur les océans comme sur les continents, du fait des variations de niveau d'eau et un rapport signal à bruit très faible sur les zones terrestres. Dans les cas où la précision du MNT de référence n'est pas suffisante pour assurer correctement le déroulement de la phase, des méthodes visant à détecter et réduire les erreurs sont proposées. Afin de faciliter l'utilisation des hauteurs géolocalisées issues de la phase l'interférométrique en mode HR, nous proposons une méthode qui permet d'améliorer considérablement la géolocalisation des produits, sans dégrader l'information de hauteur d'eau.

Mots clefs : Altimétrie, interférométrie, radar, déroulement de phase, inversion phase-hauteur, SWOT.

ABSTRACT

The SWOT mission (Surface Water and Ocean Topography), conducted by CNES and JPL, and scheduled for launch in 2020, is a major step forward for spaceborne altimetry, both for oceanography and continental hydrology. It is the first interferometric SAR mission whose specific objective is the measurement of water surface height. The main instrument of the mission, KaRIn, a Ka-band Radar Interferometer, has particular characteristics: very low incidence angle (from 0.6 to 3.9°), short wavelength (8.6 mm), and short baseline (10 m). This technical configuration leads to properties that are specific to SWOT, both in terms of phenomenology and data processing. Moreover, due to the nature and the huge volume of data, new processing methods, different from those used in previous interferometric mission, are considered. For the Low Rate (LR) mode dedicated to oceanography, a large part of the processing will take place onboard to limit the data volume transmitted to ground. The High Rate (HR) mode, mainly targeting continental hydrology, also present original characteristics in terms of processing, essentially conducted on ground, due to the large diversity in the structure of the observed water surfaces. In both modes, the strategy for conversion of phase into geolocated heights cannot be directly based on those of previous missions, relying on spatial phase unwrapping. The approach retained here is to use, as far as possible, a reference Digital Terrain Model (DTM) to remove the phase ambiguity and proceed directly to height inversion. This allows both to reduce the computing time and to avoid the need for ground control points, which are difficult to obtain both over oceans and continental surfaces, due to varying water level and very low signal-to-noise ratio over land. For cases where the precision of reference DTM is not good enough to ensure a correct phase unwrapping, methods to detect and reduce the errors are proposed. To facilitate the use of the geolocated heights derived from the interferometric phase in HR mode, we propose a method that permits to significantly improve the geolocation of the products, without degrading the water height information.

Keywords: Altimetry, interferometry, radar, phase unwrapping, phase-to-height conversion, SWOT.

SOMMAIRE

1. Introduction.....	11
2. Observation de la Terre en imagerie radar	15
2.1. Principe des systèmes radar	15
2.2. L'altimétrie radar conventionnelle	16
2.2.1. Historique de l'altimétrie	16
2.2.2. Principe de la mesure altimétrique	17
2.2.3. Technique de la mesure Altimétrique Nadir	18
2.2.4. L'altimétrie Doppler	19
2.2.5. Limitations des altimètres nadir	20
2.3. Le radar à synthèse d'ouverture (SAR).....	21
2.3.1. Historique de l'imagerie SAR.....	21
2.3.2. Principe de fonctionnement d'un radar imageur	22
2.3.3. Caractéristiques géométriques et radiométriques	24
2.3.4. Les traitements SAR	26
2.3.5. L'interférométrie SAR	34
3. Simulation et traitement bas niveau des données KaRIn/SWOT	41
3.1. Objectifs de la mission SWOT	41
3.2. Caractéristiques géométriques et radiométriques des données KaRIn.....	44
3.2.1. Caractéristiques géométriques	44
3.2.2. Caractéristiques radiométriques	45
3.2.3. Acquisitions aéroportées	46
3.3. Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT.....	47
3.3.1. Objectifs des simulateurs bas niveaux	48

3.3.2.	Développement du simulateur SWOT de la thèse	49
3.4.	Traitement InSAR des données KaRIn/SWOT en mode HR.....	66
3.4.1.	Présomption.....	67
3.4.2.	Le traitement SAR	69
3.4.3.	Génération des produits interférométriques	76
3.4.4.	Procédé multivue en azimut	76
3.4.5.	Correction des délais de propagation atmosphérique.....	77
3.4.6.	Détection des surfaces d'eau	77
3.5.	Le traitement bord en mode LR	82
3.5.1.	Estimation du Doppler centroïde	82
3.5.2.	Compression en distance	83
3.5.3.	Coregistration et filtrage de la bande de fréquence commune.....	83
3.5.4.	Traitement azimut non focalisé.....	84
3.5.5.	Génération des interférogrammes et moyenne kilométrique	87
3.6.	Le traitement sol en mode LR	90
4.	Extraction de hauteurs géolocalisées pour KaRIn/SWOT	93
4.1.	Déroulement de la phase en interférométrie radar	93
4.1.1.	Les méthodes locales de type «branch cut»	94
4.1.2.	Les méthodes globales : minimisation des moindres carrés.....	96
4.1.3.	Méthode utilisée dans le cas de SRTM	96
4.1.4.	Méthode utilisée dans le cas de TanDEM-X	97
4.1.5.	Utilisation des points stables ou points permanents.....	98
4.1.6.	Les limites de méthodes classiques de déroulement.....	99
4.2.	Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence.....	99
4.2.1.	Extraction de hauteurs à partir des couples TerraSAR-X/TanDEM-X.....	100
4.2.2.	Caractérisation de l'eau en imagerie SAR classique	103
4.2.3.	Etude des surfaces d'eau cohérentes et restitution des hauteurs.....	104
4.2.4.	Facteurs liés aux variations de cohérence de l'eau.....	108
4.2.5.	Etude des effets du mouvement de l'eau sur la phase	110
4.2.6.	Perspectives et applications pour SWOT	113

4.3.	Principe de restitution de hauteurs sans déroulement spatial de phase en mode HR	114
4.3.1.	Schéma général et principe de la méthode	116
4.3.2.	Génération d'un interférogramme de référence	118
4.3.3.	Présentation des résultats dans un cas idéal	119
4.4.	Estimation de hauteurs en mode LR.....	121
4.4.1.	L'inversion Phase-Hauteur : hauteur de référence et Mean Sea Surface.....	121
4.4.2.	Surface de référence et moyennage	126
4.4.3.	Biais de hauteur au near-range sur le produit moyenné	129
4.5.	Erreurs de la mesure et effet sur la restitution	130
4.5.1.	Les erreurs aléatoires dues à la décorrélation	131
4.5.2.	Réduction des erreurs aléatoires par moyennage.....	137
4.5.3.	Les erreurs dues à une méconnaissance du range	139
4.6.	Le layover.....	148
4.6.1.	Introduction	148
4.6.2.	Effet du layover dans le cas de SWOT.....	148
4.6.3.	Effet du layover dans le cas d'une simulation sur la Camargue.....	154
4.6.4.	Détection et correction des effets de layover	157
4.7.	Les erreurs de déroulement de phase	163
4.7.1.	Exemples d'erreurs rencontrées.....	163
4.7.2.	Effet combiné du bruit thermique et des erreurs de MNT de référence	168
4.8.	Amélioration des algorithmes d'inversion	169
4.8.1.	Prise en compte du masque d'eau détecté	169
4.8.2.	Prise en compte des effets de la radiométrie dans la projection.....	170
4.8.3.	Recalage de la projection par corrélation de masques	171
4.8.4.	Utilisation du gradient de hauteur sur les zones plates.....	176
5.	Géolocalisation améliorée des produits hydrologiques KaRIn/SWOT	177
5.1.	Produits hydrologiques.....	177
5.2.	Le produit pixel cloud	180
5.3.	Moyenne des phases – moyenne des hauteurs	182
5.4.	Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés	183

5.4.1.	Utilisation pour des petits lacs	185
5.4.2.	Méthode de géolocalisation améliorée des cours d'eau	188
5.4.3.	Avantages et limitations de la méthode	195
5.4.4.	Adaptation de l'algorithme aux grands lacs	199
5.4.5.	Exemple d'utilisation sur la Seine	199
5.4.6.	Méthode de géolocalisation par maximum a posteriori	203
6.	Exemple de produits KaRIn/SWOT HR et LR sur un site côtier	207
6.1.	Etude du mode HR.....	207
6.2.	Etude du mode LR	211
7.	Conclusions et perspectives.....	217
	BIBLIOGRAPHIE	223
	GLOSSAIRE	233

1. INTRODUCTION

La gestion des ressources en eau de notre planète est un enjeu majeur pour la communauté scientifique. La Terre est recouverte à 70% d'eau et son atmosphère en constitue également un important réservoir. Malgré cela, la répartition de l'eau est inégale, et seule une faible partie est potable et directement disponible à la consommation. Les quatre grands réservoirs d'eau de notre planète sont les océans, les surfaces d'eau continentales, l'atmosphère et la biosphère [Mars-1995]. Ces réserves sont aujourd'hui mesurables et quantifiables à grande échelle. Toutefois, elles ne sont pas figées, et entre les différents réservoirs, les échanges sont permanents, formant le cycle de l'eau. Ce cycle assure le renouvellement des stocks d'eau potable et constitue le moteur de la vie humaine. Cependant, les transferts entre réservoirs ne sont pas constants, les temps de renouvellement des nappes phréatiques variant de manière importante, de quelques jours à des dizaines d'années suivant les régions. La gestion des ressources en eau est un enjeu vital pour les populations de certaines régions arides de la planète, où le renouvellement est lent et les réserves diminuent. Catastrophes humanitaires et conflits militaires pour la gestion des ressources en eau sont chaque jour un rappel tragique de l'importance de cette ressource pour les hommes. L'observation des étendues d'eau est primordiale pour étudier et comprendre les différents mécanismes mis en jeu. Pour cela, les mesures in situ permettent des observations continues et précises, mais avec une couverture très limitée. Ces mesures ponctuelles apportent des informations localisées sur certaines régions et permettent de comprendre de nombreux phénomènes, mais seuls des systèmes d'observation spatiaux sont en mesure d'assurer une surveillance globale des océans et des eaux continentales. C'est dans ce cadre qu'est apparue l'altimétrie spatiale, qui permet aujourd'hui de mesurer précisément les niveaux d'eau des océans et de produire des cartes de topographie océanique [Case-2000]. L'innovation des techniques altimétriques, de l'altimètre nadir conventionnel à l'altimètre SAR/Doppler, a assuré de nombreuses avancées dans le domaine de l'océanographie. Technologiquement, l'évolution des bandes de fréquences utilisées, des bandes S, C et Ku vers la bande Ka, a permis d'affiner la précision et la résolution des altimètres et de réduire les effets de décorrélation des échos, ainsi que les effets des perturbations ionosphériques, et d'approfondir ainsi la connaissance des océans. En particulier, ces mesures de précision élevée sont un outil précieux en climatologie et dans l'étude et la compréhension des milieux marins. Les océanographes étudient les variations de divers paramètres des océans tels que les courants marins, les vagues ou la salinité afin de comprendre les interdépendances entre la physique de l'océan et son écosystème. L'étude des surfaces d'eau continentales, l'hydrologie, joue également un rôle majeur dans la compréhension du cycle de l'eau. Les hydrologues étudient en particulier les variations des stocks en eau à travers l'élévation, le débit et la masse totale. L'utilisation des données multi-temporelles des imageurs permet d'obtenir des séries temporelles sur les différents cours d'eau, afin d'étudier leurs variations d'étendue sur des échelles

allant de quelques mois à plusieurs dizaines d'années. Dans le cadre de l'observation des surfaces d'eau à l'échelle globale et avec une revisite élevée, le projet SWOT (Surface Water and Ocean Topography), mené par le CNES et le JPL, est une mission d'altimétrie large fauchée visant à acquérir des données à la fois sur les océans et sur les surfaces d'eau continentales. Les deux communautés scientifiques impliquées, océanographes et hydrologues, travaillent ensemble pour porter cette mission aux multiples enjeux. Pour obtenir la qualité souhaitée des produits SWOT, il est nécessaire de porter un soin particulier au traitement des mesures KaRIn, et c'est dans ce contexte que le projet de recherche de ce doctorat s'inscrit. Au démarrage des travaux, des données provenant de campagnes AirSWOT étaient anticipées, mais les aléas techniques et le manque de représentativité de cette mesure aéroportée ont de facto limité leur utilisation. En l'absence donc de données représentatives de la physique de la mesure de SWOT, le développement de stratégies de traitement appropriées nécessite de s'attaquer simultanément à la problématique de la simulation de la mesure elle-même, et à son inversion en paramètres géophysiques. Nous présentons ci-dessous l'organisation de ce mémoire.

Le chapitre 2 de la thèse présentera une synthèse bibliographique des différents domaines liés à l'observation radar. Le fonctionnement des systèmes radar et des altimètres y sera rappelé, ainsi qu'un historique des différentes missions réalisées et l'évolution qui a mené au nouveau concept d'altimétrie large fauchée pour l'observation des surfaces d'eau. Les différentes méthodes de mesure et de traitement liées à l'altimétrie conventionnelle et au système radar imageur seront décrites. Les principes de la synthèse SAR et des traitements interférométriques seront présentés, car ils sont au cœur de la mission SWOT, et sont un enjeu majeur dans la restitution précise des hauteurs d'eau sur laquelle porte cette thèse.

Le chapitre 3 décrira la mission SWOT et les outils de simulation de données mis en œuvre dans le cadre de celle-ci. La première partie du chapitre présentera les objectifs de la mission ainsi que les caractéristiques particulières de l'instrument et de la physique de la mesure associée. En l'absence de données réelles, afin de servir de support au développement algorithmique de la mission, les différents outils de simulation prototypés durant la thèse seront présentés ainsi que les choix méthodologiques décidés afin de produire des données les plus réalistes possibles. Par la suite, les différentes chaînes de traitement étudiées et prototypées pendant la thèse seront présentées. Les spécificités de la mission entraînent une conception différente des chaînes de traitement dans les deux modes de fonctionnement océanographique et hydrologique. En particulier, dans le cas du mode océan LR (Low Rate), une partie importante du traitement est réalisée à bord, afin de limiter le volume de données à transmettre au sol. Le traitement des données continentales HR (High Rate) consiste en un traitement interférométrique SAR adapté aux spécificités techniques et phénoménologiques de la mission SWOT. Les deux chaînes de traitement seront ici décrites jusqu'aux produits focalisés et la génération des interférogrammes complexes.

Le chapitre 4, au cœur de ce manuscrit de thèse, sera consacré à la suite des traitements, et plus particulièrement à la restitution des produits de hauteurs géolocalisées. Nous verrons comment les spécificités de la mission se répercutent dans les différentes méthodologies de traitement. En particulier, le déroulement de la phase et son inversion en hauteurs seront analysés et décrits. Les différentes méthodes d'inversion de phase des missions passées, en particulier dans le cadre des missions d'interférométrie radar SRTM et TanDEM-X seront présentées. En raison des spécificités de la mission SWOT, notamment ses caractéristiques géométriques et son SNR très faible, nous développerons une approche différente des algorithmes classiques. Une méthode spécifique d'inversion phase-hauteur pour SWOT, testée sur des données TanDEM-X et des données simulées SWOT, sera présentée et analysée. L'objectif de ce chapitre est d'étudier la faisabilité de cette approche et sa robustesse aux situations rencontrées au cours de la mission. Différentes améliorations visant à réduire les erreurs liées à cette méthode de déroulement seront décrites. Les spécificités dans la restitution de hauteur pour le mode océan seront développées. Les aspects liés à la performance de la mesure de hauteurs et au budget d'erreur de la mission seront détaillés, ainsi que les effets liés au fort layover des zones terrestres sur les surfaces d'eau. Ce chapitre présentera une continuité avec les simulations et la chaîne de traitement décrites dans le chapitre précédent. L'objectif est d'aboutir à un prototype simulateur-traitement « end-to-end » visant à assurer une validation des performances des algorithmes développés.

Dans le chapitre 5, nous présenterons brièvement les différents produits hydrologiques issus de SWOT. Parmi eux, le produit de plus bas niveau est le « pixel cloud », une représentation 3D des pixels d'eau directement issus du traitement interférométrique de KaRIn/SWOT. Ce nuage de points est très bruité, en raison des caractéristiques instrumentales de SWOT, en particulier le bruit thermique. Ce caractère bruité de la donnée rend difficile l'estimation des paramètres hydrologiques tels que la hauteur moyenne, la pente et l'étendue des surfaces d'eau. L'objectif sera ici de définir et décrire des méthodes visant à moyenniser de manière réaliste les produits SWOT afin de générer des mesures adaptées aux besoins des hydrologues. Une méthode développée durant la thèse visant à améliorer la géolocalisation des produits de hauteurs sera présentée et illustrée sur différents cas de simulations de rivières ou de lacs.

Le chapitre 6 sera une étude d'un cas de simulation de l'estuaire de l'embouchure de la Seine. Les méthodes de simulations et de traitements étudiées et développées durant la thèse seront mises en application sur ce cas test. L'objectif sera d'illustrer le traitement complet, de la simulation de la scène à partir du MNT jusqu'à la restitution de hauteurs, à la fois avec les traitements hydrologiques (HR) et océanographiques (LR). En effet, ces zones côtières présenteront la spécificité de pouvoir être étudiées par les deux modes de traitement durant la mission. Les spécificités des résultats obtenus avec les deux modes de fonctionnement seront décrites.

Le chapitre 7 conclura le manuscrit en établissant un bilan du travail réalisé et des futures perspectives ouvertes par ces trois années de thèse.

2. OBSERVATION DE LA TERRE EN IMAGERIE RADAR

L'objectif de ce chapitre est de présenter le contexte de la thèse, en développant les aspects généraux liés au traitement radar.

2.1. PRINCIPE DES SYSTEMES RADAR

Le radar (Radio Detection and Ranging) est un instrument de télédétection par ondes électromagnétiques. A partir des études de J.C. Maxwell et de H.R. Hertz sur la propagation des ondes magnétiques au XIXème siècle, l'ingénieur allemand C. Hülsmeier développe le premier instrument radar qui mesure le temps de trajet d'une onde électromagnétique. Durant la première moitié du XXème siècle, les applications furent principalement militaires et avaient pour objectif la détection de cibles. En 1935, le premier radar français est embarqué sur le paquebot Normandie, afin de détecter les obstacles tels que les icebergs. De nombreuses applications ont ensuite été développées avec les augmentations de la résolution et de la couverture des instruments.

Les systèmes radar émettent une onde à intervalle régulier et recueillent le rayonnement retourné par la surface avec laquelle elle interagit. Suivant les instruments, différentes informations sont utilisées selon les objectifs des missions associées. L'amplitude du signal permet de mesurer la puissance de la réponse de l'objet et d'obtenir des informations sur les caractéristiques physiques de la cible ou du milieu observé. La phase du signal reçu par le radar peut également dans certains cas être exploitée pour en extraire des informations géométriques. Le radar imageur est un système actif et cohérent qui utilise sa propre source de rayonnement. Contrairement aux instruments optiques, les instruments radar sont utilisables de jour comme de nuit, et dans la plupart des conditions météorologiques et atmosphériques, permettant une couverture robuste et complète.

2.2. L'ALTIMETRIE RADAR CONVENTIONNELLE

Cette partie décrit le principe de la mesure des altimètres radar, de l'altimétrie nadir conventionnelle à son évolution vers l'altimétrie SAR/Doppler.

2.2.1. HISTORIQUE DE L'ALTIMETRIE

En 1978, la mission SEASAT est la première mission radar d'observation océanographique développée par la NASA [Elac-1980]. Elle est suivie en 1985 par le lancement du satellite Geosat. Ces missions seront les précurseurs de la mission conjointe CNES/NASA Topex/Poseidon lancée en 1992. Ses successeurs, les satellites Jason 1 [Mena-2003] et 2 [Lamb-2012] lancés respectivement en 2001 et 2008, poursuivront l'étude de l'observation des océans. Ces missions utiliseront notamment le système DORIS [Jayl-2002], composé de balises installées sur les terres émergées et qui permet de mesurer l'orbite de l'instrument de manière précise. Le lancement de Jason 3 est quant à lui prévu pour janvier 2016. En 2013, Saral, embarquant les instruments Argos et AltiKa, est la première mission altimétrique en bande Ka [Vinc-2006] [Rich-2008]. Elle assure la continuité des mesures altimétriques, et démontre également les capacités des premières mesures en bande Ka. L'évolution des performances instrumentales et de traitements permettent l'étude plus approfondie des zones côtières [Cipo-2014] et de la glace de mer. La Figure 1 présente l'évolution de la performance de la mesure au cours du développement de l'altimétrie. Elle est en majeure partie due à la réduction des erreurs sur l'orbite, qui a permis d'atteindre une précision de l'ordre de quelques centimètres. Topex est ainsi la première mission altimétrique à passer en dessous de la variabilité océanique (environ 10 cm) [Feno-2000]. Respectivement en 2003 et 2010, les missions altimétriques ICESat et CryoSat ont permis d'analyser l'évolution des glaces polaires sur la Terre.

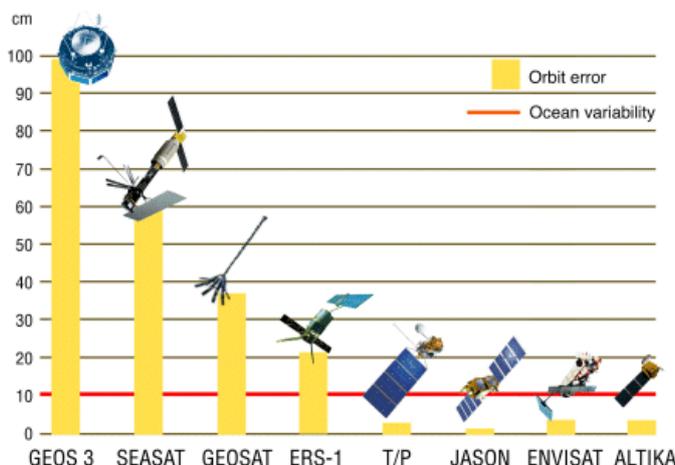


Figure 1 : Evolution des performances de mesures de hauteur des océans des différentes missions altimétriques [Aviso]

2.2.2. PRINCIPE DE LA MESURE ALTIMETRIQUE

Un satellite d'altimétrie nadir conventionnelle présenté sur la Figure 2 est composé de deux charges utiles. L'instrument principal, l'altimètre, utilise l'émission d'une onde radar à haute fréquence à la verticale sur la surface mesurée (généralement les océans) pour déduire, à partir du temps de trajet aller-retour de l'onde électromagnétique, la distance radar-surface. Un second système permet de localiser avec une haute précision la position du satellite le long de son orbite (système Doris, GPS, laser). La différence entre la position sur l'orbite et la mesure du trajet permet de mesurer la hauteur du niveau de la mer. La fréquence utilisée est dans la gamme des micro-ondes : bandes C (≈ 1 GHz), S (≈ 3 GHz), Ku (≈ 15 GHz) et bande Ka (≈ 36 GHz).

La mesure de la hauteur des surfaces d'eau, appelée SSH (Sea Surface Height) est calculée à partir de l'ellipsoïde de référence. La SSH peut être séparée en deux contributions : le niveau moyen de la mer en l'absence de perturbation est appelé géoïde de référence, tandis que la circulation dynamique de l'océan, qui peut varier fortement entre les acquisitions est la SLA (Sea Level Anomaly).

La connaissance de la distance altimétrique à partir de la mesure doit également être corrigée de différents effets, notamment les effets de propagation atmosphérique qui provoquent un ralentissement de l'onde. Dans le cas de l'ionosphère, cette correction peut être faite en utilisant deux fréquences d'émission différentes (Ku et C par exemple) afin de déterminer le biais de mesure induit par l'ionosphère, celui-ci étant différent suivant la longueur d'onde utilisée. Le biais lié à la traversée de la troposphère peut lui être corrigé en utilisant des modèles météorologiques, ou en embarquant à bord du satellite un radiomètre [Chel-2001].

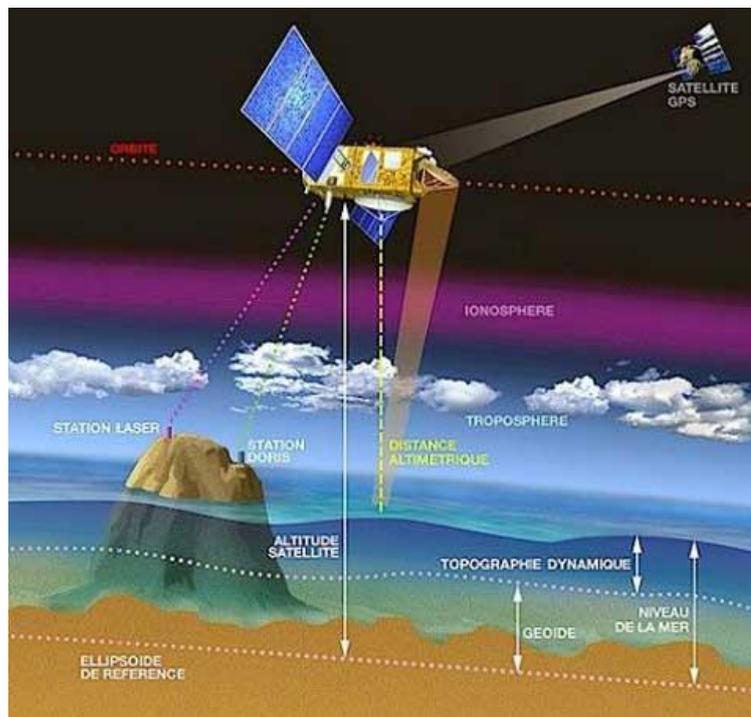


Figure 2 : Schéma de principe de la mesure altimétrique [Aviso]

2.2.3. TECHNIQUE DE LA MESURE ALTIMETRIQUE NADIR

Le signal acquis par l'altimètre lors du retour de l'onde réfléchi par la surface d'eau est appelé « forme d'onde », et c'est l'analyse de celle-ci qui permet de réaliser la mesure altimétrique. L'évolution de cette forme d'onde illustrée sur la Figure 3 représente l'amplitude du signal reçu par le satellite au cours du temps, après l'envoi d'une d'impulsion. Dans le cas des surfaces océaniques, des modèles analytiques représentant l'interaction de l'onde avec la surface à partir des propriétés statistiques de celle-ci, tel que le modèle de Brown [Brow-1977], permettent de modéliser la forme d'onde altimétrique à partir de quatre paramètres : la distance altimètre-surface, la hauteur moyenne des vagues, le vent de surface (qui contraint la rugosité de la surface d'eau), et le dépointage d'antenne par rapport au nadir. Dans le cas de surfaces d'eau côtières ou continentales, la surface vue par le radar est un composite de terres et océan, une description analytique de l'interaction du signal radar avec la surface devient alors très difficile.

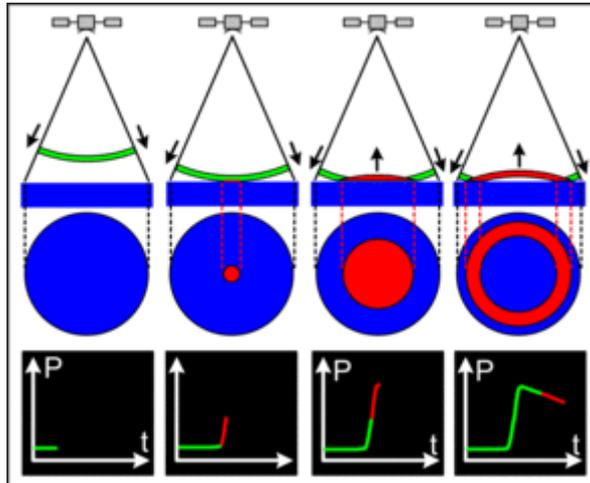


Figure 3 : Schéma représentant la génération de la forme d'onde lors d'une mesure altimétrique [Aviso]. L'impulsion émise est assimilée à un Dirac, et interagit progressivement avec les facettes de la surface d'eau rencontrées par le front d'onde.

En pratique, les signaux sont bruités par un effet de speckle et doivent être moyennés pour pouvoir obtenir une forme d'onde exploitable. L'étape suivante du traitement est appelée « retracking », il s'agit d'une inversion de la forme d'onde pour obtenir les paramètres géophysiques recherchés. Différentes techniques d'inversion existent, la principale, utilisée actuellement pour les missions Jason-2, AltiKa, Hy-2 et Cryosat est une inversion itérative du modèle de Brown sur le critère d'un maximum de vraisemblance [Amar-2004]. On citera aussi des techniques plus avancées comme le retracking dit « numérique ».

La Figure 4 montre comment à partir d'une forme d'onde océanique suivant un modèle de Brown, on peut déterminer plusieurs paramètres d'intérêt géophysique ou instrumental :

2.2 L'altimétrie radar conventionnelle

- Le principal paramètre recherché, le milieu du front de montée, permet d'obtenir le temps de trajet de l'onde et de calculer la distance parcourue et ainsi le niveau de la mer.
- La pente du front de montée caractérise la hauteur des vagues.
- L'amplitude à l'origine et l'amplitude totale permettent de caractériser le niveau de bruit thermique ainsi que celui du signal propre.
- Le dépointage apparent de l'antenne.

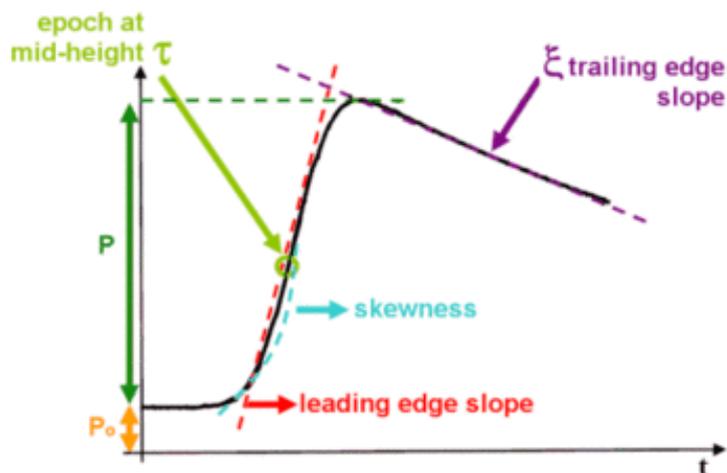


Figure 4 : Paramètres estimés à partir de l'étude d'une forme d'onde [Aviso]

2.2.4. L'ALTIMETRIE DOPPLER

L'altimétrie SAR/Doppler [Rane-1998] [Hali-2013] est une nouvelle technique altimétrique qui a pour objectif principal d'améliorer la résolution le long de la trace et de réduire le bruit de mesure, en exploitant le déplacement du satellite qui induit un effet Doppler sur les signaux renvoyés par les différents points le long de la trace, chaque point étant vu par plusieurs échos successifs. Moyennant une fréquence d'émission des pulse plus élevée, il est possible d'effectuer un traitement de synthèse SAR le long de la trace. On peut ainsi atteindre une résolution élémentaire de l'ordre de la centaine de mètres en discriminant la scène en faisceau azimut. De plus, un traitement de multivue (moyenne de signaux incohérents) effectué en moyennant la même surface vue à différents angles de vues (stacking) assure une réduction du bruit de mesure et une meilleure précision lors du retracking.

2.2.5. LIMITATIONS DES ALTIMETRES NADIR

La première limitation [Enro-1996] des altimètres classiques conventionnels est la faible couverture spatiale, puisque la mesure est essentiellement monodimensionnelle. Pour la mission Topex/Poseidon, la distance entre deux traces du satellite est d'environ 150 km à l'équateur, et deux traces adjacentes ne sont acquises qu'à trois jours d'intervalle. Cette couverture spatio-temporelle est un facteur limitant dans l'étude de certains phénomènes méso-échelle (50 km / 10 jours). La combinaison de plusieurs missions préalablement inter-étalonnées permet de reconstituer à l'échelle globale des champs 2D de topographie de surface sur des échelles caractéristiques de l'ordre de 300 km en spatial et un mois en temporel [Aviso].

La deuxième limitation provient de la résolution spatiale intrinsèque d'une mesure élémentaire : chaque forme d'onde provient d'une « tache au sol » de l'ordre de 3 km en diamètre (selon l'ouverture d'antenne, mais aussi l'état de mer), et le bruit résiduel à l'issue du retracking nécessite de moyennner encore les mesures sur typiquement 10 km. Cette résolution effective engendre en particulier une corruption des échos altimétriques en zone côtière du fait de perturbation des signaux par le retour des surfaces terrestres [Gomm-2011].

Pour ces raisons, un concept de mission d'altimétrie large fauchée, utilisant l'interférométrie radar a été proposé [Rodr-1999]. L'objectif est de concevoir une mission d'observation novatrice de la topographie des surfaces océaniques à partir d'imageurs interférométriques [Enro-2007], ce qui assurerait simultanément fauchée, résolution spatiale et précision. Le premier concept de mission sur ce principe, WSOA (Wide Swath Ocean Altimetry) a été étudié comme passager démonstrateur sur la mission Jason-2 mais abandonné en 2004. Le projet Water Elevation Recovery (WatER) [Alsd-2007] proposé pour l'hydrologie continentale à l'Agence Spatiale Européenne (ESA), également abandonné suite à la consultation « Earth Explorer 8 » en 2007, a évolué vers une idée de mission hybride alliant observations océaniques et continentales, WATER6HM proposée au National Research Council Decadal Survey en 2007. La mission Surface Water and Ocean Topography, retenue comme une priorité tant du Decadal Survey américain que du séminaire de prospective du CNES en 2008, est ainsi l'héritière de ces projets, et permettra d'assurer une couverture spatiale étendue (Figure 5) pour l'observation des surfaces d'eau.

2.2 L'altimétrie radar conventionnelle

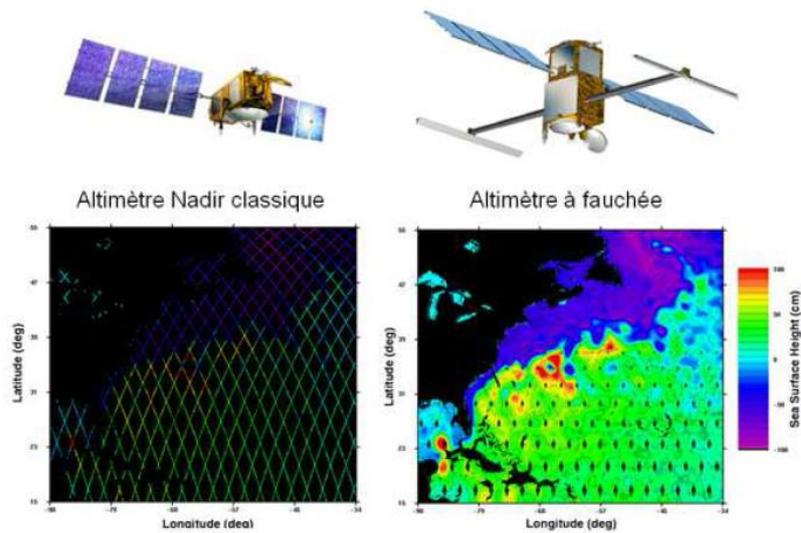


Figure 5 : Comparaison des couvertures spatiales entre un altimètre nadir conventionnel et un altimètre large-fauchée [Aviso]

2.3. LE RADAR A SYNTHESE D'OUVERTURE (SAR)

2.3.1. HISTORIQUE DE L'IMAGERIE SAR

Après la seconde guerre mondiale, les premiers concepts d'imagerie radar apparaissent. En effet, si les premiers instruments radar étaient adaptés à la détection de cibles comme des bateaux ou des avions, la résolution nécessaire à l'imagerie entraîne des contraintes de dimensionnement des antennes insurmontables. Carl Wiley développe, dans les années 50, le Radar à Ouverture Synthétique (RSO ou SAR pour Synthetic Aperture Radar) qui permet d'obtenir des résolutions très fines. Le Radar à visée latérale [Lebe-1990] développé en 1950 est un système aéroporté qui permet l'acquisition d'images des surfaces terrestres. Afin d'augmenter la couverture spatiale, les premiers concepts de porteurs satellitaires voient le jour. Dans le domaine de l'observation des surfaces terrestres, les missions américaines SEASAT (1978), SIR A (1981), SIR B (1984) et SIR C (1994), et ERS-1 (1991) en Europe, ont permis d'obtenir de nombreuses informations sur la géologie, l'écologie et l'hydrologie des surfaces observées et permettent l'acquisition des premiers couples interférométriques. ERS-1 débute l'étude précise des déplacements tectoniques [Mass-1993], après des démonstrations technologiques [Prat-1990]. Il est suivi en 1995 par son jumeau ERS-2 lancé sur la même orbite. En 2000, la mission SRTM [Wern-2000], utilisera 11 jours d'acquisitions à bord de la navette spatiale Endeavour pour cartographier une large partie des surfaces terrestres. L'instrument présentant deux parties, chacune équipée de deux antennes (en bande X et C) reliées par un mât de 60m, a permis de développer un modèle numérique de terrain (MNT) mondial à 30

mètres de résolution par interférométrie simultanée. Au Canada, les missions RADARSAT-1 et RADARSAT-2, lancées en 1995 et 2005, ont été utilisées à l'échelle internationale pour la gestion et la surveillance des ressources maritimes et terrestres. En Allemagne, la mission TerraSAR-X (2007) [Pitz-2006] permet l'acquisition de données radar dans de nombreux modes d'acquisition, à l'échelle mondiale, offrant des possibilités d'études scientifiques variées. Son satellite jumeau, TanDEM-X (2010) [Bart-2008], permet également de développer des MNT à haute résolution par interférométrie sur les surfaces terrestres (2 mètres de précision relative de hauteur sur des mailles de 12m). De son côté, l'Agence Spatiale Italienne, avec la mission COSMO-SKYMED, dont le premier satellite a été lancé en 2007, apporte une constellation de quatre satellites embarquant un système radar SAR en bande X, permettant une excellente couverture spatiale et temporelle pour l'observation de la Terre. Les satellites Sentinel-1 de l'Agence Spatiale Européenne, dont le premier modèle est en orbite depuis 2014, assurent la continuité des missions ERS et ENVISAT dans l'observation radar.

2.3.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN RADAR IMAGEUR

Le radar à ouverture synthétique est un radar à visée latérale. De nombreux ouvrages comme celui d'Ulaby [Ulaby-1986], de Leberl [Lebe 1990], de Massonnet [Mass-2008] ou de Tupin [Tupi-2014] décrivent en détail les principes de fonctionnement des radars imageurs.

L'antenne radar émet des impulsions d'une durée T_c et reçoit une réponse rétrodiffusée provenant des cibles au sol : l'écho. Deux cibles différentes produisent une réponse décalée dans le temps. La résolution en distance δR , c'est-à-dire la capacité pour le radar à distinguer deux cibles proches est :

$$\delta R = \frac{cT_c}{2} \quad (1)$$

Où c est la vitesse de la lumière, et T_c la durée de l'impulsion

Projetée au sol, cette résolution devient :

$$r_{dist} = \frac{cT_c}{2\sin(\theta)} \quad (2)$$

Où θ est l'angle de visée du radar et r_{dist} la résolution distance au sol.

Le RSO se déplace de manière azimutale, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction d'émission des impulsions, appelé axe distance ou range, comme visible sur la Figure 6.

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

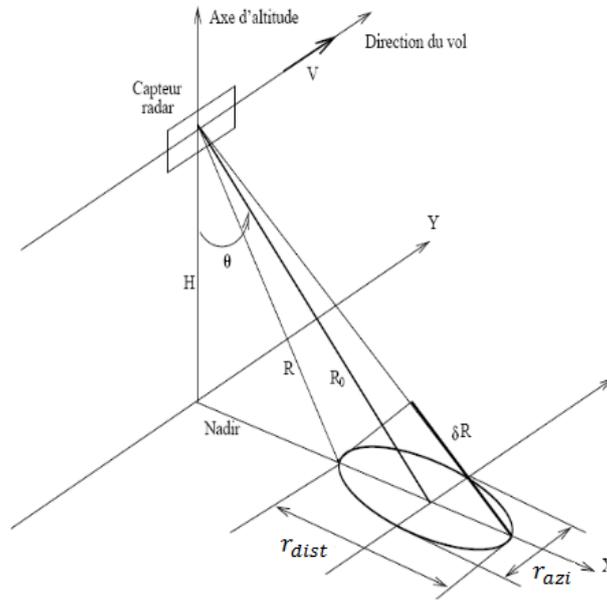


Figure 6 : Géométrie de prise de vue du radar à visée latérale

La résolution azimutale r_{azi} , sans traitement, est mauvaise et dépend de la longueur de l'antenne :

$$r_{azi} = \frac{\lambda R}{L} \quad (3)$$

Où λ est la longueur d'onde du signal et L la longueur de l'antenne et R la distance antenne-cible.

Cette résolution peut être de l'ordre de plusieurs kilomètres. L'emploi de traitements adaptés permet cependant d'améliorer la résolution : c'est le principe de la synthèse d'ouverture. Dans le cas de SWOT par exemple, les caractéristiques de l'antenne donneraient une résolution azimut et distance instrumentale de l'ordre de :

$$r_{dist} \sim \frac{3 \cdot 10^8 * 4.5 \cdot 10^{-6}}{2} \sim 625m \quad (4)$$

$$r_{azi} \sim \frac{0.0084 * 873000.}{5.} \sim 1500 m \quad (5)$$

2.3.3. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET RADIOMETRIQUES

Les images radar sont des images issues d'une projection cylindrique de l'onde sur le sol. Ceci provoque différents phénomènes géométriques à prendre en compte pour étudier et traiter les images radar. Dans l'axe azimuthal (portée proximale), la géométrie est directement reliée au déplacement de l'antenne, et n'entraîne pas de difficultés géométriques spécifiques. Dans la direction radiale (portée distale), l'échantillonnage de l'image radar présenté Figure 7 induit des déformations géométriques spécifiques :

- Les pentes orientées vers le radar apparaissent compressées dans l'image, tandis que celles orientées dans l'autre sens sont allongées. Ces zones apparaissent respectivement comme brillantes et sombres dans l'image, et rendent parfois l'exploitation directe des images radar difficile (points C et D).
- Dans le cas de fortes pentes, des phénomènes de repliement (layover) apparaissent, le sommet d'un bâtiment étant par exemple vu avant sa base par le radar. Il s'agit d'un cas extrême de compression, où les points du sommet d'une structure sont à une distance au radar inférieure à ceux de sa base (points B et E).
- Des phénomènes d'ombre peuvent également apparaître à cause d'obstacles ou d'effets de pente trop importants qui empêchent l'onde radar d'interagir avec certaines zones géographiques (point F).

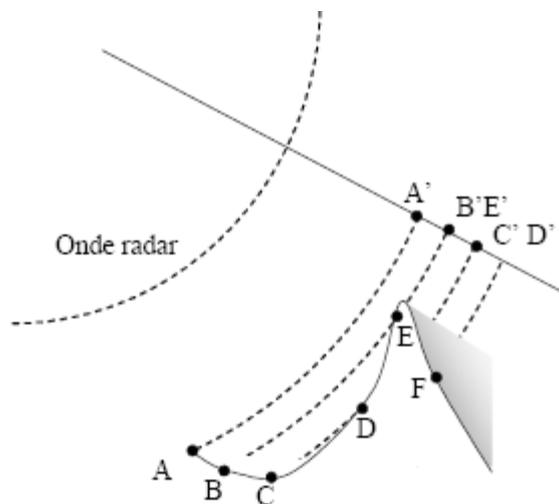


Figure 7 : Caractérisation de la géométrie d'acquisition radar, projection cylindrique de l'onde sur la sol

Malgré cela, les nombreux avantages liés à ces géométries d'acquisition particulières ainsi que les caractéristiques de pénétration des ondes radar, à la fois dans le couvert nuageux, mais également dans le couvert végétal, offrent de nombreuses possibilités d'applications.

Les images radar sont caractérisées par leur intensité et leur phase. On peut définir la réponse d'une cellule de résolution interagissant avec l'onde comme la superposition de signaux élémentaires indépendants :

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

$$S = \sum a_i e^{i\varphi_i} = A e^{i\varphi} \quad (6)$$

Où a_i et φ_i sont l'amplitude et la phase élémentaire du contributeur, A l'amplitude du pixel complexe S et φ la phase du pixel complexe S .

Dans le cas où le nombre de contributions élémentaires est suffisamment important ($N > 12$) [Good-1976], et sous l'hypothèse d'indépendance de l'amplitude et de la phase des signaux, on obtient un signal centré gaussien complexe circulaire de variance σ^2 proportionnelle à la rétrodiffusion du signal [Lebe-1990]. C'est un modèle dit de speckle entièrement développé. L'intensité suit alors une loi exponentielle, l'amplitude une loi de Rayleigh et la phase une loi uniforme, dont les densités de probabilités de l'amplitude, de l'intensité et de la phase sont :

$$P_A(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad A \geq 0 \quad (7)$$

$$P_I(x) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{x}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

$$P_\varphi(x) = \frac{1}{2\pi} \quad (9)$$

On peut alors caractériser nos images comme étant affectées d'un bruit de speckle multiplicatif. Le rapport entre la variance et l'intensité de l'image vaut alors 1 pour une image mono-vue : plus la radiométrie (et donc l'intensité) est forte, plus les fluctuations du signal sont importantes. Une manière possible de réduire le bruit de speckle est une moyenne spatiale de l'image, mais cela conduit à réduire la résolution. Pour réduire ce speckle sans dégrader la résolution, on peut procéder à des multi-vues en moyennant plusieurs acquisitions, ou bien pratiquer des opérations de filtrage de speckle. [Fros-1982] [Lee-1986] [Kuan-1987] [Wu-1992].

L'intensité des images radar est une représentation caractéristique de la radiométrie du milieu observé et des paramètres instrumentaux. Malgré son caractère bruité, il est possible d'exploiter cette information dans différentes applications, de manière indépendante ou avec d'autres acquisitions (optiques, cartographique, etc.). La surveillance agricole et celle des défrichements, le suivi des inondations ou des marées noires, font partie des exploitations possibles des images d'intensité radar.

L'information de phase d'une image radar n'est généralement pas directement exploitable, en raison de son caractère aléatoire. Des techniques exploitant la différence de phases entre plusieurs images sont décrites par la suite dans la section 2.3.5.

2.3.4. LES TRAITEMENTS SAR

2.3.4.1. LE TRAITEMENT EN DISTANCE

Sous certaines hypothèses lors de l'acquisition radar, telles que la linéarité de la rétrodiffusion et de la propagation, on peut supposer l'existence d'une réponse impulsionnelle $h(t)$ d'une cible [Mass-2008]. La propagation dans un milieu linéaire permet de modéliser ces effets comme un simple retard $\delta\left(t - \frac{r}{c}\right)$ à la fois durant les trajets aller-retour de l'onde. On note s_e le signal émis. On peut ainsi modéliser le signal reçu s_r comme le produit de convolution suivant :

$$s_r(t) = h(t) * \delta\left(t - \frac{2R}{c}\right) * s_e(t) \quad (10)$$

Dans le cas général, sans traitement particulier, on voit alors apparaître l'intervalle de temps minimum nécessaire à la séparation de deux cibles proches d'une distance δR , qui nous donne ensuite la résolution de l'instrument en distance. :

$$\delta t = \frac{2 \delta R}{c} \quad (11)$$

Différents traitements sont employés afin d'améliorer la résolution. La résolution en distance, dans la direction perpendiculaire à la trace du satellite, dépend de la durée de l'impulsion. Pour l'améliorer, il faut diminuer la durée d'impulsion, tout en conservant une énergie suffisamment forte pour la distinguer du bruit instrumental. Les limitations instrumentales en termes de puissance émise font qu'il n'est en général pas possible d'émettre un signal très court tout en gardant l'énergie nécessaire. On utilise donc une technique de modulation du signal, qui avec un traitement adapté, permet d'augmenter fortement la résolution des produits, tout en conservant une puissance émise réaliste.

Le traitement utilisé en distance est appelé compression d'impulsions. L'impulsion émise par l'antenne n'est pas mono fréquentielle mais modulée en fréquence, et caractérisée par une largeur de bande B appelée Chirp définie comme étant :

$$B = KT_c \quad (12)$$

Où T_c est la durée de l'impulsion et K le taux de modulation de fréquence

La fréquence de l'impulsion émise est bornée entre $f_0 - \frac{KT_c}{2}$ et $f_0 + \frac{KT_c}{2}$ tel que :

$$f = f_0 + Kt \quad t \in \left[-\frac{T_c}{2}, \frac{T_c}{2}\right] \quad (13)$$

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Le signal modulé en fréquence associé s'écrit :

$$s_e(t) = A e^{2j\pi\left(f_0 t + \frac{Kt^2}{2}\right)} \Pi\left(\frac{t}{T_c}\right) \quad (14)$$

Pour pouvoir développer cette équation, il faut transformer cette expression dans le domaine de Fourier. Le développement après simplification de l'expression de $S_e(f)$ donne :

$$S_e(f) = A_0 e^{-\frac{j\pi(f-f_0)^2}{K}} \sqrt{\frac{j}{K}} \Pi\left(\frac{f-f_0}{KT_c}\right) \quad (15)$$

On utilise alors un filtrage adapté, en multipliant le signal $s_e(t)$ par sa réplique $s_e^*(-t)$, ce qui nous donne :

$$S_e(f) \cdot S_e^*(-f) = A_0^2 \frac{1}{K} \Pi\left(\frac{f}{KT_c}\right) \quad (16)$$

En repassant dans le domaine temporel, on obtient :

$$s_e(t) \cdot s_e^*(-t) = A_0^2 T_c \frac{\sin(\pi K T_c t)}{\pi K T_c t} = A_0^2 T_c \text{sinc}(\pi B t) \quad (17)$$

En développant ensuite sur le signal total après filtrage adapté $s_{r_{filt}}$, on obtient :

$$s_{r_{filt}} = s_e^*(-t) * \left(h(t) * \delta\left(t - \frac{2R}{c}\right) * s_e(t) \right) \quad (18)$$

$$s_{r_{filt}} = A_0^2 T_c \text{sinc}(\pi B t) * \left(h(t) * \delta\left(t - \frac{2R}{c}\right) \right) \quad (19)$$

On a ainsi transformé notre temps d'émission T_c contraint par l'instrument, par un temps équivalent plus court T_c' , obtenu par traitement du signal, et tel que $T_c' = 1/B$, permettant ainsi d'atteindre de meilleures résolutions en distance.

La nouvelle résolution distance (2) est ainsi indépendante du temps d'impulsion, et peut s'écrire :

$$r_{dist} = \frac{c}{2B \sin(\theta)} \quad (20)$$

Cette méthode est appelée compression d'impulsion et permet d'obtenir une résolution plusieurs ordres de grandeur plus faible que celle déterminée par la durée du signal émis.

2.3.4.2. LE TRAITEMENT AZIMUT RANGE-DOPPLER

Le traitement SAR ou RSO azimut consiste à recombinaison en phase les différents échos successifs acquis par le radar au cours de son déplacement azimutal. La même cible est observée par le radar à une série d'instantanés de son parcours (Figure 8). L'information en amplitude de chaque cible est présente dans chaque écho mais la phase varie en raison de la variation de distance entre le satellite et la cible. La connaissance de cette variation de phase, que ce soit à partir d'hypothèses de stabilité balistique dans le cas des radars spatiaux, ou bien grâce à la restitution fine des trajectoires des antennes dans le cas de l'aéroporté, permet de synthétiser une antenne équivalente de grande taille et d'améliorer fortement la résolution azimut.

On note T_{ill} , le temps d'illumination d'une cible par l'antenne. Si l'on considère une cible au sol, celle-ci est vue au cours du déplacement du satellite entre les temps T_0 et $T_0 + T_{ill}$. Soit P la cible au sol (Figure 9), de coordonnées (x_p, y_p, z_p) observée par le satellite situé à la position S (x_s, y_s, z_s) . La distance cible-satellite $R(t)$ s'exprime ainsi :

$$R(t) = \sqrt{(x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2 + (z_p - z_s)^2} \quad (21)$$

$$R(t) = \sqrt{\Delta x^2 + R_0^2 + 2\Delta x(x_0 - x_p)} \quad (22)$$

Où R_0 est la distance antenne-cible au plus proche (Doppler 0), et Δx la distance entre la position de l'orbite au plus proche S_0 est la position S.

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

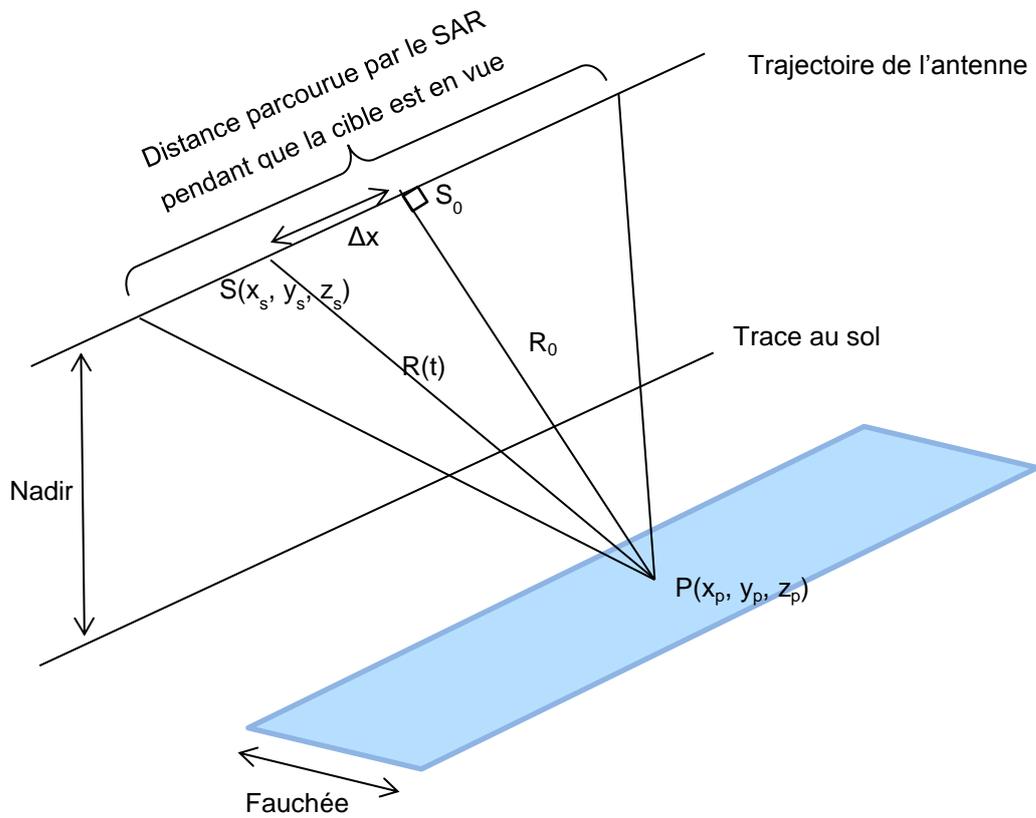


Figure 8 : Schéma de principe du traitement de synthèse SAR

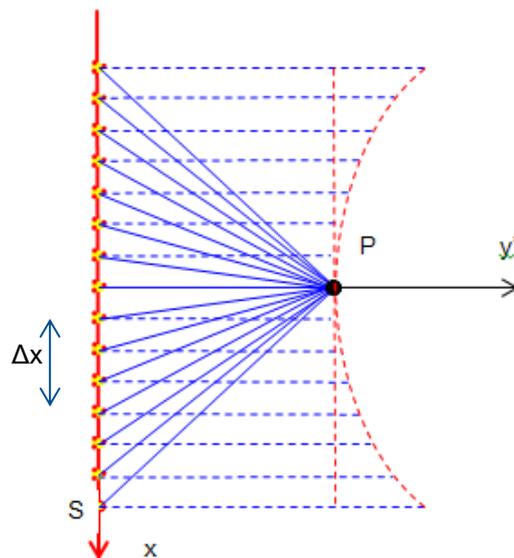


Figure 9 : Représentation de la géométrie d'acquisition en azimut. Au cours de l'illumination de la cible par le SAR, la distance cible-antenne décrit une parabole

Si l'on considère que notre cible est au centre de l'empreinte du diagramme d'antenne, on dit que l'on traite à Doppler 0, et on peut simplifier le trajet parcouru ainsi :

$$R(t) = \sqrt{\Delta x^2 + R_0^2} \quad (23)$$

En considérant R_0 grand devant le déplacement Δx , typiquement dans le cas de SWOT, R_0 vaut environ 891000 m et Δx environ 1000m, on obtient :

$$R(t) \approx R_0 \left(1 + \frac{\Delta x^2}{2R_0^2} \right) = R_0 + \frac{\Delta x^2}{2R_0} \quad (24)$$

On note V_{sat} la vitesse de l'antenne le long de la trajectoire, tel que $\Delta x = V_{sat}t$. On peut exprimer la phase géométrique de la cible φ au cours du déplacement du satellite comme étant :

$$\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} (2 \cdot R(t)) \quad (25)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(V_{sat}t)^2}{R_0} \quad (26)$$

Avec φ_0 la phase au plus proche, λ la longueur d'onde du signal, et t le temps d'impulsion en impulsion, échantillonné à la fréquence de la PRF (Pulse Repetition Frequency) entre $-T_a/2$ et $T_a/2$.

$$\varphi(k) = \varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(V_{sat}k)^2}{R_0 f_{PRF}^2} \quad (27)$$

Où f_{PRF} est la fréquence d'émission des impulsions radar et k le numéro d'impulsion

On voit alors que la loi de phase suit une variation quadratique similaire à la modulation en fréquence du traitement en distance. On peut alors effectuer un filtrage adapté afin de focaliser nos images.

$$\varphi(k) = \varphi_0 + \frac{\pi k^2}{N_a} \quad (28)$$

Avec N_a le taux de compression azimut tel que

$$N_a = \frac{\lambda R_0 f_{PRF}^2}{2V_{sat}^2} \quad (29)$$

En dérivant φ pour obtenir la loi de variation de la fréquence Doppler, on obtient :

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

$$f(k) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(k)}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(k)}{dk} \frac{dk}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(k)}{dk} \cdot f_{PRF} \quad (30)$$

$$f(k) = -\frac{2V_{sat}^2 k}{\lambda R_0 f_{PRF}^2} \cdot f_{PRF} = -\frac{k}{N_a} f_{PRF} \quad (31)$$

On introduit la fréquence réduite azimut $f_{r,a}$.

$$f_{r,a} = \frac{f(k)}{f_{PRF}} = -\frac{k}{N_a} \quad (32)$$

La loi de phase peut alors s'écrire :

$$\varphi(f_{r,a}) = \varphi_0' + \pi N_a f_{r,a}^2 \quad (33)$$

Dans ce cas, on obtient à partir de la loi de phase parabolique une fréquence réduite qui est approximativement, à faible Doppler, une fonction linéaire de l'impulsion (Figure 10). Dans le cas de forts Doppler, cette approximation s'éloigne de la réalité et il peut être nécessaire de dériver la loi de phase réelle pour éviter des erreurs de focalisation.

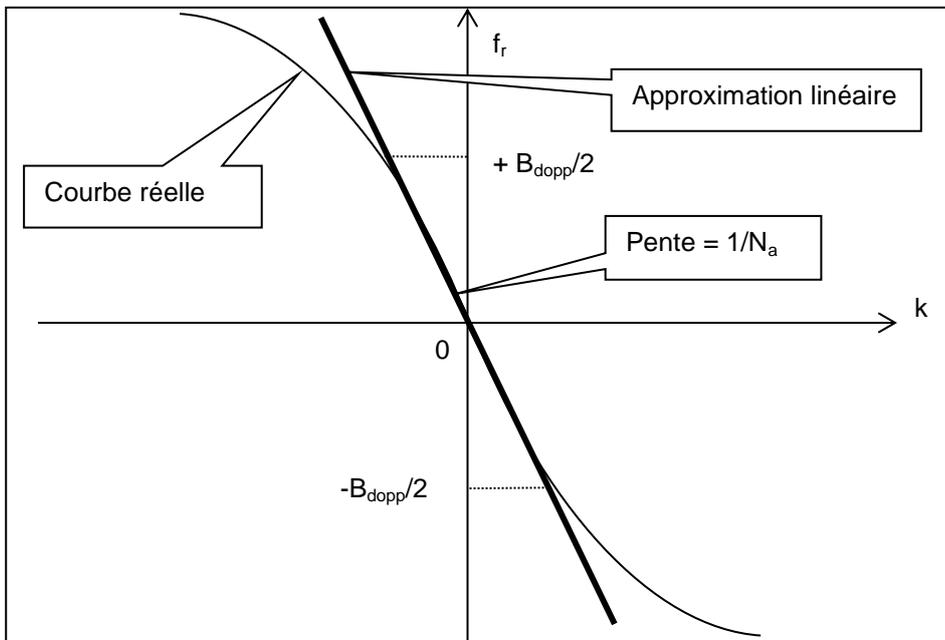


Figure 10 : Diagramme temps/fréquence décrivant l'évolution de la fréquence en fonction de l'impulsion

Différents algorithmes existent pour effectuer la synthèse azimut. Dans le cas spatial, on utilise souvent ce traitement fréquentiel. Les traitements temporels ou hybrides (Ω -K) [DePa-2009] sont en revanche plus adaptés dans le cas de trajectoires mouvementées, en particulier pour les acquisitions aéroportées.

Dans notre cas, la fréquence Doppler couvre une bande B_{dopp} tel que :

$$B_{dopp} = \frac{2V_{sat}^2 T_{ill}}{\lambda R_0} \quad (34)$$

Le temps d'illumination total peut être calculé à partir de la tâche au sol de l'antenne définie par son angle d'ouverture à 3dB.

$$\theta_{3dB} = \frac{\lambda}{L} \quad (35)$$

Où L est la longueur de l'antenne.

Dans le cas où l'on utilise tout le temps d'illumination, on obtient :

$$T_{ill} = \frac{1}{V_{sat}} R_0 \theta_{3dB} = R_0 \frac{\lambda}{V_{sat} L} \quad (36)$$

Dans certains cas, pour éviter des effets d'ambiguïtés azimut ou des pertes aux bords du diagramme d'antenne, on peut choisir de traiter une partie plus petite du temps d'illumination, au détriment de la résolution. Cela revient à choisir une bande Doppler B_{dopp} inférieure à la bande Doppler maximale définie par l'angle d'ouverture à 3dB :

$$B_{dopp\ max} = \frac{2V_{sat}}{L} \quad (37)$$

À l'issue du traitement filtré à B_{dopp} , on obtient un sinus cardinal dont la largeur à 3 dB du pic principal nous donne la résolution maximale r_{max} :

$$r_{max} = \frac{V_{sat}}{B_{dopp\ max}} = \frac{L}{2} \quad (38)$$

La résolution maximale atteignable à l'issue du traitement de synthèse azimut dépend alors uniquement de L, et est grandement augmentée par rapport à la résolution brute de l'instrument, mais les fréquences d'échantillonnage doivent respecter certaines règles :

Dans la direction distance, correspondant aux impulsions dites en « temps court », la fréquence doit respecter le théorème de Shannon et être supérieure ou égale à la bande du Chirp B.

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Dans la direction azimut, la fréquence d'échantillonnage en temps long (ou PRF), doit pouvoir échantillonner toute la bande Doppler traitée, ce qui dans le cas d'un traitement optimisé pour le lobe d'antenne à 3dB correspond à :

$$PRF \geq \frac{2V_{sat}}{L} \quad (39)$$

Dans le cas contraire, des phénomènes de repliement du spectre Doppler apparaissent.

2.3.4.3. CORRECTION DES MIGRATIONS EN DISTANCE

Précédemment, nous avons vu par quel procédé de reconstruction il est possible de focaliser une image radar afin d'en améliorer la résolution. Dans le cas de la focalisation azimut, le traitement fréquentiel utilise la variation de la distance de la cible au satellite le long de sa trajectoire. En plus de la compensation de phase associée, cette variation de distance crée un décalage des contributions dans l'axe distance. Cet effet se traduit par une migration parabolique des contributions pouvant atteindre plusieurs cases distances, et qu'il faut compenser lors de la synthèse azimut (Figure 11). Cet effet est appelé migrations en distance ou RCMC (Range Cell Migration Distance).

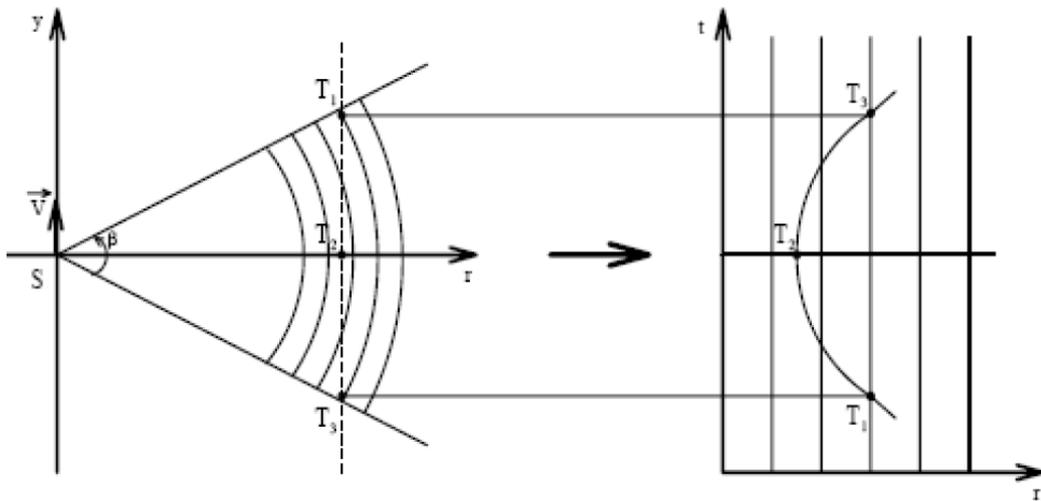


Figure 11 : Principe des migrations en distance dues à l'évolution parabolique de la distance cible-antenne

Les migrations en distance peuvent aussi être provoquées par d'autres phénomènes : excentricité de l'orbite, dépointage de l'antenne, rotation de la Terre. Ces différents effets induisent un décalage Doppler plus ou moins important, qui se traduit par une migration linéaire des cibles lors de leur observation par l'antenne. Ces effets doivent également être quantifiés pour chaque système d'observation SAR, et corrigés lorsque leur impact sur la qualité de la focalisation est significatif. La prise en compte de ces effets dans les traitements sera abordée dans la section 3.4.2.2.

2.3.5. L'INTERFEROMETRIE SAR

Les techniques développées ci-dessus permettent d'obtenir, après focalisation, une image radar complexe présentant amplitude et phase. L'amplitude dépend de la nature du milieu sur lequel l'onde émise est réfléchi et la phase est fonction de la distance entre la cible et l'antenne.

Certaines applications exploitent seulement l'amplitude après un étalonnage radiométrique qui garantit la bonne correspondance entre les niveaux de gris observés et la physique de la mesure, afin de produire une cartographie 2D de la zone étudiée. Cependant, la différence de phase entre deux images radar peut être également utilisée afin d'obtenir des informations d'altitude ou de déplacements. La technique la plus utilisée pour mesurer ces altitudes est l'interférométrie radar, qui par exploitation de la phase de plusieurs images radar sous certaines conditions, permet d'obtenir des informations intéressantes.

2.3.5.1. HISTORIQUE DE L'INTERFEROMETRIE

Les premières observations radar interférométriques ont porté sur le système solaire, sur Vénus [Roge-1969], ou sur la lune [Zisk-1978]. Les premières applications à l'observation de la Terre ont été développées par Graham [Grah-1974], et sont basées sur un système aéroporté présentant deux antennes. Les principales difficultés liées alors au traitement sont celles induites par les déplacements du porteur, provoquant à la fois des erreurs pendant la focalisation, et pendant le calcul de la phase interférométrique. Les instruments interférométriques spatiaux ont permis de lever cette difficulté, les déplacements des centres de phase des antennes étant connus avec une très bonne précision dans le cas d'orbites spatiales. Les données SEASAT traitées par Goldstein [Gold-1988] puis par Prati [Prat-1989] ont été les premières acquisitions spatiales de données interférométriques. Par la suite, les systèmes multi-passes se sont développés, grâce au perfectionnement de la stabilité des trajectoires et de leur mesure, en particulier dans le spatial. En Europe, les acquisitions d'images ERS-1 et ERS-2, sur des orbites quasi-parallèles avec un intervalle de quelques jours ont permis de développer de nombreuses applications topographiques et sismologiques [Mass-1993]. Le séisme de Landers, en 1992, a permis la première exploitation de l'interférométrie radar dans l'étude des mouvements tectoniques [Mass-1994]. Les mouvements de terrains et les déformations liés à l'activité volcanique et humaine ont par la suite eu de nombreuses applications [Path-2003]. Dans les années 2000, la mission américaine SRTM a permis de générer un modèle numérique de terrain mondial par interférométrie SAR. C'est à cette période que le développement des chaînes de traitement radar telles que DIAPASON au CNES a permis l'exploitation massive de données interférométriques aux applications diverses. La mission TanDEM-X [Eine-2006], lancée par le DLR en 2010, utilise deux satellites en vol rapprochés, TerraSAR-X et TanDEM-X, dont l'exploitation de la différence de phase interférométrique permet d'aboutir à des MNT résolus à 12m et à une couverture mondiale.

2.3.5.2. PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRIE

Les différents principes de l'interférométrie radar sont ici décrits. Pour plus de détails sur ces aspects, il convient de se reporter à des ouvrages et des articles de références tels que [Rose-2000], [Hans-2001], [Mass-2008].

A partir de deux images radar focalisées et recalées, on définit le produit interférométrique I comme le produit hermitien du couple d'images complexes traitées S_A et S_B . La phase interférométrique en est l'argument et l'amplitude interférométrique le module.

$$I = S_A \cdot S_B^* \quad (40)$$

L'amplitude interférométrique, de même nature que l'amplitude d'une image radar classique, offre des informations sur la radiométrie de la surface observée. La cohérence interférométrique se définit comme :

$$\gamma = \frac{E[S_A \cdot S_B^*]}{\sqrt{E[|S_A|^2] \cdot E[|S_B|^2]}} \quad (41)$$

En pratique, on effectue le calcul de la cohérence sur une fenêtre spatiale (3x3, 5x5, etc.) afin d'obtenir un indicateur de stabilité de la phase dans ces deux dimensions. La cohérence est représentative de la qualité de la phase et permet d'identifier certains phénomènes sur l'image, ainsi que de valider les résultats obtenus. Elle peut se définir comme l'indicateur de corrélation entre les deux images. Elle est affectée par les différents phénomènes qui seront étudiés dans la section 4.5 : niveau de SNR, décorrélation géométrique, décorrélation angulaire, etc.

2.3.5.2.1. La phase d'une image radar

La phase du signal radar acquis par une antenne est une somme de plusieurs contributions de phases :

$$\varphi = \varphi_{trajet} + \varphi_{propre} + \varphi_{atmosphérique} + \varphi_{instrument} + \varphi_{synthèse} + \varphi_{bruit} \quad (42)$$

La phase de trajet est le déphasage lié à la distance parcourue par l'onde. Elle est l'information de base de l'interférométrie, et sert à la fois à mesurer la topographie d'une région ainsi que ses déformations au cours du temps.

La phase propre est une mesure dépendante des caractéristiques du sol, et essentiellement inconnue. Cette phase est cependant très stable d'une acquisition à une autre, excepté dans le cas où le sol change (rugosité, humidité, etc.).

La phase atmosphérique est due au déphasage de l'onde lors de sa traversée des couches atmosphériques (ionosphère, troposphère, etc.) qui induisent un retard de propagation de l'onde.

La phase instrumentale est celle produite par le système électronique d'émission et de réception (temps de réponse des filtres, amplificateurs...).

La phase de synthèse est un résidu de phase éventuellement introduit lors du traitement de synthèse.

Le bruit de phase est induit par les caractéristiques des instruments lors de l'acquisition et de la réception (bruit thermique, numérisation, dérives fréquentielles de la porteuse, etc.) [Just-1994]

Sous certaines approximations, en considérant le bruit de phase négligeable et les phases atmosphériques et instrumentales constantes entre deux acquisitions, la phase d'une image SAR peut être décomposée en une phase « propre » et une phase liée à la distance parcourue par l'impulsion. En mode mono-statique, l'émetteur et le récepteur sont confondus, le trajet effectué par l'onde radar est donc égal à $2R$, avec R la distance radar-cible. Dans ce cas, soit A l'antenne de référence, appelée maître (Figure 12), la phase pour l'antenne A s'écrit :

$$\varphi_A = \varphi_{propre} - \frac{4\pi R_A}{\lambda} \quad (43)$$

De même pour la seconde antenne B, appelée esclave, on peut écrire :

$$\varphi_B = \varphi'_{propre} - \frac{4\pi R_B}{\lambda} \quad (44)$$

La phase propre d'une image radar est variable pour chaque pixel. Elle est liée à la nature du milieu observé, et déterministe. La phase propre est relativement peu sensible à des légers écarts d'incidence, et si la nature de la surface ne change pas significativement entre deux acquisitions, on peut la considérer constante. Sous ces hypothèses, on peut relier la différence de phase entre les acquisitions des deux antennes à la différence de distance de trajet.

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi(R_A - R_B)}{\lambda} \quad (45)$$

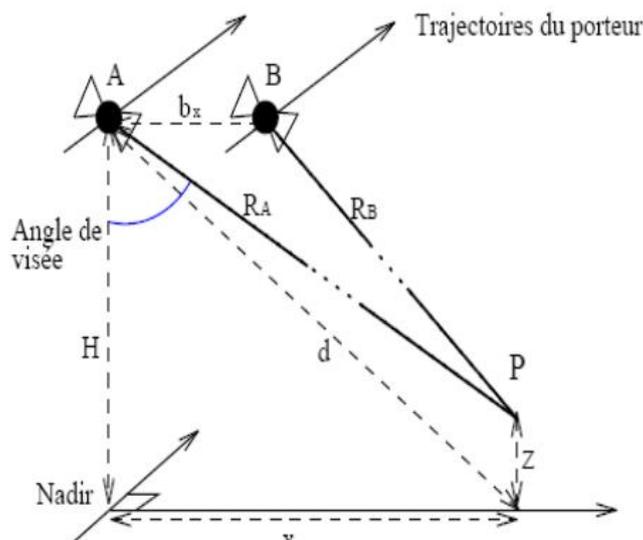


Figure 12 : Schéma de principe de l'interférométrie radar [Trou-1996]

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Toutefois, l'exploitation des interférogrammes nécessite de nombreux traitements. D'une part la différence de phase d'interférogramme, peut être divisée en deux parties distinctes. La première composante correspond à la phase interférométrique que l'on obtiendrait en observant un sol sans relief. Elle se traduit par des franges régulières sur l'image dites « franges orbitales » qui polluent l'information intéressante concernant la topographie. Cette phase peut être retirée des interférogrammes en estimant la phase correspondant à la distance entre les antennes et un géoïde ou un ellipsoïde. La composante de phase résiduelle correspond à la différence entre le modèle utilisé pour retirer les franges orbitales et la réalité du terrain : il s'agit des franges topographiques. Dans le cas de l'interférométrie non simultanée, elle contient également la phase de déplacement liée à la variabilité de la scène entre les deux acquisitions. On peut ainsi considérer deux applications principales à l'interférométrie : l'interférométrie mono-passe qui va chercher à restituer la topographie de la scène et l'interférométrie multi-passe qui va en étudier les déformations. A noter que l'interférométrie multi-passe peut également être utilisée pour étudier la topographie des zones sans déplacements, en particulier pour multiplier les acquisitions et réduire le bruit de mesure par moyennes temporelles.

2.3.5.2.2. L'interférométrie mono-passe

L'interférométrie mono-passe utilise deux antennes simultanément, disposées sur un ou deux satellites suivant la configuration, et qui vont au même moment survoler la surface observée en une seule prise de vue. En effectuant une mesure simultanée ou quasi-simultanée, on espère ainsi supprimer le problème de décorrélation temporelle due par exemple aux mouvements des vagues. A partir des deux images obtenues, on peut, après superposition précise, extraire une image de différence de phase représentative des hauteurs en chaque point de l'image radar. Les techniques de polarimétrie, exploitant des couples d'images radar acquises avec différentes polarisations, permettent également l'étude des milieux végétaux, à travers la séparation et l'identification de certaines cultures dont la signature radar est sensible à l'angle de polarisation.

En l'absence de déplacement de la scène entre les deux acquisitions, la phase topographique permet de restituer directement le modèle numérique de terrain après correction des franges orbitales. Géométriquement, on démontre [Mass-2008] ensuite que l'altitude d'un point est directement reliée aux distances R_A et R_B . Avec B la base horizontale, et en supposant $R_A, R_B \gg z$, on obtient dans le cas mono-statique, la hauteur z_{mono} :

$$z_{mono} = H - R_A \cos\left(\arcsin\left(\frac{R_A - R_B}{B}\right)\right) \quad (46)$$

Dans le cas bi-statique, l'émetteur A émet une onde qui est reçue par le récepteur et par l'émetteur. Les trajets respectifs sont pour A, $2R_A$ et pour B, $R_A + R_B$. La hauteur du point observé s'exprime alors :

$$z_{bist} = H - R_A \cos\left(\arcsin\left(\frac{R_A - R_B}{2B}\right)\right) \quad (47)$$

Où B est la base entre les deux antennes.

On peut ainsi directement relier notre information de phase (45) à la hauteur de chaque point et ainsi reconstruire un modèle d'altitude de la zone observée (modèle numérique de terrain) à partir d'un interférogramme [Mass-1993], [Zebh-1994], [Ferr-1999], [Zebh-1986]. Cependant, on peut remarquer que la phase est connue modulo 2π alors que l'altitude associée n'est pas bornée. On voit alors apparaître la notion d'altitude d'ambiguïté [Mass-1993], il s'agit de la hauteur correspondant à une différence de phase de 2π . Cette hauteur dépend de plusieurs paramètres dont la position du point sur l'image à travers l'angle d'incidence :

$$H_{amb} = \frac{\lambda R \sin(\theta - \alpha)}{pB} \quad (48)$$

Où p vaut 1 dans le cas bi-statique et 2 dans le cas mono-statique. On peut remarquer ici que la sensibilité en précision de hauteur est d'autant plus forte que la hauteur d'ambiguïté est faible, c'est-à-dire pour les grandes bases interférométriques et les faibles longueurs d'onde. Ceci sera abordé plus en détail dans la section 4.5 sur la précision de la mesure.

Si la surface étudiée comporte des dénivelés plus importants que cette hauteur, on voit également apparaître des réseaux de franges, appelés tours de phase, la phase passant de π à $-\pi$ dès que l'altitude dépasse une hauteur d'ambiguïté (Figure 13). Deux points ayant la même phase peuvent donc avoir une hauteur différente. Il faut alors procéder à un déroulement des franges afin de lever l'ambiguïté. Ceci peut parfois s'avérer difficile, particulièrement quand deux pixels voisins ont une différence d'altitude importante (plus d'une hauteur d'ambiguïté) ou lorsque la phase est très bruitée. Les méthodes de déroulement de phase seront abordées plus en détails dans le chapitre 4.

2.3 Le radar à synthèse d'ouverture (SAR)

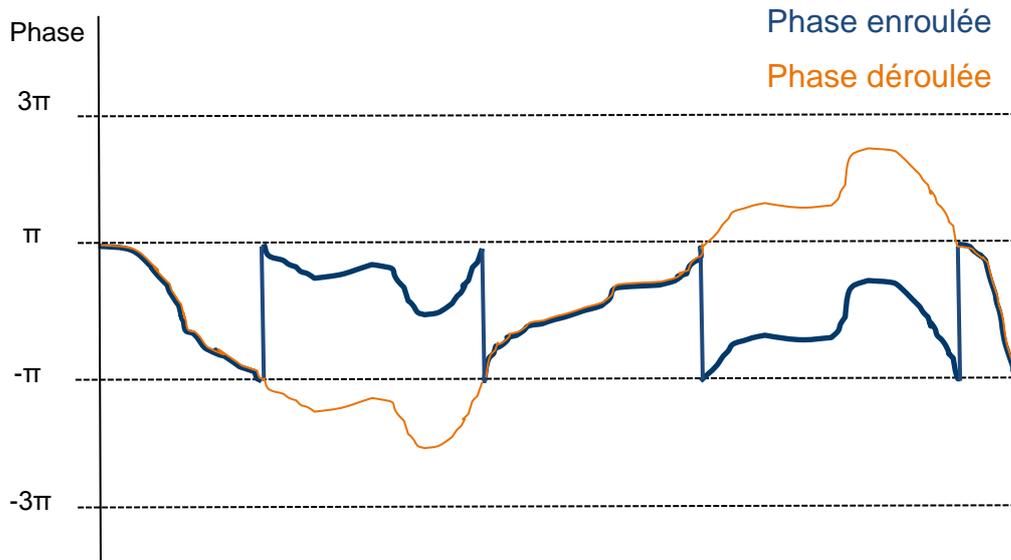


Figure 13 : Exemple de phase absolue, phase déroulée

2.3.5.2.3. Interférométrie différentielle (multi-passe)

L'interférométrie différentielle multi-passe consiste à prendre une image de la surface observée à deux dates différentes. Cette technique est en particulier utilisée pour étudier les mouvements sismiques dans les régions soumises à d'importants phénomènes tectoniques. Toutefois, elle s'avère inadaptée dans le cas de l'étude de surfaces d'eau, en raison de l'instabilité temporelle de ces zones.

Si l'on reprend les équations précédentes, dans le cas d'acquisitions non simultanées, un autre terme de phase est à considérer : celui correspondant à la déformation de la surface observée, dans la direction du radar. Ce terme de déformation est très sensible, et adapté à l'étude de petits mouvements de déformations, typiquement l'étude de volcans ou des tremblements de terre. La présence d'une frange de phase de 2π est équivalente à un déplacement de $\lambda/2$ dans la direction de visée entre les deux acquisitions. Pour l'étude de ces déformations, une estimation précise de la topographie et de tous les termes de phase affectant la phase différentielle est nécessaire, afin de pouvoir estimer correctement le terme de déplacement. En particulier, dans le cas d'acquisitions non simultanées comme dans ce cas d'étude de mouvements, le terme de phase atmosphérique doit être pris en compte et contribue fortement à la phase interférométrique [Hans-2001], celui-ci variant entre deux acquisitions. Les couches ionosphériques (partie haute de l'atmosphère autour de 50 à 1000 km) et troposphériques (partie basse de l'atmosphère de 0 à 16 km) sont les principales contributrices à ce terme. De nombreuses études [Mass-1998] [Remy-2001] ont été menées pour quantifier et comprendre ces effets, afin de corriger les interférogrammes et estimer les déformations de manière précise.

Dans la partie suivante, nous allons mettre en applications les traitements étudiés précédemment dans le cadre du projet SWOT, et observer les différentes spécificités de la mission. Le chapitre étudiera notamment la mise en place des outils de simulation, ainsi que les traitements radar, de la synthèse des données brutes jusqu'à la génération des interférogrammes complexes. La suite des traitements, de la chaîne L2 jusqu'aux produits, en particulier l'inversion phase-hauteur, sera abordée par la suite.

3. SIMULATION ET TRAITEMENT BAS NIVEAU DES DONNEES KARIN/SWOT

Après avoir présenté les caractéristiques générales des systèmes radar et des traitements associés, nous allons maintenant étudier comment les caractéristiques de la mission SWOT et de son instrument principal KaRIn définissent une nouvelle génération d'altimètre large fauchée, et conduisent ainsi à des enjeux importants dans les futures chaînes de traitements. Nous décrivons ici les besoins qui ont amené au développement d'un simulateur de données SWOT, et les différents choix méthodologiques qui ont été faits. Les traitements radar bas niveau sont présentés dans ce chapitre, afin de préparer les aspects liés à l'inversion de la phase interférométrique en hauteurs géolocalisées.

3.1. OBJECTIFS DE LA MISSION SWOT

La mission SWOT [Fu-2012] (Surface Water Ocean Topography), dont le lancement est prévu fin 2020, est un programme scientifique mené en collaboration entre le CNES et la NASA (JPL), avec des contributions de l'Agence Spatiale Canadienne (CSA) et britannique (UKSA). Elle s'inscrit dans le cadre des activités d'observation de la Terre pour mesurer les hauteurs d'eau en utilisant le concept technique d'altimétrie large fauchée par interférométrie radar. L'instrument principal de la mission est appelé KaRIn (Ka-band Radar Interferometer). Il s'agit d'un SAR interférométrique en bande Ka (35.6 GHz). Ses caractéristiques particulières, en particulier son angle de visée proche du nadir (0.6° - 3.9°) et son faible rapport signal à bruit, entraînent des nouveautés au niveau du traitement des données radar par rapport aux capteurs radar existants (Figure 14). L'objectif de cette mission [Rodr-2011] est double : la mesure des hauteurs d'eau à haute résolution sur les continents avec le mode HR pour High Rate (fleuves, lacs) et l'océanographie à haute précision altimétrique pour le mode LR (Low Rate), avec une couverture d'au moins 90% de la surface de la Terre.

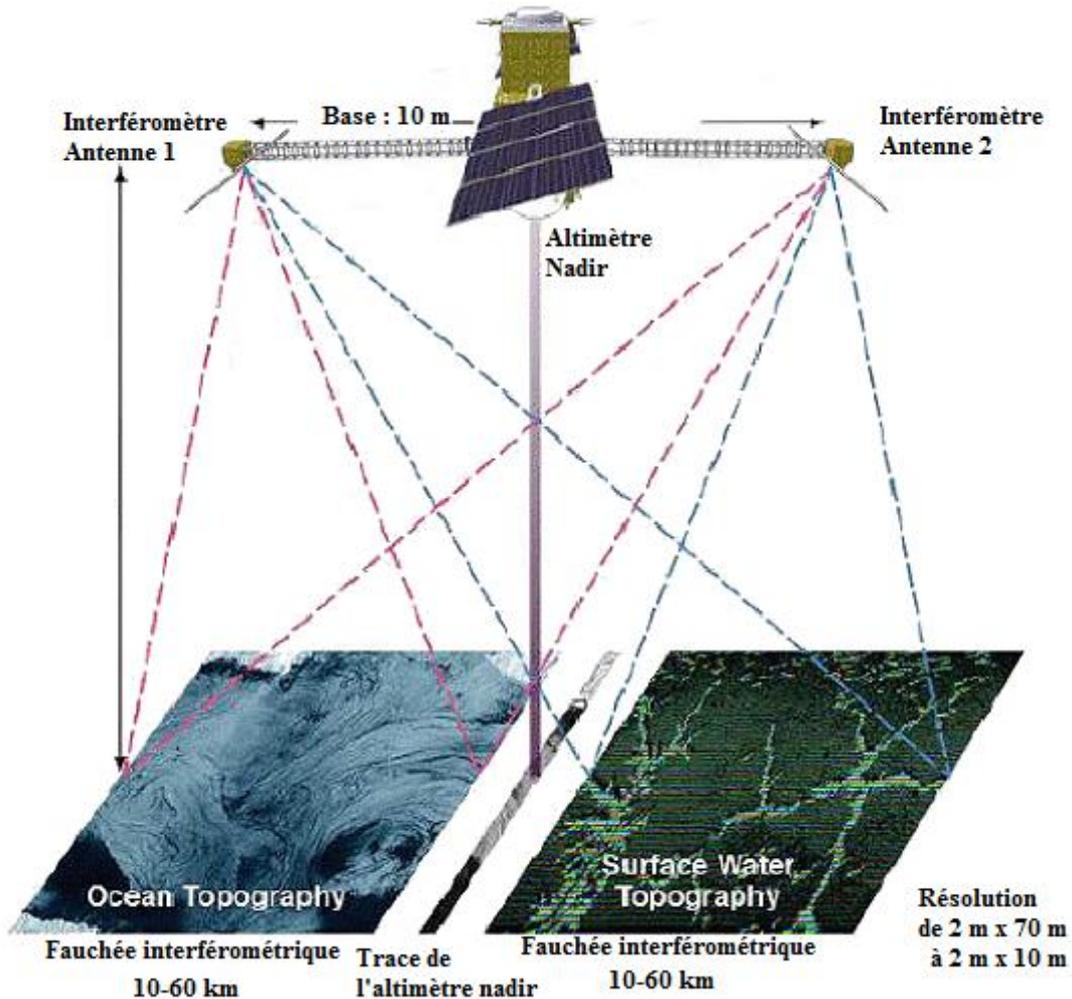


Figure 14 : Le satellite SWOT et ses deux modes de fonctionnement

Les principales caractéristiques de l'instrument KaRIn sont présentées dans la Table 1.

Altitude moyenne (H_{sat})	891 km
Vitesse moyenne du satellite (V_{sat})	7400 m/s
Base (B)	10 m
Angles d'incidence de la fauchée (θ)	0,6 - 3,9°
Fréquence de la porteuse	35,75 GHz
Fréquence d'échantillonnage (PRF)	4420 Hz

Table 1: Principales caractéristiques de l'instrument KaRIn

D'un point de vue technique pour les scientifiques, SWOT (Figure 15) devra principalement :

- détecter les fleuves de largeur supérieure à 100 m et les surfaces d'eau supérieures à $(250 \times 250) \text{ m}^2$ (lacs) avec une précision d'une dizaine de centimètres. D'autre part, un objectif secondaire est d'arriver également à détecter et traiter les rivières de largeur supérieure à 50 m et les lacs de

3.1 Objectifs de la mission SWOT

(100x100) m². La précision requise pour le niveau de l'eau est de 11 cm et celle des pentes de 1.7 cm/km, après moyennage sur une surface d'un km².

- mesurer avec une précision de 1-2 cm les hauteurs d'eau océaniques après moyennage sur une surface d'un km².



Figure 15 : Vue d'artiste du satellite SWOT

Les spécificités de la mission SWOT et ses objectifs à la fois océaniques et continentaux nécessitent le développement de nouvelles chaînes de traitements radar dédiées, et différentes selon le mode de fonctionnement employé [Fjør-2014]. La différence essentielle entre les deux modes vient du volume de données produites, très différent entre l'océan et les eaux continentales. SWOT fonctionnera environ 22% du temps en mode d'acquisition continentale, et en continue en mode océanique. Il n'est pas possible de descendre au sol le produit pleine résolution lors du fonctionnement en mode océan, le volume de données étant trop important. Une chaîne de traitement spécifique, l'OBP (On-Board Processing) effectuera un traitement des données à bord, différent suivant le mode de fonctionnement, avant de faire parvenir les données au sol où sera effectué le traitement sol. Une étape de moyennage à bord spécifique est prévue pour le mode océan afin de limiter le volume descendu. De cette façon, on obtient un volume de télémétrie en fonctionnement LR (sur les océans) de 17 Mb/s tandis que celui en mode HR (continents) est de 333 Mb/s. A noter que le mode LR est activé tout le temps (océans et continents) alors que le mode HR est réservé aux zones continentales identifiées dans un masque des surfaces terrestres qui sera embarqué à bord. Dans cette configuration, on atteint un volume de télémétrie d'environ 7.90 Tb/jour.

3.2. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET RADIOMETRIQUES DES DONNEES KARIN

3.2.1. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES

La faible longueur de la bande Ka (8.4 mm) d'onde utilisée par l'instrument KaRIn permet d'obtenir une bonne précision altimétrique par interférométrie radar. Pour une précision altimétrique donnée, il est donc possible de dimensionner un instrument avec une base réduite par rapport à celle des autres missions en bande X ou C (SRTM, TanDEM-X). Cependant, afin d'assurer une puissance rétrodiffusée suffisante sur les surfaces d'eau, il est nécessaire de travailler à faibles incidences, contrairement aux instruments SAR classiques mesurant la topographie terrestre (20-50°). L'instrument KaRIn fonctionne ainsi entre 0.6° et 3.9°, ce qui entraîne des propriétés géométriques particulières pour les images acquises. D'une part, la taille des pixels varie fortement le long de la fauchée : entre 60m pour les pixels les plus proches du Nadir, à 0.6° (near-range) et 10 m pour ceux en fin de fauchée (far-range) à 3.9°. Les algorithmes de traitement en sont affectés à tous les niveaux : le SNR, les moyennes de pixels, la détection des surfaces d'eau, etc. sont sensibles à ces variations. D'autre part, on voit sur la Figure 16 que la hauteur d'ambiguïté, qui est la hauteur correspondant à un tour de phase de l'interférogramme, varie également fortement dans la fauchée, entre 6 m et 30 m [Fjør-2014].

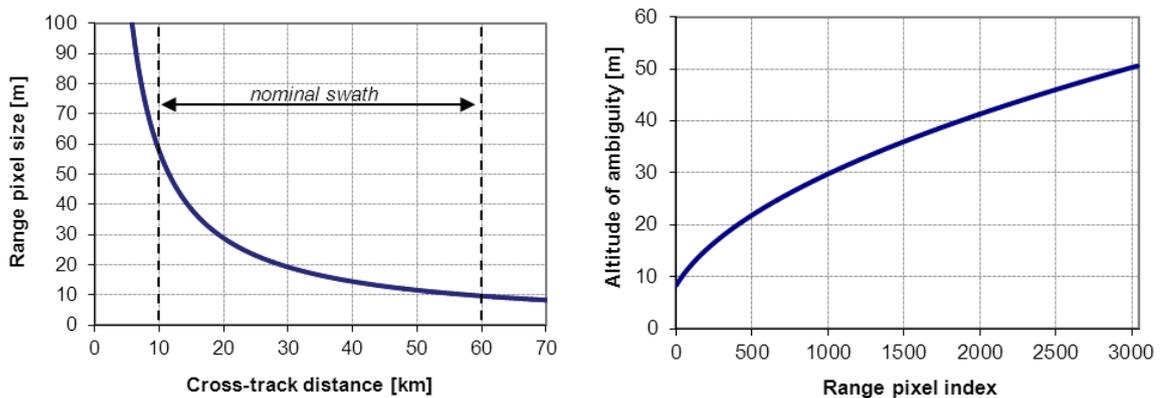


Figure 16 : Evolution de la taille des pixels et de l'altitude d'ambiguïté en fonction de la fauchée [Fjør-2014]

A erreur de phase constante, ceci produit une variation de l'erreur de hauteur à travers la fauchée, avec des conséquences sur les chaînes de traitement, en particulier pour la sensibilité du déroulement de phase interférométrique. Toujours lié à ces faibles incidences, on peut également noter le phénomène de layover (Figure 17), qui sera étudié dans la section 4.6, et qui est dû à des repliements géométriques sur l'image radar dès lors que l'on observe des surfaces dont les pentes locales sont supérieures à l'angle de visée de

3.2 Caractéristiques géométriques et radiométriques des données KaRIn

l'instrument. L'impact de ce phénomène sur la mesure des hauteurs d'eau est en partie réduit par le fait que la contamination par le repliement des zones terrestres sera pondérée par leur faible contraste radiométrique vis-à-vis de celui de l'eau, mais il doit tout de même être pris en compte dans la chaîne de traitement HR.

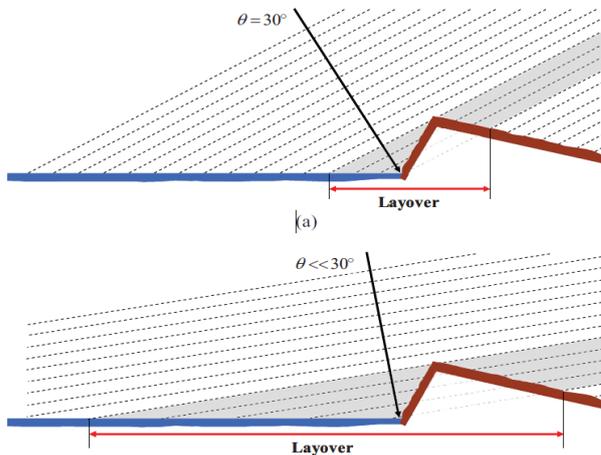


Figure 17 : Effet du layover des berges sur l'eau à faibles incidences

3.2.2. CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES

Les caractéristiques radiométriques de l'instrument KaRIn diffèrent de celles de la plupart des imageurs interférométriques classiques et influencent fortement les propriétés de rétrodiffusion. L'une des principales spécificités porte sur la bande de fréquence utilisée. La bande Ka, de longueur d'onde plus faible que celle des instruments classiques, présente une réflexion spéculaire réduite, une pénétration faible dans les différents milieux, en particulier la végétation, ainsi qu'une plus forte sensibilité aux conditions troposphériques. Au niveau de la réponse radiométrique des surfaces qui interagissent avec l'écho radar, un fort contraste eau/terre est attendu, de l'ordre de 10 dB [Ulab-1989]. Due aux contraintes instrumentales de la mission, le Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ) est élevé comparé aux missions SAR classiques. Il varie d'environ 0 dB en milieu de fauchée jusqu'à 8 dB en bords de fauchée. Aux faibles incidences de SWOT, le σ_0 en bande Ka sur les surfaces d'eau continentales est attendu autour de 10 à 20 dB pour des vents modérés tandis que celui des surfaces terrestres est autour de 0 dB, avec toutefois quelques exceptions comme les routes dont la rétrodiffusion peut être parfois très élevée. La sensibilité au vent du σ_0 est importante sur les rivières et les lacs. Une absence de vent peut se traduire par une absence de retour du signal vers l'antenne réceptrice et des images inexploitable. Ce phénomène est qualifié de « Dark Water » pour le mode HR. Pour les océans, les caractéristiques de rétrodiffusion en bande Ka à faibles incidences sont aussi un enjeu majeur [Bois-2015]. Différentes études [Vand-2004] ont été menées pour étudier la sensibilité de celle-ci aux différents paramètres tels que le vent et la hauteur des vagues, afin de dimensionner précisément le mode de fonctionnement LR. Des valeurs de σ_0 proches de 10 dB sont attendues, avec une dépendance en incidence

significative [Moll-2014]. L'utilisation de modèles plus approfondis dérivés de la résolution des équations de l'optique géométrique permet d'estimer des valeurs de σ_0 à faible incidence allant de 11dB pour un vent à 10m de 6m/s à 8dB pour un vent à 10m de 15m/s. Dans ces différents cadres, hydrologiques et océaniques, l'acquisition de mesures en bande Ka est d'une importance capitale pour comprendre la physique de la mesure et caractériser celle de KaRIn.

3.2.3. ACQUISITIONS AEROPORTEES

Plusieurs campagnes aéroportées ont été réalisées afin d'acquérir des données représentatives de KaRIn (bande Ka, faible incidence, faible base interférométrique). Les enjeux sont doubles. D'une part, la compréhension de la physique de la mesure, en particulier la rétrodiffusion, est indispensable à un bon dimensionnement de l'instrument afin de respecter les spécifications scientifiques. D'autre part, les données aéroportées sont un support important pour l'étude et le développement des chaînes de traitement opérationnelles. Des mesures interférométriques en bande Ka ont été collectées en 2009 par le JPL à travers l'instrument GLISTIN qui a pu imager des zones dans le Dakota du Nord sous des incidences autour de 10° [Moll-2011]. D'autres mesures réalisées par l'ONERA avec l'instrument DRIVE ont permis de confirmer dès 2004 les comportements de rétrodiffusion attendus sur les surfaces océaniques. Plus récemment, une campagne de mesure, DRIVE/BUSARD, menée dans le sud de la France en 2011 par le CNES et l'ONERA [Fjor-2014] a fourni des données interférométriques en bande Ka à faibles incidences, de 0 à 14° . Les caractéristiques géométriques de cet instrument étaient assez proches de celle de KaRIn, y compris celles liées aux aspects interférométriques tels que la petite base, mais l'ouverture d'antenne plus importante entraîne un fort repliement et une contamination au nadir entre les deux fauchées. Les images acquises lors de cette campagne en Camargue (Figure 18) ont cependant pu fournir les premières acquisitions aéroportées réalistes et de représentativité correcte, d'images interférométriques en bande Ka et en proche-nadir.

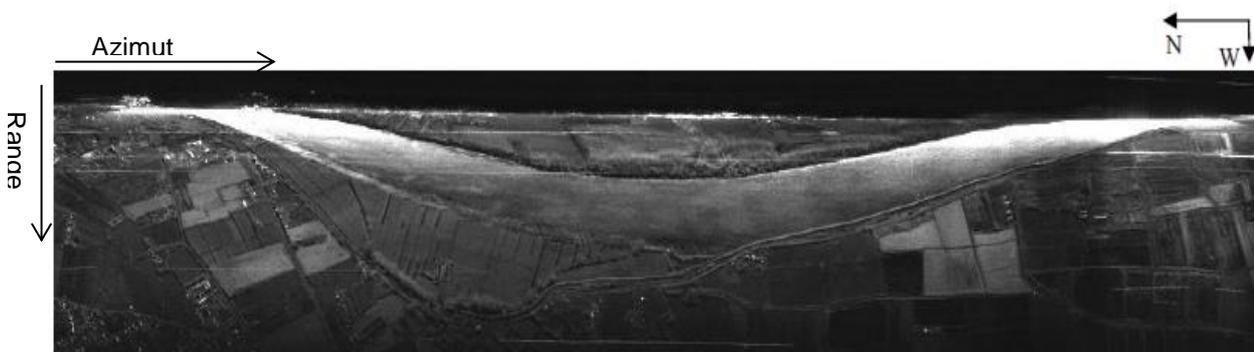


Figure 18 : Image d'amplitude DRIVE-BUSARD acquise au sud d'Arles en 2011

Sur cette image d'amplitude issue de la campagne DRIVE-BUSARD, on peut noter l'inversion de contraste radiométrique entre l'eau et la terre dès lors que l'on passe des faibles incidences (haut de l'image) aux fortes incidences (bas de l'image). Le point de fonctionnement de SWOT, entre 0.6 et 3.9° est supposé permettre de respecter la condition d'un contraste radiométrique fort entre l'eau et la terre dans la majorité des acquisitions.

3.2 Caractéristiques géométriques et radiométriques des données KaRIn

AirSWOT est le système aéroporté du JPL pour préparer la mission SWOT. Son principal instrument KaSPAR comporte un SAR interférométrique en bande Ka opérant en proche nadir de 1 à 5°, avec une base courte, pour être aussi représentatif que possible de KaRIn. KaSPAR a également une fauchée plus étendue de 4 à 27° d'incidence pour augmenter la couverture et des antennes supplémentaires afin de pouvoir faire de l'interférométrie along-track (ATI), ce qui permet d'étudier les mouvements des surfaces d'eau. Plusieurs campagnes ont été réalisées avec l'instrument aéroporté AirSWOT. Les données acquises ont pour objectif d'étudier la phénoménologie en bande Ka à faible incidence et d'y adapter les traitements radar associés, de servir d'outil de validation et de calibration pour la mission SWOT, et de permettre des études préliminaires en hydrologie et en océanographie. L'étude des données AirSWOT par le JPL a pu mettre en évidence certains aspects comme la présence de surfaces d'eau apparaissant localement comme trop sombres pour y extraire correctement les surfaces d'eau et leur hauteur, ainsi que des informations sur la physique de la mesure de KaRIn comme sa sensibilité aux mouvements de surfaces. Cependant, certaines différences entre KaSPAR et KaRIn, telles qu'un SNR élevé ou une fauchée intérieure étroite (800m), rendent difficile l'utilisation directe des données AirSWOT pour le développement algorithmique de la mission. En outre, dans le cadre de la thèse, des données interférométriques AirSWOT à faibles incidences n'ont pas été disponibles à temps pour être utilisées comme support aux études.

3.3. OUTILS DE SIMULATION MIS EN PLACE POUR LES DEVELOPPEMENTS ALGORITHMIQUES DE SWOT

En l'absence de données réelles suffisamment représentatives, satellitaires ou aéroportées, il est nécessaire de développer des outils de simulations permettant de générer de manière la plus réaliste possible, les acquisitions telles qu'elles seraient faites par l'instrument KaRIn, afin de servir de support au développement algorithmique des chaînes de traitement.

Cette section détaille les aspects liés au développement de simulateurs SWOT qui ont servi par la suite à tester et valider certains algorithmes de traitement. Différents simulateurs ont été développés pour le projet SWOT (Figure 19). On peut distinguer d'une part les simulateurs haut niveau, qui simulent directement les interférogrammes comme le simulateur scientifique HR dit de niveau 1.5 du JPL, ou des données de hauteurs d'eau comme le simulateur scientifique LR niveau 2 du JPL. Ces simulateurs peuvent générer de larges volumes de données, et le simulateur scientifique L1.5 permet également de tester une partie des traitements de niveau 2. D'autre part, des simulateurs et prototypes ont également été développés par le CNES, CLS et Altamira, afin de servir de support aux chaînes de développement opérationnelles [Duro-2014]. Ce sont des simulateurs bas niveau dont l'objectif est de servir de support aux développements des algorithmes de traitement à la fois L0 à L1 (des données brutes aux données SLC focalisées) et L1 à L2 (des SLC aux hauteurs géolocalisées), et d'étudier la phénoménologie propre à SWOT, qui est sensible à ces différents

traitements. Le simulateur développé en interne CNES dans le service SI/TR présenté ici a été utilisé pour préparer et valider les fonctionnalités du simulateur CNES/CLS/Altamira.

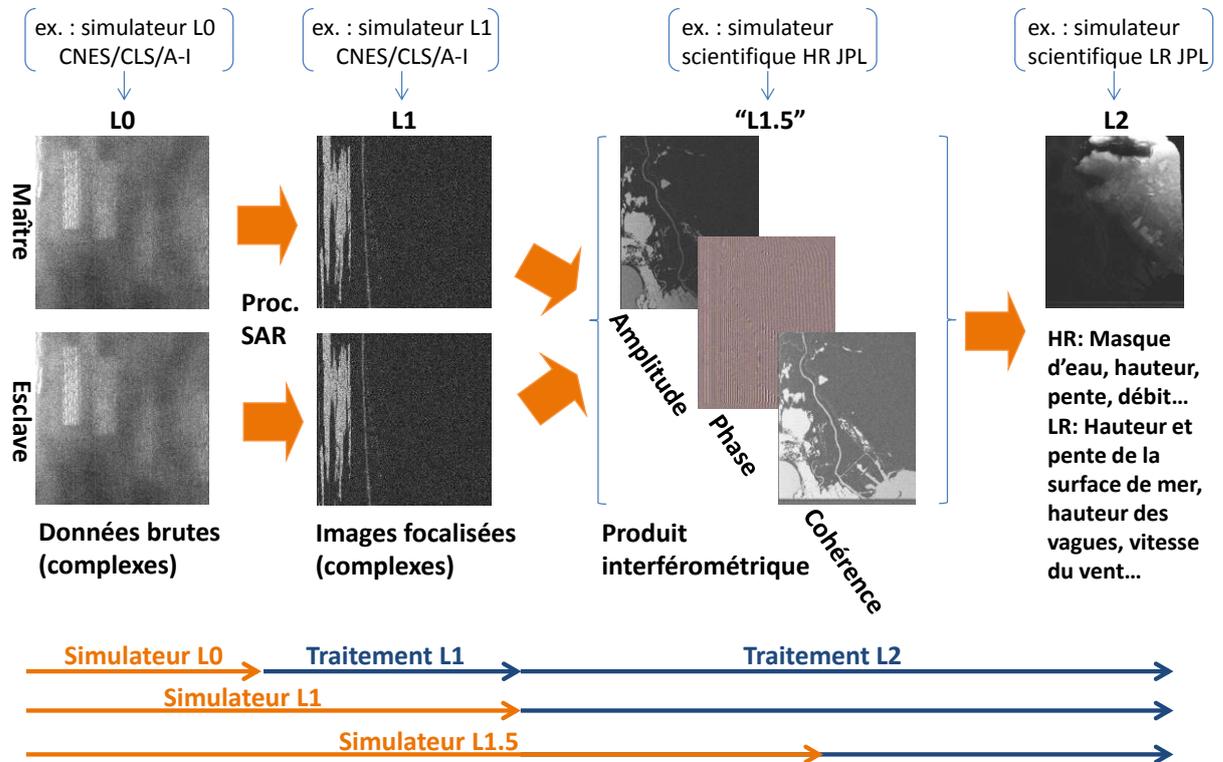


Figure 19 : Illustration des différents niveaux de simulation, traitement et produits KaRIn

3.3.1. OBJECTIFS DES SIMULATEURS BAS NIVEAUX

Un simulateur radar bas niveau est un logiciel capable de simuler des acquisitions radar représentatives d'un instrument. A partir de l'orbite du satellite et de la scène à observer, il doit recréer le plus fidèlement possible les images qui seront générées par l'instrument radar dans les mêmes conditions. De telles données synthétisées à ce niveau sont dites données de niveau 0, il s'agit de données brutes. Le simulateur peut aussi simuler des images de plus haut niveau (images SLC), ayant déjà subi le traitement SAR : il s'agit de données de niveau 1, dans le but de procéder directement et plus rapidement aux calculs des produits interférométriques (Figure 20).

Pour cela, les caractéristiques de l'onde émise par l'antenne et son interaction avec la surface observée doivent être modélisées de façon réaliste, ce qui comprend au minimum : la capacité de simuler le comportement théorique de l'instrument et du satellite sur son orbite, l'introduction de divers bruits ou perturbations, comme les mouvements de roulis ou de lacet du satellite autour du mât, les perturbations atmosphériques, la prise en compte de la rotondité de la Terre, les effets du bruit thermique, etc. Pour cela, on utilise des modèles numériques de terrain afin de simuler les scènes étudiées.

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

La physique de la mesure, en particulier la réponse des surfaces interagissant avec l'onde radar, doit elle aussi être modélisée de façon réaliste. Pour cela, on peut caractériser pour chaque pixel du MNT, en plus de son altitude, le type de terrain sur lequel on se trouve à partir d'un masque d'occupation du sol. Selon la nature du sol (route, eau, végétation...), on associe des réponses radiométriques et géométriques spécifiques à chaque facette du MNT. De même, on peut améliorer la représentativité des simulations en intégrant les mouvements du mât du satellite, la traversée des ondes dans l'atmosphère, etc. Par la suite, pour différencier le pixel de l'image radar des pixels du MNT, nous utiliserons la terminologie « facette » pour les sommets du MNT utilisés pour simuler les images.

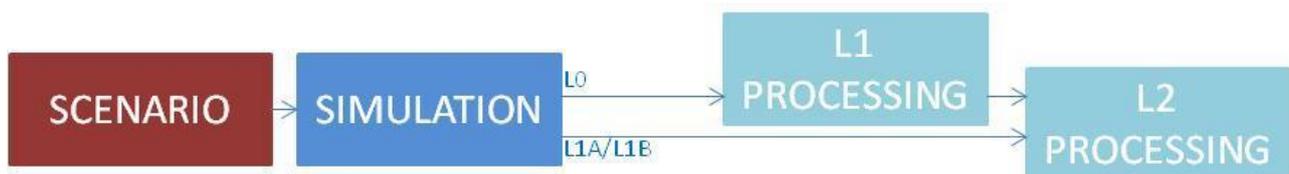


Figure 20 : Les différents niveaux de simulations et de traitements dans les simulateurs SWOT

3.3.2. DEVELOPPEMENT DU SIMULATEUR SWOT DE LA THESE

Le prototype présenté par la suite est l'un des simulateurs développé au CNES dans le cadre des développements algorithmiques de SWOT. Il s'agit d'un simulateur capable de produire des données de niveau L0 ou L1, et qui a servi de support aux tests et aux développements des différents algorithmes de restitution de hauteurs géolocalisées réalisés dans le cadre de la thèse.

3.3.2.1. DEFINITION ET DECOUPAGE DES SCENES

Lors d'une simulation de données radar, qu'elle soit L0 ou L1, il est important de découper correctement la zone afin de maîtriser les caractéristiques géométriques de notre image. Dans notre cas, les MNT utilisés sont souvent de taille réduite, inférieure à la fauchée SWOT. En effet, pour parvenir à un niveau de réalisme suffisant lors de la génération des images, il est nécessaire d'utiliser un nombre important de facettes dont les réponses à l'onde radar seront sommées pour former les différents pixels (cf. 2.3.3). Afin d'être représentatif d'un point de vue statistique pour simuler le speckle, nous avons choisi de sommer un minimum de 12 facettes par pixels. Pour que cette condition soit respectée sur toute la fauchée, et également pour éviter des phénomènes de « trous » dans l'image (liés à la topographie de la scène), un pas de MNT de 1m x 1m est généralement utilisé. De plus, l'utilisation d'un MNT très résolu permet un plus grand réalisme des phénomènes étudiés (layover, précision sous-pixellique pour les pixels mixtes eau/terre, etc.). Cela se traduit par un nombre de scènes réduit, des MNT à ces résolutions étant difficiles à obtenir. Une autre option,

utilisée par le simulateur scientifique HR au JPL consiste à simuler des images sans speckle (avec un MNT moins résolu) et ajouter ensuite le modèle de speckle comme un bruit multiplicatif.

Pour ces raisons, dans certaines de nos simulations, l'orbite est produite de manière artificielle afin de couvrir la zone du MNT que l'on souhaite imager, à une incidence donnée. L'orbite est échantillonnée à la PRF, considérée comme linéaire par morceau, avec des options quant au dépointage ou à la visée droite ou gauche utilisée. Ce découpage n'est bien sûr pas réaliste par rapport aux véritables orbites SWOT, mais permet une grande latitude et une maîtrise précise des paramètres que l'on souhaite étudier, sans être soumis à la réalité de l'orbite mission (Figure 21).

Dans le cas de simulations à plus grandes échelles, où les enjeux sont différents, le principe consiste à fixer et localiser à la fois les orbites et les MNT. Dans ce cas, les paramètres réglables sont la taille de l'image, à la fois en azimuth et en distance, sur un MNT que l'on suppose suffisamment grand pour accueillir l'image radar (Figure 22).

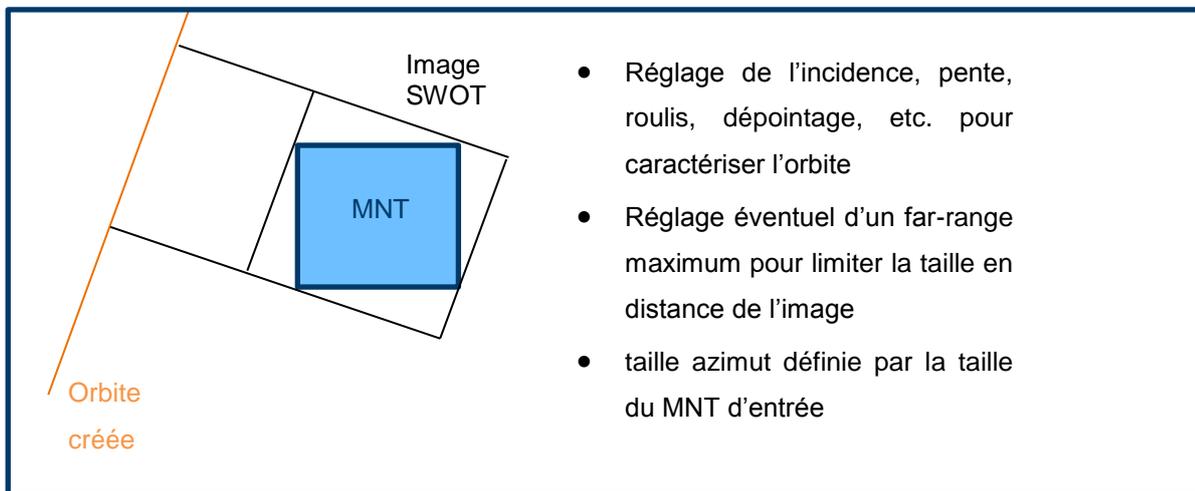


Figure 21 : Définition de la scène (option 1) dans le cas d'une simulation

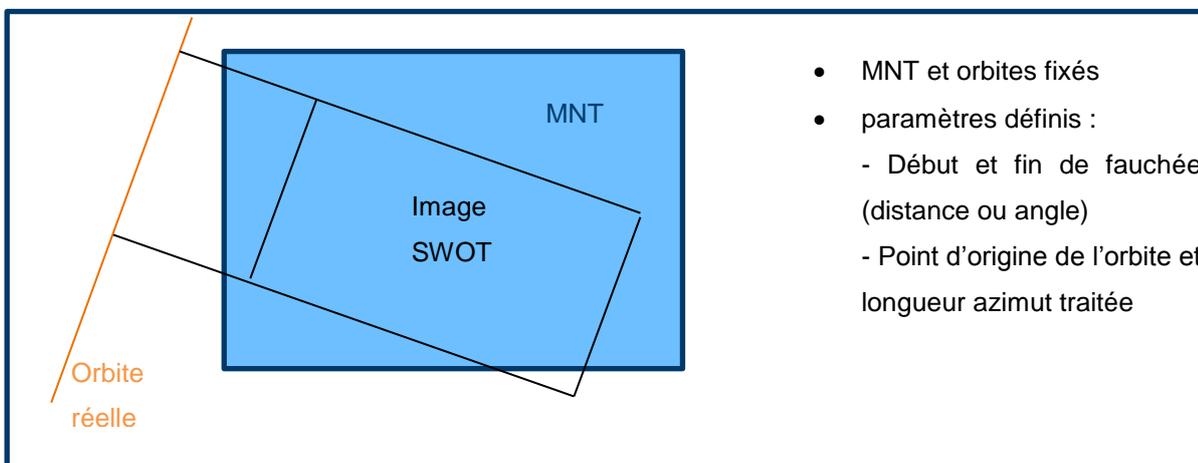


Figure 22 : Définition de la scène (option 2) dans le cas d'une simulation

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

Le MNT qui pour la suite des simulations a été le plus utilisé est un MNT Lidar de l'IGN (Figure 23) de la région de la Camargue, très résolu (2x2m) et rééchantillonné à 1x1 m². Ce MNT est accompagné d'un masque d'occupation du sol (cf. 3.3.2.5) et a des niveaux d'eau très précis. Sa grande précision (20 cm) et sa résolution permet d'obtenir des simulations réalistes. Pour simuler de grande images, en particulier des fauchées SWOT de 60 km, il a été complété par un MNT SRTM et retravaillé aux niveaux des transitions pour éviter les artefacts lors des simulations.

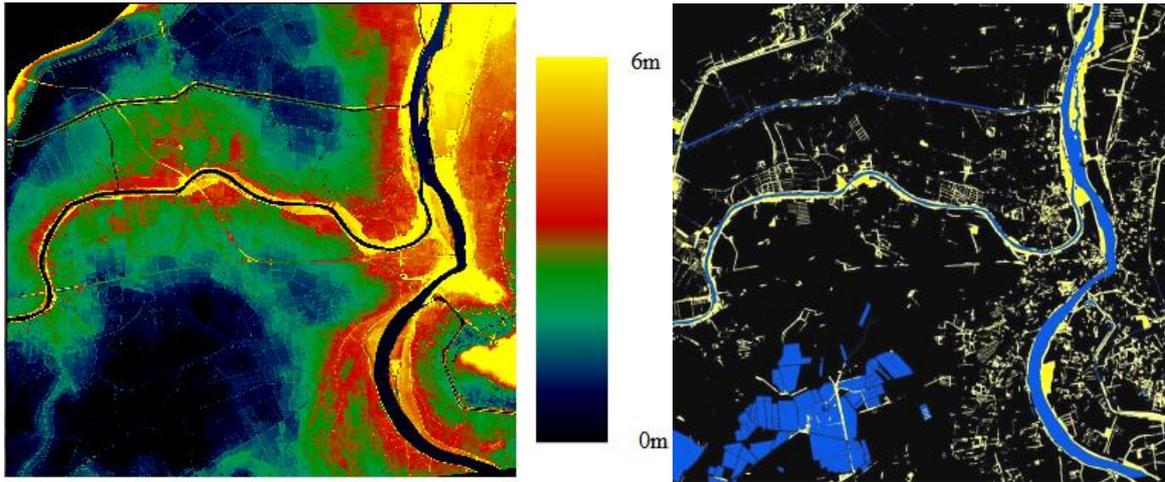


Figure 23 : MNT IGN (à gauche) et masque d'occupation du sol (à droite) de la région de la Camargue (15 x 15 km²) résolu à 2x2 m²

3.3.2.2. CREATION DES IMAGES SIMULEES

Une fois la zone correctement définie, il est possible à partir des paramètres radar de calculer la taille de l'image radar à simuler. Dans l'axe azimut, le nombre de lignes n_l dépend de la longueur de l'image souhaitée et de la taille des pixels en azimut :

$$n_l = \frac{\text{taille}_{\text{image_azimut}}}{\text{taille_pixel}} = \frac{\text{taille}_{\text{image_azimut}} \cdot f_{PRF}}{V_{\text{sat}}} \quad (49)$$

Dans le cas où l'on simule des données brutes et où l'on veut que l'image focalisée couvre une zone donnée, il faut rajouter un demi-taux de compression azimut des deux côtés de l'image.

$$n_{l_{\text{brut}}} = \frac{\text{taille}_{\text{image_azimut}} \cdot f_{PRF}}{V_{\text{sat}}} + \frac{R \cdot \lambda \cdot B_{\text{dopp}} \cdot f_{PRF}}{2 \cdot V_{\text{sat}} \cdot V_{\text{sol}}} \quad (50)$$

Où V_{sol} est la vitesse du satellite projetée au sol.

Le nombre de colonnes n_c de l'image est calculé à partir des paramètres near-range R_{min} et far-range R_{max} obtenus par le découpage de l'image précédent. On obtient alors :

$$n_c = \frac{R_{max} - R_{min}}{taille_pixel_distance} = \frac{R_{max} - R_{min}}{c} 2 \cdot f_e \quad (51)$$

Où f_e est la fréquence d'échantillonnage.

Le principe de simulation dépend ensuite de la représentation du MNT. Dans notre cas, nous avons choisi une représentation par sommet, où chaque point du MNT correspond à une facette élémentaire permettant la constitution de l'image radar. Pour éviter des artefacts sur les surfaces régulières, chacune des facettes du MNT est déplacée d'une hauteur aléatoire entre $-\lambda/2$ et $\lambda/2$, ajoutée à la valeur réelle du MNT. Il est important de noter ici que dans ce principe de simulation par « sommation » du MNT, nous souhaitons obtenir du speckle réaliste. Pour cela, il convient d'avoir un échantillonnage du MNT suffisamment fin pour que chaque pixel radar reçoive au moins une douzaine de ces contributeurs lors de la génération de l'image focalisée L1 (avant présommation) afin d'assurer une représentation réaliste du speckle.

Dans le cas d'une simulation L1, pour chaque contributeur du MNT, on calcule la distance au plus près de l'orbite (si l'on souhaite restituer à Doppler nul, ce qui est en général le cas). A partir de cette distance R et de la position sur l'orbite, on détermine à la fois la case distance et la case azimuth dans laquelle tombe chaque contributeur élémentaire (Figure 24). Dans la section suivante, nous verrons comment se calcule la contribution complexe élémentaire qui est ensuite sommée dans les cases pour chacun des pixels du MNT.

La case radar i correspondant à la facette est obtenue de la façon suivante :

$$i = \frac{R - R_{min}}{c} 2 \cdot f_e \quad (52)$$

Pour les images brutes L0, on procède de la même façon, excepté que chaque sommet du MNT ne tombe plus seulement dans la case correspond à sa distance Doppler (au plus proche), mais est distribué dans tous les échantillons correspondant à toutes les positions de l'orbite ayant vu ce point. La puissance reçue est ensuite pondérée par le diagramme d'antenne azimuth, selon la position le long de l'orbite. Ceci multiplie d'autant le temps de calcul, rendant la parallélisation indispensable pour parvenir à des temps de simulations raisonnables. De plus, il faut également prendre en compte la variation du Chirp en distance, soit en temporel en appliquant une fonction de défocalisation sur chaque contributeur, soit en post-traitement fréquentiel en convoluant le signal focalisé avec un Chirp.

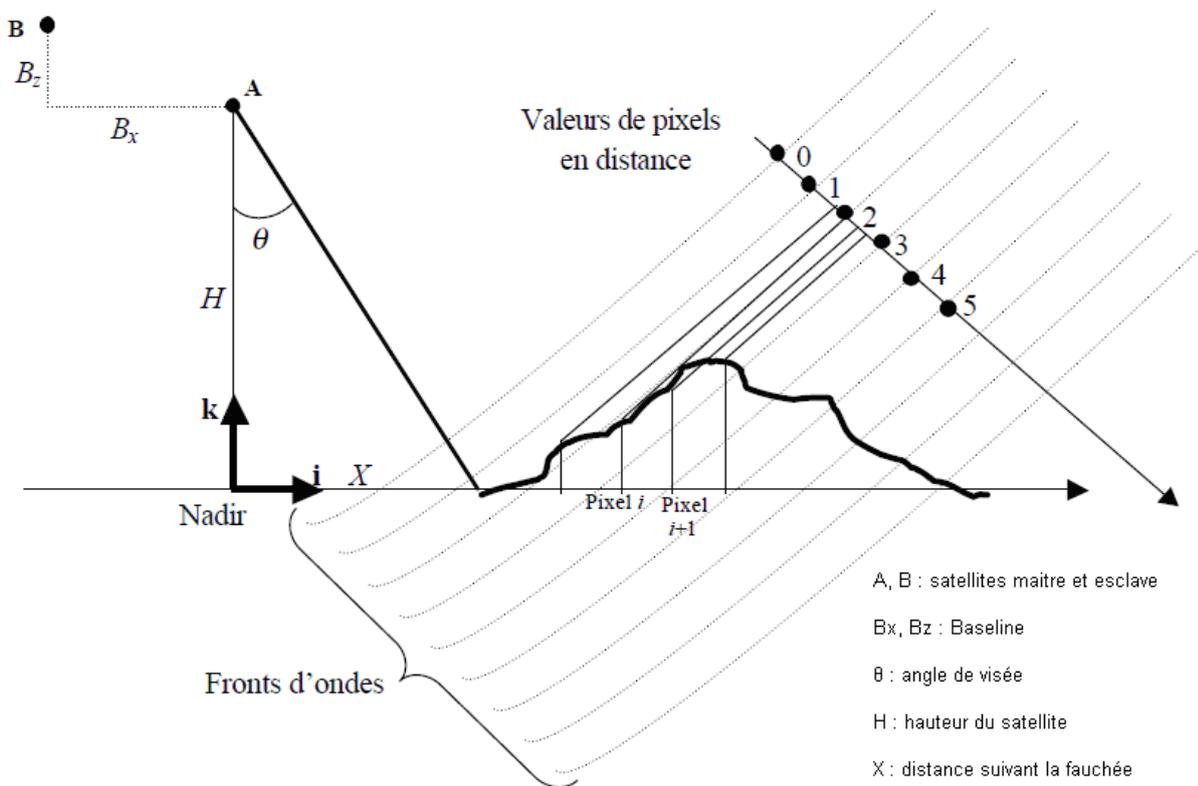


Figure 24 : Géométrie en distance de conversion du MNT en image radar simulée

3.3.2.3. CALCUL DES CONTRIBUTIONS ELEMENTAIRES

Chaque contributeur (facette) produit un signal complexe de la forme :

$$C = Amp \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}R} \quad (53)$$

Chacune de ces contributions complexes est sommée dans la case radar préalablement calculée pour produire l'image radar simulée. Il faut donc estimer correctement pour chaque contributeur le terme d'amplitude, en fonction des caractéristiques du radar, afin d'avoir une représentation réaliste du signal. Il faut ensuite prendre en compte les perturbations de celui-ci par le bruit thermique, en ajoutant un bruit gaussien une fois le signal complexe de chaque pixel obtenu. Ceci doit être vérifié à la fois pour les modes de simulation L0 et L1, et ces derniers doivent être comparables en terme de résultats finaux (entre une simulation L0 focalisée par traitement radar et une simulation directe L1).

Les questions qui se posent sont :

- Comment produire le signal radar (brut ou focalisé) au bon niveau, par sommation des facettes qui contribuent à un pixel donné ?

- Comment produire et rajouter le bruit thermique à chaque échantillon du signal radar (brut ou focalisé) afin d'avoir un SNR représentatif ?
- Quels sont les traitements adaptés pouvant être capables d'assurer la cohérence entre les différents niveaux de simulations ?

Le point de départ de la méthode utilisée est l'équation du bilan de liaison établie avant et après traitement dans l'hypothèse de cibles étendues [Mass-2008].

Avant traitement (c'est-à-dire en LO) on a :

$$SNR_{L0}(M) = \frac{P_t}{L_{Tx}} \cdot G_{ant}^2(M) \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4(M) \cdot L_{atm}} \cdot \frac{1}{K_B \cdot T_{eq} \cdot B_{noise}} \cdot \sigma_0 \cdot S_{L0}(M) \cdot \frac{1}{SNR_{margin}} \quad (54)$$

Où :

P_t : Puissance émise

L_{Tx} : Perte en transmission et en réception

G_{ant} : Gain antenne

L_{atm} : Perte atmosphérique

K_B : Constante de Boltzmann

T_{eq} : Température équivalente de bruit

B_{noise} : Bande passante du bruit

σ_0 : Coefficient de rétrodiffusion

S_{L0} : Surface du pixel illuminée par le radar

SNR_{margin} : Marge de SNR utilisée comme facteur de sécurité pour la mission

On peut remarquer que les termes G_{ant} , R et S_{L0} présentent une dépendance à la position de la cible M dans la fauchée. A noter également que S_{L0} représente la taille (surface) de la cellule de résolution de l'image brute, c.à.d. toute la surface qui contribue à un pixel de l'image brute. Dans la direction azimut, la surface est délimitée par le diagramme d'antenne lors de la sommation des contributions des facettes sur tout l'historique Doppler. En pratique, on s'arrêtera à quelques taux de compression pour limiter le temps de calcul, le diagramme d'antenne pondérant ensuite suffisamment le retour du signal pour que celui-ci soit considéré comme nul. Dans le cas de la surface dans la direction distance, là encore pour avoir un temps de calcul raisonnable, on se contente de sommer les facettes sur la cellule d'échantillonnage (soit $S = c/2f_e \sin(\theta)$) avant de convoluer le signal avec le Chirp pour simuler l'étalement en distance. La surface équivalente totale doit donc être multipliée par $G_{range} = f_e \cdot T_{pulse}$ pour correspondre à la surface réelle éclairée. En pratique, pour SWOT, le signal est initialement échantillonné à 300 MHz, tandis que le Chirp l'est à 200 MHz. Par la suite, le bruit thermique ajouté est simulé à 300 MHz, à la fois en termes de largeur de bande et d'échantillonnage.

Lors du traitement bord, une étape de filtrage permet de restituer le signal échantillonné et résolu à 200 MHz. Pour cela, on filtre le signal de manière à conserver la bande spectrale commune aux deux

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

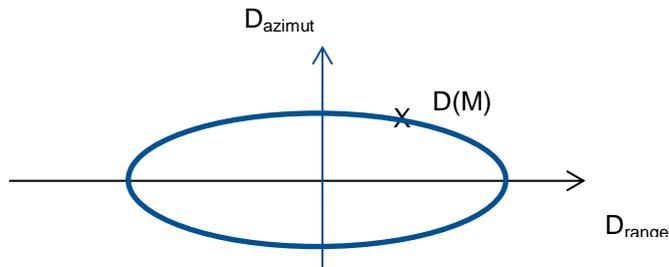
antennes, autour de 200 MHz également. La portion de fréquence supprimée ne contient que peu de signal utile, seulement du bruit, ce qui permet de ramener le rapport signal à bruit proche de celui que l'on obtient en simulant bruit et signaux à 200 MHz, comme en simulation L1.

Le terme G_{ant}^2 correspond au gain aller/retour de l'antenne. Il se décompose comme :

$$G_{ant} = G_{max} * D(M) \quad (55)$$

Où D est la directivité du signal.

La directivité dépend de la position de M, elle est calculée par une interpolation depuis les directivités dans les 2 plans principaux range et azimuth respectivement notées D_{range} et D_{azimut} .

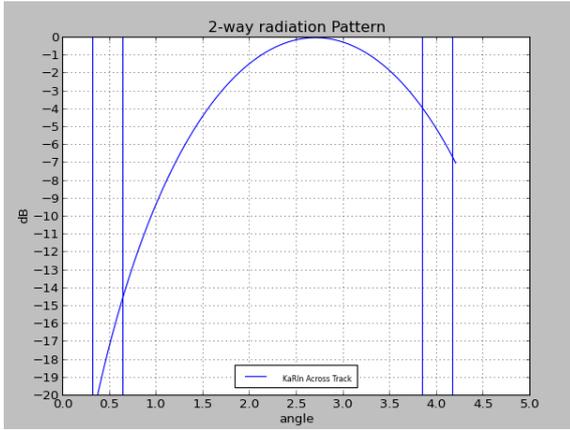


Plusieurs solutions sont possibles pour modéliser la directivité suivant les directions principales. L'utilisation d'un modèle analytique en sinus cardinal (Figure 25 et Figure 26) est une première approche pour représenter les antennes à ouverture rectangulaire de type KaRIn :

$$D_{range}(dB) = 10 * \log_{10} \left(\text{sinc}^2 \left(2.78312 * \frac{\theta - \theta_{max_range}}{\theta_{3dB_range}} \right) \right) \quad (56)$$

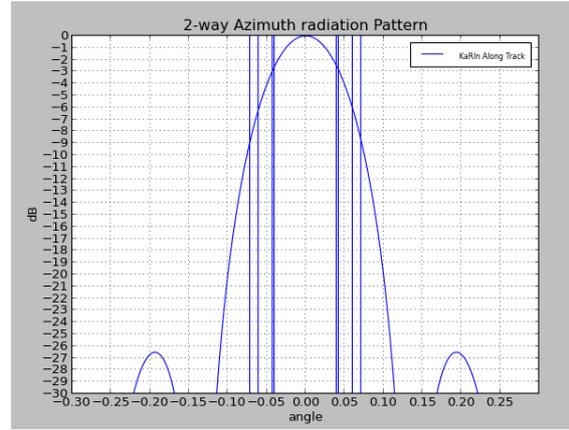
$$D_{azimut}(dB) = 10 * \log_{10} \left(\text{sinc}^2 \left(2.78312 * \frac{\theta - \theta_{max_azi}}{\theta_{3dB_azi}} \right) \right) \quad (57)$$

avec θ_{max_x} = Angle de visée KaRIn suivant la direction range ou azimuth
avec θ_{3dB_x} = Angle d'ouverture à 3dB KaRIn suivant la direction range ou azimuth



D_{range}^2 (dB)

Figure 25 : Diagramme de directivité en distance en fonction de l'angle d'incidence



D_{azimut}^2 (dB)

Figure 26 : Diagramme de directivité en azimuth en fonction de l'angle d'incidence

Note : Le paramètre θ_{max} peut être soit positif, soit négatif. Son signe définit la fauchée visée, droite ou gauche. En pratique, on utilisera par la suite des modèles d'antennes plus réalistes fournis par les équipes instrumentales SWOT, notamment pour le diagramme azimuth dont l'atténuation est plus importante que celle du sinus cardinal.

Après focalisation (c'est-à-dire en L1, sur les images SLC), on a pour des cibles étendues :

$$SNR_{L0} = SNR_{L1} \quad (58)$$

$$SNR_{L1} = \frac{P_t}{L_{Tx}} \cdot G_{ant}^2(M) \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4(M) \cdot L_{atm}} \cdot \frac{1}{K_B \cdot T_{eq} \cdot B_{noise}} \cdot \sigma_0 \cdot S_{L1}(M) \cdot G_{range} \cdot G_{azi} \quad (59)$$

Avec les gains en traitement de compression azimuth et distance :

$$G_{range} = f_e T_{pulse} \quad (60)$$

$$G_{azi} = \frac{R \cdot \lambda \cdot B_{dopp} \cdot f_{PRF}}{2 \cdot V_{sat} \cdot V_{sol}} \quad (61)$$

Si l'on néglige les ambiguïtés, on peut noter que :

$$S_{L0}(M) = S_{L1}(M) \cdot G_{range} \cdot G_{azi} \quad (62)$$

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

Le SNR_{L1} pourrait être aussi exprimé de la façon suivante afin de faire apparaître la partie signal et bruit qui sera utilisée par la suite :

$$SNR_{L1} = \frac{\frac{P_t}{L_{Tx}} \cdot G_{ant}^2(M) \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4(M) \cdot L_{atm}} \cdot \sigma_0 \cdot S_{L1}(M) \cdot G_{range} \cdot G_{azi} \cdot \frac{1}{SNR_{margin}}}{K_B \cdot T_{eq} \cdot B_{noise}} \quad (63)$$

Signal²
Bruit²

3.3.2.3.1. Modélisation du signal L0

Dans le cas d'une simulation de données L0, des facettes élémentaires sont générées (correspondant aux pixels du MNT) et utilisées pour produire les pixels radar SLC. Chaque facette présente une signature complexe définie telle que l'amplitude élémentaire A_{L0} s'écrit :

$$A_{L0} = \sqrt{\frac{P_t}{L_{Tx}} \cdot G_{ant}^2 \cdot \frac{c^2}{(4\pi)^3 \cdot f_0^2 \cdot R^4 \cdot L_{atm} \cdot SNR_{margin}} \cdot \sigma_0 \cdot S_{MNT}} \quad (64)$$

Où S_{MNT} = surface de la facette (1 m x 1 m dans nos simulations actuelles, le pas du MNT étant ici 1 m), en rappelant que l'on somme les facettes sur la cellule de résolution brute (kilométrique).

Pour le signal L0, la convolution par le Chirp est faite à la fin de la simulation afin de gagner en temps de calcul. Aussi, la formule suivante est plus adaptée à la simplification de la simulation L0 :

$$A_{L0_bis} = \sqrt{\frac{P_t}{L_{Tx}} \cdot G_{ant}^2 \cdot \frac{c^2}{(4\pi)^3 \cdot f_0^2 \cdot R^4 \cdot L_{atm} \cdot SNR_{margin}} \cdot \sigma_0 \cdot S_{MNT} \cdot G_{range}} \quad (65)$$

Les contributions des différentes facettes sont sommées pour former les images brutes. Celles-ci peuvent ensuite être bruitées, à partir du terme de puissance de bruit thermique défini dans l'équation radar.

$$P_{bruit} = K_B \cdot T_{eq} \cdot B_{noise} \quad (66)$$

La Température équivalente de bruit, T_{eq} , est dépendante de paramètres de pertes et du facteur de bruit de la chaîne de réception ainsi que des températures de l'antenne et de l'électronique.

A partir de cette puissance, on détermine une distribution gaussienne de bruit blanc centrée en 0 et d'écart type $\sqrt{\frac{P_{bruit}}{2}}$ que l'on ajoute à nos images, à la fois sur les parties réelles et imaginaires du signal, de manière indépendante. Ce bruit est ajouté aux images maîtres et esclaves, là aussi indépendamment suivant pour chaque image.

3.3.2.3.2. Modélisation du signal L1

Pour simuler une image L1, comme cela a été présenté précédemment, des gains de compression en azimut et distance sont introduits. La surface équivalente totale après la sommation reste inchangée. La formule suivante peut être utilisée pour l'amplitude :

$$A_{L1} = \sqrt{\frac{P_t}{L_{Tx}} \cdot G_{ant}^2 \cdot \frac{c^2}{(4\pi)^3 \cdot f_0^2 \cdot R^4 \cdot L_{atm} \cdot SNR_{margin}} \cdot \sigma_0 \cdot S_{MNT} \cdot G_{range} G_{azi}} \quad (67)$$

Avec les gains en compression azimut et distance :

$$G_{range} = f_e \cdot T_{pulse} \quad (68)$$

$$G_{azi} = \frac{R \cdot \lambda \cdot B_{dop} \cdot f_{PRF}}{2 \cdot V_{sat} \cdot V_{sol}} \quad (69)$$

En simulation L1, la fréquence d'échantillonnage est choisie à 200 MHz, telle qu'elle serait observée après filtrage et focalisation. De la même façon, le bruit est également simulé directement avec une bande à 200 MHz.

Les contributions des différentes facettes sont sommées pour former les images SLC. Les pixels de l'image SLC peuvent ensuite être bruités, à partir du terme de puissance de bruit thermique défini dans l'équation (66). De la même façon qu'en simulation L0, on détermine une distribution gaussienne de bruit blanc centrée en 0 et d'écart type $\sqrt{\frac{P_{bruit}}{2}}$ que l'on ajoute à la fois aux parties réelles et imaginaires du signal, de manière indépendante, et également de manière indépendante aux images SLC maîtres et esclaves.

3.3.2.4. APPLICATION DES REPONSES IMPULSIONNELLES AUX SIMULATIONS L1

Lors d'une simulation L1, la réponse de chaque pixel est assimilée au départ à un Dirac parfait sur chaque case. L'étalement lié au traitement de focalisation SAR n'est pas représenté de manière réaliste, on a un spectre blanc sur les images, à la fois dans la direction distance (correspondant au traitement de compression d'impulsion) et dans la direction azimut (correspondant au traitement de focalisation SAR-Doppler). Pour parvenir à une représentation fréquentielle plus réaliste, il convient de convoluer nos images avec les réponses impulsionnelles azimut et distance réalistes. Une première approche consiste à modéliser la réponse impulsionnelle comme un simple sinus cardinal, c'est-à-dire une porte rectangulaire de largeur correspondant à la résolution en représentation spectrale.

On peut également adopter des réponses impulsionnelles plus représentatives vis-à-vis de KaRIn, en prenant les réponses impulsionnelles réelles (Figure 27). Ainsi, dans le cas de l'axe distance, la bande d'échantillonnage (300 MHz) étant élevée vis-à-vis de la bande du Chirp (200 MHz), des opérations de filtrage permettent d'aboutir à une réponse impulsionnelle où les lobes secondaires sont plus bas que dans le cas d'un sinus cardinal.

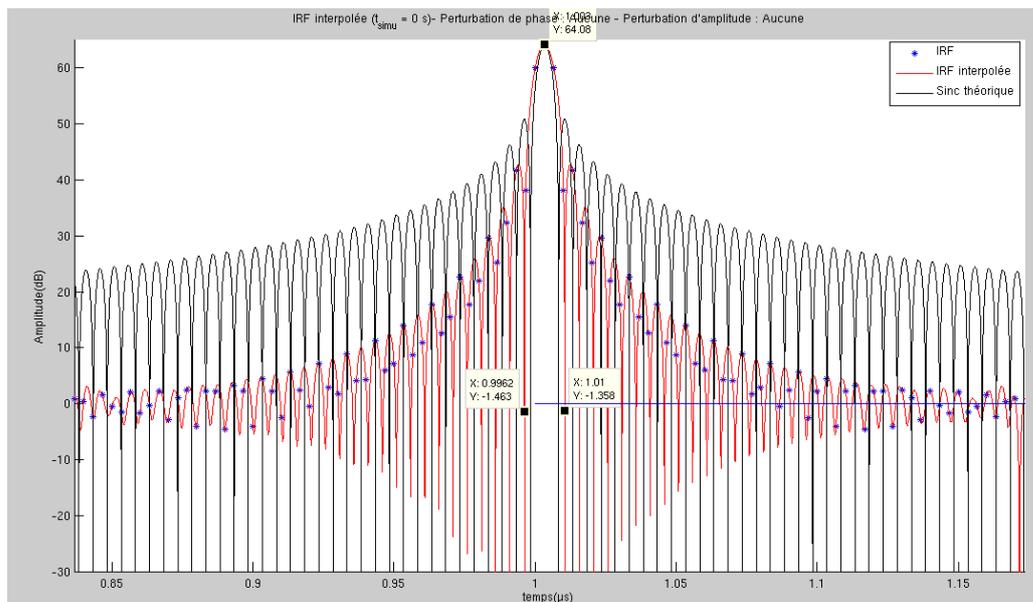


Figure 27 : Réponse impulsionnelle en azimut du signal KaRIn HR

Visuellement, sur les images, l'application de ces diagrammes se traduit par un léger étalement de l'information sur les pixels voisins. Dans l'axe azimut en particulier, où l'échantillonnage simulé est différent de la résolution instrumentale, on peut noter une différence dans les images SLC, celles-ci étant légèrement floutées lorsque cette étape est effectuée.

3.3.2.5. MODELISATION DE LA RETRODIFFUSION

La prise en compte de la radiométrie est un élément important des simulations. Elle affecte le niveau de signal, le SNR et ainsi les performances altimétriques de SWOT. De plus, le contraste radiométrique entre les différents milieux est l'élément majeur dans l'étape de détection des surfaces d'eau. Enfin, les pixels touchés par le layover, à la fois provoqué par les berges ou par la végétation, sont également sensibles aux effets radiométriques.

Au niveau de la gestion des zones d'eau ou de sol, une approche surfacique est retenue. En fonction du milieu du terrain de chaque pixel du MNT, déterminé par un masque d'occupation du sol, on applique un modèle de rétrodiffusion, qui est fonction de plusieurs paramètres. Dans la plupart des modèles utilisés dans nos simulations, le seul paramètre qui varie pour des facettes du même milieu est son incidence locale. Les autres paramètres, rugosité, salinité, etc. sont actuellement supposés constants au sein d'une même classe. Différents modèles sont utilisables : des modèles simples, basés sur un σ_0 constant ou avec une variation simple en incidence ($\sigma_0 \cos\theta$), ou des modèles plus physiques utilisant plusieurs paramètres (modèles de Kirchhoff). Une fois la caractérisation de la rétrodiffusion surfacique déterminée, on peut pré-calculer celle-ci dans des abaques en fonction de l'incidence locale, afin de faciliter les simulations et d'en réduire le temps de calcul.

Contrairement au sol et à l'eau où l'approche est purement surfacique, il faut envisager pour certains milieux, notamment la végétation, une approche volumique. Plusieurs options sont possibles : modéliser quelque chose d'aussi complexe que peut l'être un couvert de végétation peut s'avérer très différent suivant le niveau de réalisme souhaité. Il faut en particulier restituer correctement le contraste désiré en entrée des simulations. Dans le cadre de la thèse de Christine Lion [Lion-2013], pour l'étude du simulateur scientifique SWOT, des méthodes basées sur du calcul direct par intégration volumique ont été développées et sont explicitées ici :

On considère alors la zone de végétation comme un milieu volumique tandis que l'eau (ou le sol) reste une zone surfacique. A partir de l'équation 59, on peut définir l'énergie rétrodiffusée par l'eau comme :

- pour l'eau :

$$E_{eau} = A^2 S \sigma_{0\ eau} \quad (70)$$

Où :

E_{eau} : Énergie rétrodiffusée par l'eau

A : Facteur constant dans l'équation radar

S : Surface du contributeur

$\sigma_{0\ eau}$: Coefficient surfacique de rétrodiffusion de l'eau

- pour la végétation :

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

$$E_{veg} = A^2 S \int_0^{h_{arbres}} \sigma_{0\ veg\ vol} exp^{-\alpha z} dz \quad (71)$$

σ_{0veg} : Coefficient de rétrodiffusion volumique de la végétation

z : Altitude locale d'un contributeur

α : Coefficient de pénétration dans la végétation

$$E_{veg} = A^2 S \sigma_{0\ veg\ vol} \frac{1 - exp^{-\alpha h_{arbres}}}{\alpha} = A^2 S \sigma_{0\ veg\ vol} h_{eq} \quad (72)$$

h_{eq} : Hauteur équivalente des arbres

On obtient alors un modèle en amplitude dépendant également de la pénétration dans notre milieu, et non pas un modèle purement surfacique.

Une autre approche consiste à considérer que la modélisation en amplitude des émetteurs situés dans les zones de végétation peut être déjà évaluée en prétraitement de la même façon que pour les surfaces. Les classes de végétation disposent d'une rétrodiffusion surfacique, pouvant être calculée à partir de différents modèles. Cependant, il faut ajouter une contribution géométrique, affectant la phase, pour représenter les effets de pénétration dans le milieu. Dans le cas de nos simulations, la modélisation choisie consiste à considérer qu'un faisceau radar va pénétrer de manière plus ou moins importante dans le couvert des arbres et être réfléchi lors du contact avec un obstacle. Selon cette pénétration, le rayon sera réfléchi plus ou moins tôt dans la zone de végétation. La méthode présentée a donné des résultats équivalents à l'approche volumique.

La méthode développée dans le simulateur consiste à « tirer » aléatoirement (tirage uniforme ou exponentiel suivant les options) le point situé dans la végétation entre son altitude MNT «au sol » et une hauteur définie comme celle du sommet de la couverture des arbres. On détermine ensuite la profondeur de pénétration parcourue dans la végétation et on modifie en conséquence la position du point de réflexion et le trajet radar associé. De cette façon, on détermine l'effet géométrique (sur la phase) du milieu volumique. On peut en première approximation considérer qu'il s'agit d'un tirage aléatoire uniforme entre le sol et la hauteur définie pour les arbres. Ce modèle est cependant moyennement réaliste, et peu en accord avec notre modèle en amplitude, dépendant d'un facteur de pénétration. Il est donc plus réaliste de considérer que l'onde émise par le satellite a plus de chance d'être réfléchi près du sommet des arbres plutôt qu'au sol, on modélise alors une loi de pénétration suivant une loi exponentielle, notre point se retrouve ainsi à une altitude :

$$h = Z_{mnt} + h_{arbres} - l_{péné} \quad (73)$$

Avec Z_{mnt} l'altitude du MNT, h_{arbres} la hauteur moyenne des arbres, et $l_{péné}$ la profondeur de pénétration dans le couvert végétal

En procédant ainsi, la pénétration dans la végétation est gérée en amont dans le calcul de la position de l'émetteur. Cette loi exponentielle donnant la longueur de pénétration peut être modélisée ainsi :

$$l_{péné} = -\frac{\ln(x)}{\alpha} \quad (74)$$

x : tirage aléatoire entre 0 et 1

Cependant, cette méthode peut également donner des points « sous le sol », notamment si le coefficient de pénétration n'est pas assez faible vis-à-vis de la hauteur des arbres. Dans ce cas, on peut refaire un tirage aléatoire du point jusqu'à ce que $l_{péné}$ soit inférieure à h_{arbres} , ce qui revient à décaler et normaliser l'exponentielle. Ainsi, le sol est considéré comme infiniment absorbant.

On peut également, et c'est la solution développée dans ce simulateur (Figure 28), considérer que si la pénétration est plus importante que la hauteur des arbres, le rayon est réfléchi au sol. Dans ce cas, le point est traité exactement comme un point identifié « sol » présentant une rétrodiffusion surfacique du type du sous-sol en question. On pourrait également l'identifier comme un point d'eau (en cas d'inondation par exemple) suivant les masques d'entrée utilisés. Pour réduire la complexité et le temps de calcul, l'aspect aller-retour du trajet de l'onde est modélisé par un unique tirage équivalent.

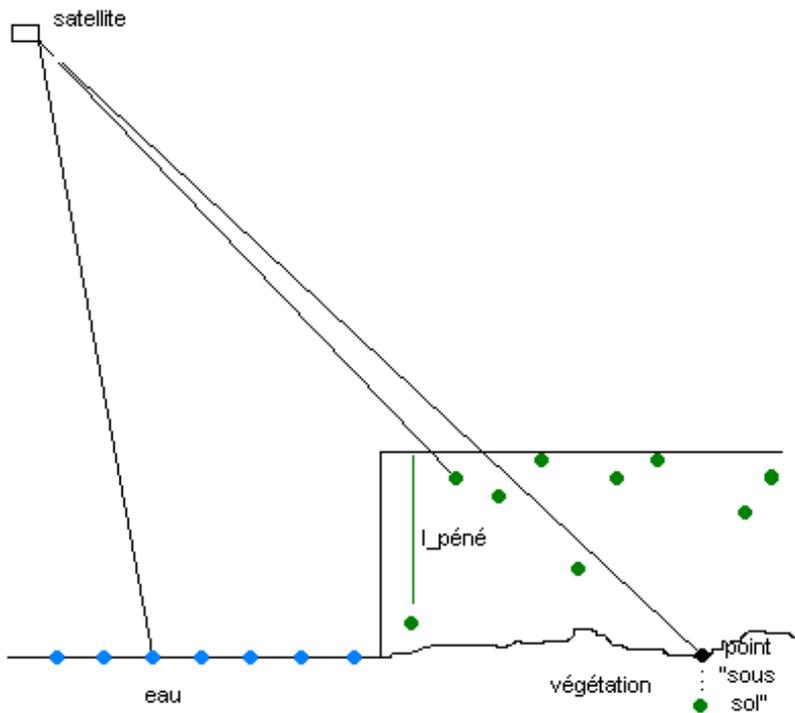


Figure 28 : Principe de la modélisation de la végétation

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

On remarque sur ce schéma que la longueur de pénétration considérée verticale n'est pas en réalité la véritable longueur parcourue par le rayon dans le couvert végétal.

Toutefois dans le cas de SWOT où l'angle d'incidence est proche du nadir (0.6° à 4°), on peut assimiler les deux longueurs. Grâce à ces choix de simulations, et au nombre important de contributeurs interagissant dans une cellule radar, il est possible de modéliser de façon réaliste les pertes de corrélation due à la végétation. Afin de valider en détail les modèles utilisés, à la fois en termes de radiométrie et de décorrélation, des analyses et comparaisons avec les données AirSWOT seront réalisées dans le futur.

Plus généralement, les objectifs dans la gestion du masque d'occupation du sol (land-cover) pour le simulateur sont :

- La paramétrisation de multiples définitions de milieux radiométriques.
- La gestion simple et ergonomique des fichiers paramètres pour chaque milieu.
- La possibilité d'introduction de nouvelles « classes » de milieux et de nouvelles fonctions de calcul radiométrique.
- L'utilisation d'un fichier unique de land-cover.

L'idée principale est de pouvoir modéliser différents milieux à partir des classes (Eau, Sol, Végétation) et modèles (Kirchhoff, cosinus_dB, etc.) implémentés uniquement par ajout de nouveaux fichiers de paramètres associés au label correspondant sur le masque. Les modifications du code interviennent alors seulement dans le cas de l'ajout d'une nouvelle classe (par exemple Neige), ou modèle (utilisation d'un nouveau modèle de radiométrie, de modélisation volumique, etc.).

On procède de la façon suivante :

- Définition de classes générales : les classes principales de base retenues sont :
 - o Sol
 - o Eau
 - o Végétation
- Chaque classe doit contenir tous les outils nécessaires à la production des différents milieux simulés, chacun appartenant à l'une des 3 classes principales. Ainsi on peut produire :
 - o Des vignes (provenant de la classe Végétation)
 - o Des routes (provenant de la classe Sol)
 - o Des haies (provenant de la classe Végétation)
 - o Etc.
- Chacune des classes doit contenir les différents modèles de calcul radiométriques et géométriques pouvant être choisis par l'utilisateur :

- Calcul par $\sigma_0 \cdot \cos(\theta_{loc})$
 - Kirchhoff
 - Pas de modèle géométrique particulier (surface)
 - Modélisation exponentielle de la végétation
 - Etc...
- Certaines de ces méthodes peuvent éventuellement être communes.
 - Lors de la création d'un nouveau type de land cover, seuls des fichiers de paramètres sont à modifier :

Pour chaque milieu différent modélisé, le fichier de paramètres correspondant comprend :

- Le nom du milieu (indication utilisateur)
- Le label
- La classe à laquelle appartient le milieu
- Le modèle employé pour le calcul de la radiométrie
- Les paramètres nécessaires répartis en paramètres radiométrie (σ_0) et géométrie (phase).
- Dans le cas de la végétation : un paramètre pointant vers une classe définissant le milieu qui se trouve sous la couche de végétation (du sol, de l'eau ou éventuellement une autre classe de végétation).

Afin d'augmenter le réalisme des scènes simulées, en particulier de l'eau, des perturbations supplémentaires consistant à faire varier les paramètres à l'intérieur d'une même classe peuvent être introduites. L'objectif est d'ajouter des perturbations locales aléatoires sur la radiométrie, mais néanmoins corrélées spatialement. Ceci se fait au prix d'une complexité accrue des simulations.

3.3.2.6. GENERATION DE DONNEES BRUTES A PARTIR D'IMAGES SLC SIMULEES

La simulation de données brutes pouvant être très longue, il est possible de fabriquer des pseudo-données brutes à partir de données simulées focalisées. Pour cela, on simule directement des SLC (produits L1) représentant des données focalisées à Doppler 0, c'est-à-dire vues lors du passage au plus proche du satellite, puis on défocalise ensuite celles-ci. Cette défocalisation peut être faite en deux étapes : la défocalisation en azimuth et celle en distance. Le temps d'intégration en distance (durée du Chirp) étant court comparé au temps en azimuth ($1/PRF$), on peut considérer que l'ensemble plateforme/océan est immobile pendant la durée du Chirp distance et ainsi découpler les deux directions.

Pour cela, on peut identifier plusieurs opérations :

- FFT du signal d'entrée focalisé dans la direction azimuth
- Multiplication par une rampe de phase (Inverse Replica Matrix) qui est l'inverse de la rampe de phase correctrice utilisée dans le traitement de compression azimuth conventionnel

3.3 Outils de simulation mis en place pour les développements algorithmiques de SWOT

- Application des migrations en distance
- IFFT du signal fréquentiel
- FFT du signal d'entrée focalisé dans la direction distance
- Multiplication du signal par la rampe du Chirp
- IFFT du signal fréquentiel

Pour produire la rampe de phase en azimut, on fabrique une rampe fréquentielle de 0 à 1 échantillonnée à la taille azimut de l'image d'entrée (Figure 29). En raison des mécanismes de normalisation de FFT qui donnent la réponse du signal entre 0 et 1, avec la phase centrale à 0.5, il faut recentrer notre rampe fréquentielle réduite f_r ainsi :

$$f_r = f - \text{nint}(f) \quad (75)$$

Où f est la fréquence normalisée du signal, calculée à partir du nombre d'échantillon en azimut.

On obtient ensuite la rampe de phase (Figure 30) comme étant :

$$\varphi = \pi \cdot N_a \cdot f_r^2 \quad (76)$$

avec N_a étant le taux de compression azimut (cf. 3.4.2.4).

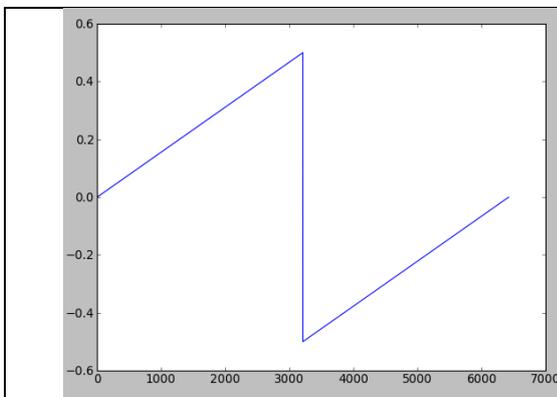


Figure 29 : Rampe fréquentielle décalée

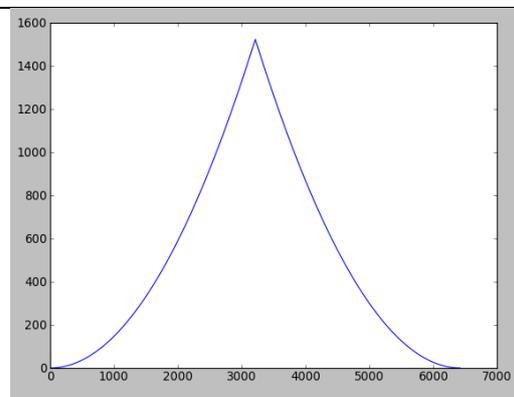


Figure 30 : Rampe de phase

Dans le cas où l'on souhaiterait simuler un Doppler non nul f_{dop} , on modifie la rampe de phase en conséquence :

$$f_r = (f + f_{dop}) - \text{nint}(f + f_{dop}) \quad (77)$$

En bord d'image, les pixels ne sont pas correctement défocalisés : il faut donc couper de part et d'autre $N_a/2$ cellules radar dont l'information est incomplète. On procède de même en distance. Il faut noter que certains phénomènes ne peuvent pas être pris en compte avec cette façon de simuler. En particulier, le non-alignement des spectres en distance entre les deux images et les éventuels mouvements des scènes (par exemple les vagues) ne peuvent pas être modélisés correctement.

Cette étape n'est pas une étape de traitement, mais constitue une manière rapide pour produire des données brutes relativement représentatives pour être utilisées par la suite pour valider certains algorithmes de traitement SAR.

3.4. TRAITEMENT INSAR DES DONNEES KARIN/SWOT EN MODE HR

Le traitement des données SWOT en mode HR sur les continents est, hormis une simple présomption réalisée à bord, une chaîne de traitement sol interférométrique allant de la focalisation des données brutes jusqu'aux produits de hauteurs géolocalisées. La Figure 31 présente le diagramme de la chaîne de traitement sol HR, en fonction du niveau de maturité de chaque étape de traitement. Dans cette section, nous résumerons brièvement celui-ci, en détaillant les différents algorithmes permettant de focaliser les données et de produire les interférogrammes qui seront ensuite déroulés, inversés et transformés en produits finaux. La méthodologie et l'architecture de traitement développées pendant la thèse se basent sur un traitement de type SAR Doppler fréquentiel. D'autres méthodes, en particulier basées sur une approche par traitement temporel, sont également possibles pour traiter les données SWOT. Les méthodes décrivant les étapes suivantes du traitement et notamment les problématiques d'inversion phase-hauteur seront décrites dans le chapitre suivant.

3.4 Traitement InSAR des données KaRIn/SWOT en mode HR

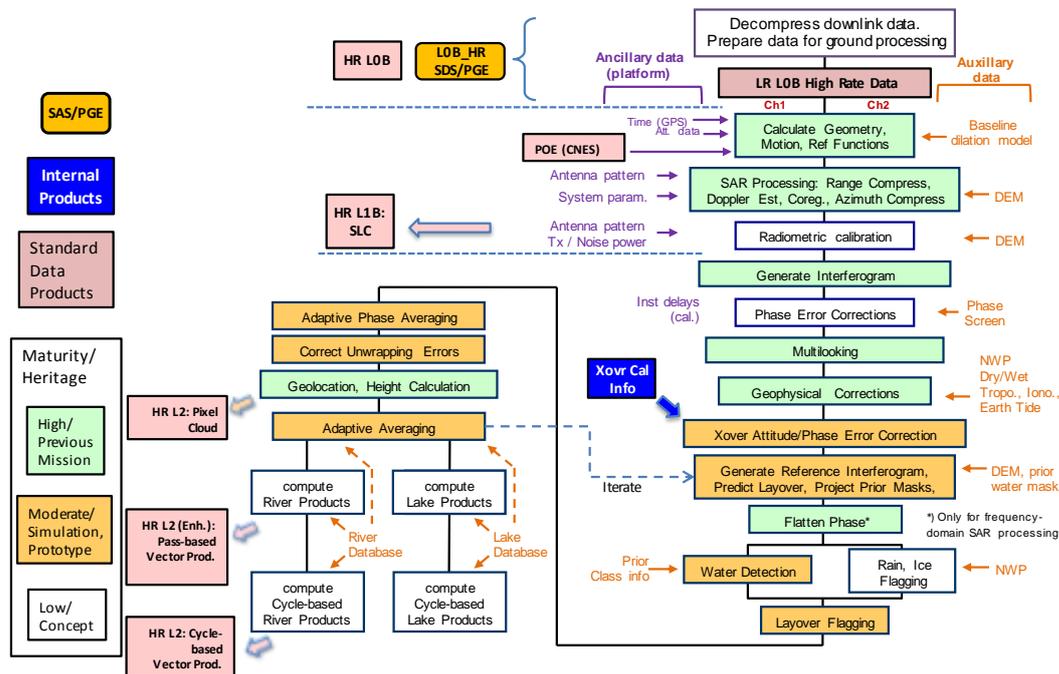


Figure 31 : Chaîne de traitement HR pour la mission SWOT

3.4.1. PRESOMMATION

Dans le but de diminuer le débit de télémesure, une étape de présomption bord est prévue dans le mode HR, ce qui réduira d'un facteur 2 environ la quantité de données à descendre au sol. De manière simplifiée, la présomption revient à moyenner de façon cohérente, colonne par colonne, les amplitudes complexes de N lignes consécutives de l'image brute pour créer une ligne dans l'image brute présommée. En pratique, notamment pour les cas complexes où le facteur de présomption n'est pas entier (par exemple 2,1), on peut procéder différemment :

- Suréchantillonnage de données brutes par Zero-padding.
- Filtrage avec un filtre RIF (Réponse impulsionnelle finie) adapté un facteur de présomption souhaité.
- Décimation des données jusqu'à l'échantillonnage final.

En effet, le facteur de présomption, pour des raisons d'optimisation en terme de compromis débit de télémesure / précision altimétrique, peut ne pas être un facteur entier.

Dans le cadre de nos simulations, on effectue ce traitement soit sur les données brutes, soit sur les données SLC (comme une approximation).

Au niveau des conséquences associées en termes de performance, on réduit la quantité de données d'un facteur N, ce qui affectera directement la précision altimétrique lors du moyennage à surface constante, le nombre de vues pouvant être sommé étant réduit. Cependant, le rapport signal à bruit est augmenté par la présomption, ce qui diminue l'erreur associée à chaque pixel. Ceci est dû au fait que lors de la

présommation, on élimine la partie du spectre où le signal est relativement faible (Figure 32), tandis que le bruit lui est constant, ce qui augmente ainsi le SNR. A noter que malgré ces deux éléments opposés, le bilan total reste toujours défavorable entre un traitement avec présommation et un sans celle-ci.

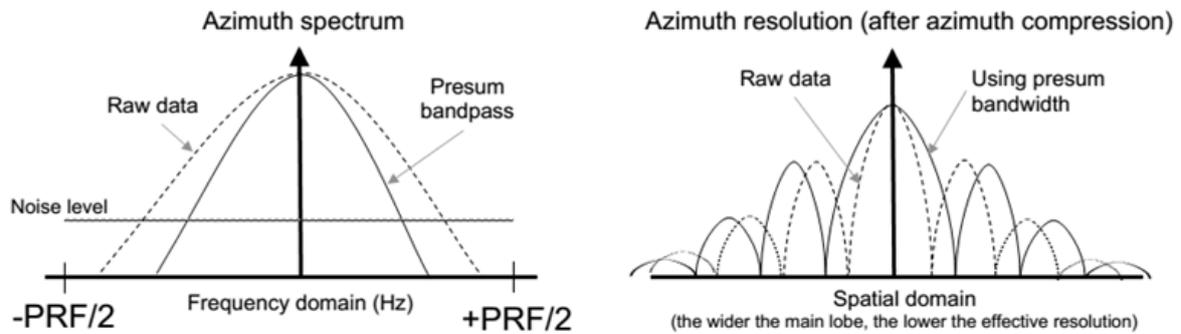


Figure 32 : Principe du filtrage de la présommation : augmentation du SNR

Pour la détection des surfaces d'eau, la présommation ne réduit pas le bruit de speckle, mais diminue le nombre de lignes disponibles pour être moyennées, ce qui dégrade les performances pour détecter les structures les plus fines. Cependant, le gain en SNR peut parfois favoriser la détection : le niveau de signal plancher venant du bruit thermique descend, ce qui peut augmenter le contraste eau/terre (ou eau/bruit thermique). La Figure 33 montre l'effet de différents niveaux de présommation sur l'image d'amplitude utilisée lors de l'étape de détection de surface d'eau.

3.4 Traitement InSAR des données KaRIn/SWOT en mode HR

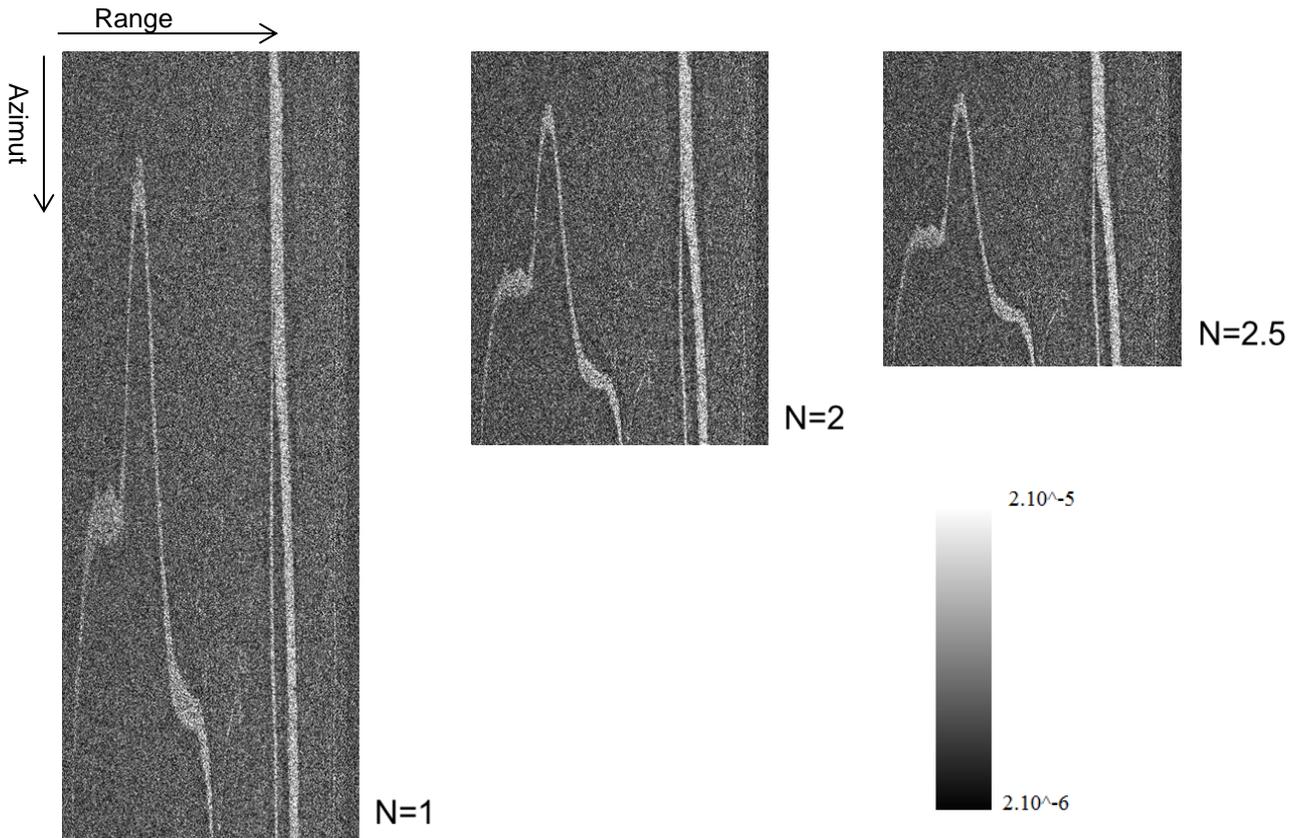


Figure 33 : Simulations d'intensités avec SNR représentatif (sans marge système) et σ_0 eau ~ 10 dB, sans prise en compte d'une éventuelle décorrélation des surfaces d'eau

3.4.2. LE TRAITEMENT SAR

Les données HR transmises par le satellite sont des données brutes, non focalisées. Le traitement SAR a pour objectif de focaliser ces données afin d'en accroître la résolution. Avant de générer des produits interférométriques, une étape de d'alignement géométrique des deux prises de vues (coregistration) est nécessaire. Les caractéristiques géométriques de SWOT permettent une approche différente de ces étapes par rapport aux missions classiques antérieures, avec notamment des approximations géométriques permettant de simplifier certains traitements. Les différentes étapes du traitement de focalisation SAR sont présentées sur la Figure 34.

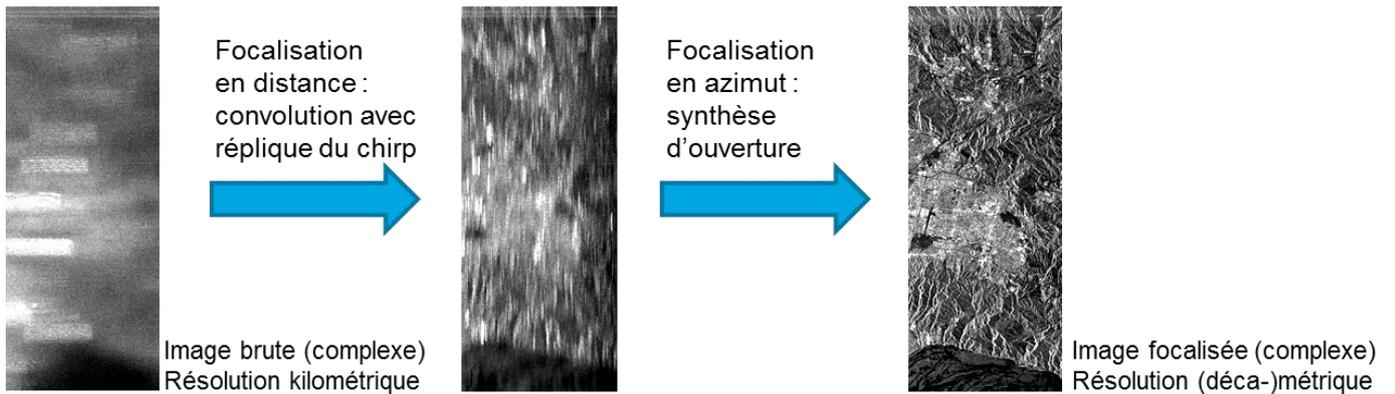


Figure 34 : Principales étapes du traitement de focalisation SAR

3.4.2.1. COMPRESSION EN DISTANCE

Comme décrit dans le chapitre 1, les données brutes sont modulées en fréquence dans la direction de la fauchée. Le traitement sol permettant de focaliser ces données en distance consiste à convoluer l'image avec la réplique du Chirp. Pour des raisons d'efficacité en termes de temps de calcul, ce traitement est généralement réalisé dans le domaine fréquentiel, en multipliant le spectre du signal par celui de la réplique, et en repassant ensuite dans le domaine temporel. Le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel se fait grâce à l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT). Cette opération est appelée filtrage adapté. Suivant l'opération de filtrage appliqué, la réponse impulsionnelle des cibles présentera des caractéristiques différentes, permettant de diminuer l'énergie des lobes secondaires, au détriment d'une perte en résolution.

Dans notre prototype, la compression distance se fait par multiplication dans le domaine fréquentiel du spectre distance du signal (cf. 2.3.4.1) par une rampe de la forme suivante [Mass-2008]:

$$H_{comp}(f_{r,d}) = e^{j.\pi G_{dist} f_{r,d}^2} \quad (78)$$

Avec : $G_{dist} = \frac{f_d^2 T_c}{B}$

B étant bande du Chirp, et T_c la durée de l'impulsion, et $f_{r,d}$ la fréquence réduite en distance telle que $f_{r,d} = \frac{f}{f_d}$, f étant la fréquence du signal et f_d la fréquence d'échantillonnage.

3.4.2.2. CORRECTION DES MIGRATIONS EN DISTANCE

La compression en azimuth ne peut être réalisée qu'après avoir corrigé le phénomène des migrations en distance. Les migrations en distance des contributions d'une cible dans les données brutes sont dues au fait que la distance entre l'antenne et un point du sol imagé varie lors de l'éclairage de ce point par le radar pendant son déplacement en azimuth. En effet le numéro de pixel en distance d'une contribution donnée est fonction de la distance satellite cible, qui, elle, est fonction de la position en azimuth du satellite.

L'expression générale des migrations exprimée en nombre de pixels est donnée par:

$$M(k) = \frac{\Delta D(k)}{c/2f_d} \quad (79)$$

Où k est l'indice de ligne, $\Delta D(k)$ la variation de distance d'un point pour une impulsion donnée k par rapport à sa position au passage au plus près.

La variation de phase vaut :

$$\varphi(k) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta D(k) \quad (80)$$

Les migrations exprimées en fonction de la phase valent alors :

$$M(k) = \frac{\varphi(k) \cdot \lambda \cdot f_d}{2\pi c} \quad (81)$$

Or (cf. 2.3.4.2) :

$$\varphi(k) = \frac{\pi}{N_a} k^2 \quad (82)$$

Avec N_a le taux de compression azimuth.

$$N_a = \frac{\lambda R_0 f_{PRF}^2}{2V_{sat}^2} \quad (83)$$

D'où :

$$M(k) = \frac{1}{N_a} \frac{\lambda f_d}{2c} k^2 = \frac{F_{mig}}{N_a} k^2 \quad (84)$$

avec $F_{mig} = \frac{\lambda f_d}{2c}$ le facteur de migration.

En pratique, pour appliquer la correction des migrations, on passe dans le domaine fréquentiel dans la direction azimut, par FFT.

On applique ensuite une rampe de phase correctrice tel que :

$$\varphi_{mig}(f_{r,a}) = 2\pi F_{mig} N_a f_{r,a}^2 f_{r,d} \quad (85)$$

Où $f_{r,d}$ est la fréquence réduite azimut entre -0.5 et 0.5.

A noter que dans le cas d'un Doppler d'acquisition non nul, il faut en tenir compte dans la méthodologie, la compensation de la partie parabolique des migrations ne suffisant plus.

Une fois les migrations compensées, on pourrait focaliser en azimut nos images. Cependant, dans le cas de SWOT, il est possible d'effectuer à ce niveau la coregistration de nos deux images radar. En effet, les caractéristiques géométriques de SWOT font que le décalage entre chaque vue est faible, et qu'il peut être estimé de façon purement géométrique de manière suffisamment précise sans procéder aux techniques classiques de corrélation d'images afin de garantir la parfaite superposition des deux images.

3.4.2.3. COREGISTRATION GEOMETRIQUE DES IMAGES

Avant de calculer le produit interférométrique, les deux images issues des deux antennes doivent être coregistrées, c'est-à-dire rendues superposables. En effet, le décalage entre l'antenne maîtresse et l'antenne esclave induit une différence entre la zone observée par chacune des deux antennes. Dans le cas de SWOT, la différence maximale entre les chemins retour d'un point au sol vers les deux antennes est de :

$$\Delta R_{max} = \Delta R_{\theta=3.9^\circ} = B \sin(\theta = 3.9^\circ) = 0.68 \text{ m} \quad (86)$$

Avec un traitement simple, et l'application d'un délai constant sur les images, les images coregistrées au centre du mât présentent un décalage résiduel qui est tout de même de 0.34 m, important vis-à-vis de la résolution distance de 0.75 m et qui dégrade les produits interférométriques. Malgré cela, ce décalage est relativement faible comparativement à d'autres missions SAR comme ERS ou SRTM pour lesquelles les décalages sont de l'ordre de plusieurs pixels [BamI-1998].

En interférométrie, la coregistration se fait généralement en deux étapes : un recalage grossier des images (pixellique) estimé à partir de la différence entre les deux orbites et d'un modèle numérique de terrain moyen [Li-1990], suivi d'un recalage sub-pixellique obtenu par corrélation entre les deux images, une fois celles-ci focalisées. On estime que pour obtenir une qualité interférométrique suffisante, il faut avoir recalé les deux images avec une précision inférieure au dixième de pixel.

3.4 Traitement InSAR des données KaRIn/SWOT en mode HR

Dans le cas de SWOT, les caractéristiques orbitales, la visée proche-nadir, et la base interférométrique quasi-constante rendent le décalage de coregistration entre les deux images faible. Il est ainsi possible d'estimer par simple géométrie, en utilisant un modèle numérique de terrain de référence, un décalage suffisamment précis pour pouvoir coregistrer les images sans corrélérer celles-ci entre elles. Le décalage étant estimé sans corrélation des images traitées, il est possible d'appliquer l'étape de coregistration avant la focalisation des images en azimuth, après le traitement de focalisation distance. Plusieurs choix de traitements sont possibles pour coregistrer les images : géométrie commune à l'une des deux antennes (maîtresse ou esclave) ou bien coregistration au centre du mât. Dans notre simulateur, les images sont coregistrées sur l'image maîtresse (antenne émettrice). On pourrait aussi choisir de coregistrer les images au centre du mât, comme dans le simulateur CNES/CLS/Altamira. Dans ce cas, de par les caractéristiques géométriques de visée et d'acquisition, l'antenne de réception se retrouve directement coregistrée.

Dans notre cas, on procède de la manière suivante. Pour chaque porte distance, on calcule la différence de trajet entre le signal maître et le signal issu de l'image esclave, en utilisant un MNT de référence. Un modèle très lissé, voire constant, présente également des résultats suffisamment bons pour atteindre la précision voulue sub-pixellique. Une fois le décalage calculé, on procède au ré-échantillonnage en distance de la SLC esclave, dans le domaine fréquentiel afin de recaler celle-ci sur la géométrie de l'image maîtresse.

L'avantage de ce traitement vis-à-vis de l'approche classique est un fort gain de temps. Le procédé peut être introduit dans le traitement radar, avant la focalisation azimuth, de manière à minimiser les calculs de transformée de Fourier. De plus, l'étape de corrélation entre les deux images, souvent critique et très sensible au bruit thermique, peut être évitée. La corrélation peut en revanche être utilisée pour vérifier la qualité de la coregistration géométrique (et pour l'améliorer si nécessaire).

3.4.2.4. FOCALISATION AZIMUT

3.4.2.4.1. Dans le domaine fréquentiel (Range-Doppler)

La compression azimuth est effectuée dans le domaine fréquentiel. Les données avant focalisation sont passées dans le domaine de Fourier, puis multipliées par la réplique azimuth de la forme (cf. 2.3.4.2) :

$$H(f_{r,a}) = \exp^{\pi N_a f_{r,a}^2} \quad (87)$$

Avec :

$$N_a = \frac{\lambda R_0 f_{PRF}^2}{2V_{sat}^2} \quad (88)$$

Dans le cas d'une image présentant un Doppler d'acquisition non nul, provenant d'un effet d'attitude de la plateforme, d'une mauvaise compensation de la rotation de la Terre, etc., le Doppler estimé doit être compensé lors de cette étape si l'on souhaite focaliser les données à un Doppler nul. Dans ce cas, la fréquence réduite azimuth est modifiée, en fonction du décalage Doppler.

3.4.2.4.2. Dans le domaine temporel

Une autre option de focalisation consiste à la réaliser dans le domaine temporel. L'intérêt de celui-ci réside dans une robustesse aux trajectoires instationnaires plus importante. De plus, elle offre la possibilité de simplifier une partie des étapes du traitement SAR, de la coregistration au déroulement de phase, en contrepartie d'une imbrication plus forte des étapes et de possibilités de validation et de retraitement plus complexes. De plus, la focalisation dans le domaine temporel est lourde en temps de calcul, nécessitant une architecture logicielle adaptée.

Dans le cas d'une focalisation dans le domaine temporel, le phénomène de migration distance est directement géré lors de la focalisation et cette opération ne nécessite pas d'être effectuée avant. La focalisation dans le domaine temporel [Albe-1991] est une approche particulièrement utilisée en aéroporté, où la trajectoire de l'antenne peut avoir des variations importantes, tout en pouvant être restituée avec précision. Dans ce cas, les hypothèses de linéarité du domaine fréquentiel ne sont plus respectées et des erreurs de focalisation importantes peuvent apparaître si les mouvements et l'attitude de l'avion ne sont pas compensés. De la même façon que dans le domaine fréquentiel, il est possible de focaliser les images directement dans la même géométrie et de remplacer ainsi l'étape de coregistration. Une connaissance précise de l'orbite et de l'attitude est nécessaire lors de cette étape afin de limiter les erreurs de focalisation.

Le traitement temporel utilise directement la connaissance de la trajectoire, point à point, et d'un MNT de référence pour focaliser chaque pixel. Ici, l'image est supposée déjà focalisée en distance. Le calcul de l'historique Doppler $R_{i,m}$ de chaque pixel M que l'on focalise, est obtenu à partir de la trajectoire et d'un modèle numérique de terrain a priori (ou d'un simple géoïde). Tout d'abord, le MNT est projeté en géométrie radar à partir des caractéristiques d'acquisition et de l'orbite. On détermine de cette façon une grille de coordonnées pour chaque pixel radar que l'on cherche à focaliser. Le choix de la grille dépend de la géométrie de restitution désirée. On peut choisir de conserver la grille de la géométrie radar (en Range/Doppler) ou projeter sur une grille régulière de type lat/long.

Dans un second temps, pour chaque pixel de la grille, on calcule la distance $R_{i,m}$ et la phase associée $\phi_{i,m}$, le long de l'historique Doppler composé des N pulses. On détermine alors la case distance fractionnaire associée à chaque pulse par interpolation linéaire 2D entre les cases correspondantes. Il est aussi possible d'interpoler les données brutes pour améliorer la qualité des résultats. On obtient ensuite le pixel focalisé comme étant :

$$S_1(m) = \sum_{i=0}^N raw_{master}(R_i, m) e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} 2.R_{i,master}} \quad (89)$$

3.4 Traitement InSAR des données KaRIn/SWOT en mode HR

$$S_2(m) = \sum_{i=0}^N raw_{slave}(R_i, m) e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} R_{i, master} + R_{i, slave}} \quad (90)$$

Avec S_1 et S_2 respectivement les images complexes focalisées maîtresses et esclaves

L'interférogramme qui est ensuite généré à partir de ces données focalisées est directement « aplati », en fonction de la qualité de la grille utilisée. Autant la qualité de la grille affecte peu la focalisation, autant elle est déterminante pour la qualité du déroulement de phase, remplaçant la génération d'un interférogramme de référence (voir chapitre suivant). La Figure 35 présente le résultat d'une focalisation dans le domaine temporel sur une image SWOT simulée.



Figure 35 : Focalisation dans le domaine temporel d'une donnée brute simulée sur le site de la Camargue (images d'amplitude)

Cette technique donne des résultats précis et robustes vis-à-vis des mouvements de trajectoire, au prix d'un temps de calcul beaucoup plus important qu'avec un traitement fréquentiel. Pour des tailles d'images classiques, on observe dans nos prototypes de simulateurs une augmentation d'un facteur d'environ 30 sur la durée du traitement. Toutefois, les moyens informatiques actuels permettent aujourd'hui de développer de manière opérationnelle des traitements dans le domaine temporel, par le biais de la parallélisation des opérations. D'autres méthodes de focalisation existent, en particulier la méthode Ω, k [Milm-1993] qui permettent un compromis entre sensibilité aux déplacements de l'antenne et temps de calcul.

3.4.3. GENERATION DES PRODUITS INTERFEROMETRIQUES

A ce niveau du traitement, on génère les produits interférométriques, c'est-à-dire le produit conjugué des deux images issues des deux antennes. Le produit obtenu est appelé interférogramme complexe : son amplitude donne une information sur la radiométrie du milieu, et servira de base à la détection des surfaces d'eau. Sa phase donne une information géométrique sur la différence de trajet des ondes provenant des deux antennes. Le traitement de cette phase permettra d'obtenir les hauteurs géolocalisées des surfaces d'eau. Les produits interférométriques obtenus sont détaillés dans la section (2.3.5).

3.4.4. PROCEDE MULTIVUE EN AZIMUT

Afin de réduire le bruit de phase et de speckle sur l'amplitude, on procède à un filtrage par moyenne « multi-vues » dans la direction azimut des images, typiquement d'un facteur de 4. L'échantillonnage des images, d'environ 3 m après présomation, passe alors autour d'une dizaine de mètres. La résolution est également ainsi augmentée dans les mêmes proportions, jusqu'à une vingtaine de mètres. Ce traitement est réalisé sur l'interférogramme complexe, et sur les deux images d'intensité, afin de recalculer la nouvelle cohérence interférométrique obtenue.

On remarque ici une différence importante entre la présomation effectuée à bord et cette moyenne azimutale. La première est réalisée sur les images brutes complexes, elle permet de réduire le volume de données descendu au sol, mais ne réduit pas le speckle, contrairement à la moyenne sur les produits interférométriques. En revanche, les deux traitements, présomation et traitement multivue, ont tous deux un effet positif sur le rapport signal à bruit, augmentant celui-ci, au détriment de la résolution. En effet, le traitement multi-vue augmente directement le nombre de vues utilisé lors de la moyenne de N_{mv} , augmentant le SNR d'un ratio $\sqrt{N_{mv}}$ et affectant directement l'écart type de la phase interférométrique et l'erreur de hauteur associée. En revanche, à perte de résolution égale, une présomation d'un facteur N_{pr} procure un gain en SNR plus faible, correspondant au filtrage de la partie la plus bruitée du signal. Pour une faible valeur de présomation, le gain est conséquent, mais diminue de plus en plus si l'on accroît le facteur N_{pr} . Dans tous les cas, à résolution finale identique, le traitement multi-vue est plus favorable qu'une présomation (Figure 36).

3.4 Traitement InSAR des données KaRIn/SWOT en mode HR

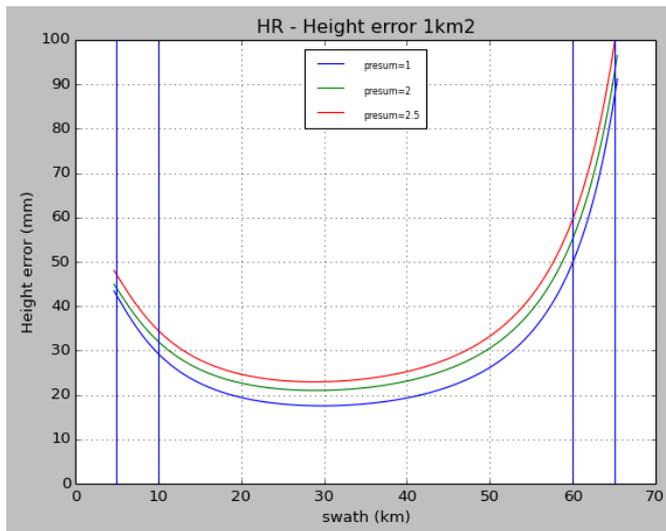


Figure 36 : Erreur de hauteur après moyenne sur 1 km² (mode HR) en fonction de la présomption appliquée

3.4.5. CORRECTION DES DELAIS DE PROPAGATION ATMOSPHERIQUE

Malgré l'utilisation de données interférométriques simultanées qui permet de négliger les perturbations liées à la traversée de l'atmosphère sur la phase interférométrique, la mesure SWOT est impactée par les effets de propagation. En effet, lors de l'inversion des hauteurs d'eau (cf. 4.3), une mesure précise du range d'émission, corrigé des effets de propagation, est utilisée pour obtenir une information de hauteur absolue. La troposphère sèche varie peu, et est déterminée à l'aide de modèles. Afin de déterminer les corrections de la troposphère humide, un radiomètre est embarqué sur le satellite [Fu-2000] [Scar-2004]. Pour le mode HR, des modèles météorologiques seront utilisés pour estimer le plus précisément possible l'impact du délai troposphérique.

3.4.6. DETECTION DES SURFACES D'EAU

La détection des surfaces d'eau est un enjeu important de SWOT, sur lequel plusieurs études ont été réalisées ou sont en cours. Dans le cadre de la thèse, les outils de simulations ont été utilisés pour générer différentes images d'entrée pour les outils de détection de surfaces d'eau. A partir des images radar d'intensité obtenues par traitement multivue des SLCs, l'objectif est dans SWOT de détecter précisément les pixels d'eau. Plusieurs catégories de méthodes sont envisagées : la classification pixellique, la classification contextuelle par régions et la détection des structures fines. De plus, ces différents outils peuvent être combinés pour exploiter leur complémentarité.

3.4.6.1. APPROCHE PIXELLIQUE

L'approche la plus simple consiste à qualifier la classe du pixel comme étant « eau » ou « non eau » par simple seuillage. Rappelons que, dans une image SAR mono-vue, l'intensité I des pixels dans une zone de réflectivité radar constante, où les variations observées sont uniquement dues au phénomène de speckle, suit une loi exponentielle que nous pouvons réécrire (cf. (8)).

$$p_I(I|R) = \frac{1}{R} e^{-\frac{I}{R}} \quad I \geq 0 \quad (91)$$

Où R est la réflectivité radar du pixel concerné

Considérons un échantillon de N pixels indépendants issus d'une zone homogène d'intensité moyenne $E[I] = R$. La moyenne arithmétique des intensités :

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k \quad (92)$$

obéit alors à une loi Gamma de moyenne R et de paramètre de forme N :

$$p_{\bar{I}}(\bar{I}|R) = \frac{1}{\Gamma(N)} \left(\frac{N}{R}\right)^N e^{-\frac{N\bar{I}}{R}} \bar{I}^{N-1} \quad (93)$$

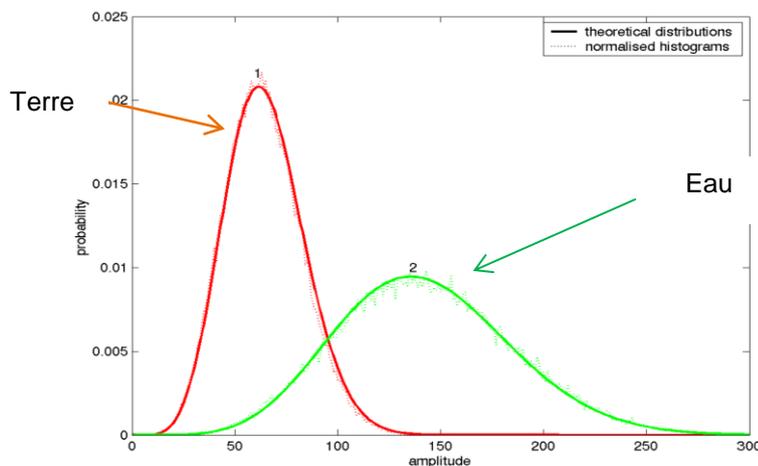


Figure 37 : Histogramme des distributions sur une image simulée SWOT

La moyenne arithmétique des intensités des images multi-vue suivant une loi gamma, il est donc possible d'affiner la détection pixellique en utilisant cette fonction de répartition pour définir le seuillage selon un critère de maximum de vraisemblance (Figure 37). Malgré cela, les résultats obtenus par ces méthodes sont très bruités, en raison de la présence de speckle et de bruit thermique, et sont difficilement utilisables directement. D'autres algorithmes, tel que K-means, utilisent également une approche pixellique. Ces

méthodes peuvent être accompagnées d'un filtrage préalable de speckle, ou d'une étape d'élimination de pixels isolés.

3.4.6.2. APPROCHE CONTEXTUELLE

Afin de palier au caractère bruité des images, les approches contextuelles prennent en compte le voisinage de chaque pixel, ce qui est adapté dans le cas de nos images où l'on cherche à détecter des pixels d'eau conjoints.

Différentes méthodes de segmentation et de classification sont utilisées. Certaines utilisent la détection de contours comme par exemple ROEWA-LPE [Fjør-1998]. Ces détections peuvent être affinées à partir de méthodes de repositionnement de contours par utilisation des estimateurs de maximum de vraisemblance [Chan-1999]. Les méthodes de ce type procèdent à une segmentation de l'image de départ, avant de classifier chaque région identifiée, en moyennant fortement chaque zone pour réduire les effets de speckle. D'autres approches utilisent une régularisation par champs de Markov [Fjør-2003], qui suppose que la probabilité de la valeur estimée d'un pixel correspond à la probabilité conditionnellement aux états des pixels voisins. Enfin, d'autres algorithmes plus spécifiques, tels que la détection de contours fins développée par Telecom-ParisTech [Tupi-1998] peuvent également être utilisés pour détecter certaines rivières. L'utilisation de données a priori, telles que les masques d'eau issus des passages précédents de SWOT, projetés dans la géométrie d'acquisition, peut servir de guide pour les différents algorithmes de détection de surface d'eau. De plus, un processus itératif, avec une première restitution de hauteur suivie d'une itération sur les différentes étapes du traitement de niveau 2, pourrait permettre d'améliorer l'utilisation de ces données a priori, au prix d'une augmentation du temps de calcul.

3.4.6.3. FUSION

Ces différentes méthodes de détection sont souvent complémentaires. Différents outils de fusion permettent de combiner les probabilités ou masques produits par chacune des méthodes de manière optimale afin de restituer un masque d'eau plus précis. Il existe les méthodes de fusion dites binaires, où chaque pixel est identifié comme eau dans l'image finale dès qu'une majorité de méthodes le qualifie en eau. D'autres méthodes de fusion, dites floues, peuvent au contraire affiner des méthodes de détection supposées travailler sur les mêmes types de structures, en améliorant leur précision.

3.4.6.4. IMPACT DES ERREURS DE DETECTION

Dans le cadre de SWOT, l'étape de détection des surfaces d'eau a un impact important en termes d'erreur sur les produits finaux. Lors des étapes finales de moyennage visant à restituer les caractéristiques des étendues d'eau observées (cf. Chapitre 5), les points non détectés ne seront pas pris en compte, réduisant la précision finale attendue et sous estimant l'étendue réelle de la rivière. De plus, les détections erronées entraînent des biais de hauteur en introduisant des points n'appartenant pas à l'étendue d'eau, et surestiment la vraie surface.

La Figure 38 présente un schéma récapitulatif du simulateur et des traitements bas niveaux HR réalisés pendant la thèse. La suite des traitements, permettant d'obtenir les hauteurs géolocalisées, est détaillée dans les chapitres 5 et 6.

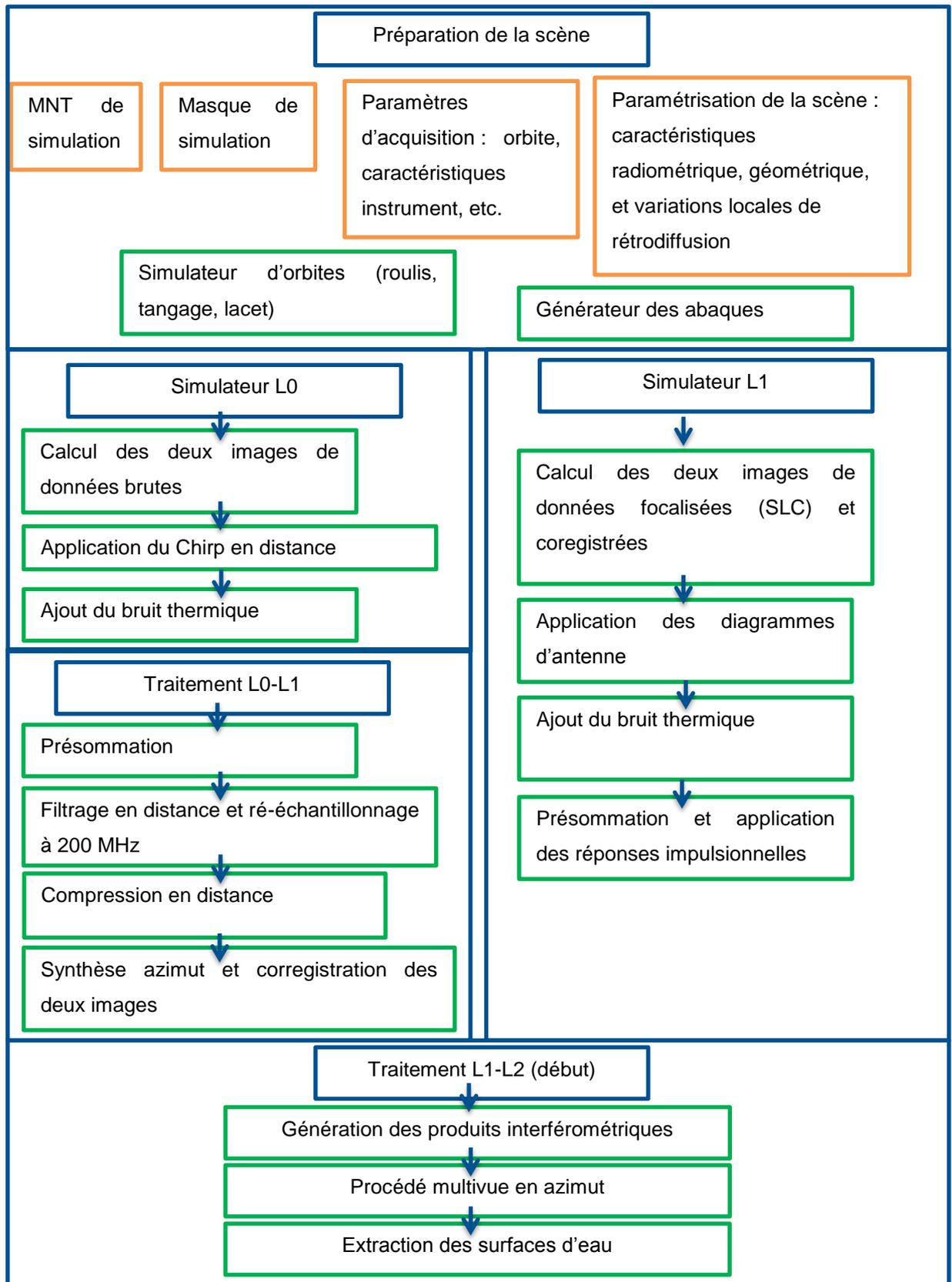


Figure 38 : Description du simulateur et prototype de traitements développés pendant la thèse

3.5. LE TRAITEMENT BORD EN MODE LR

Dans le mode LR de SWOT, il est primordial de limiter le volume de données télémétriques émis : une partie importante du traitement est donc prévue à bord dans l'OBP, afin d'assurer un débit réduit au sol de produits moyennés. Pour cela, il est en particulier nécessaire d'effectuer les étapes de traitement SAR à bord, puis la production d'interférogrammes moyennés. Le traitement de synthèse azimut étant lourd, une méthode dite de traitement « non focalisé », reposant sur un découpage de spectre en sous-vues est prévue. La résolution finale des produits bords (moyenne sur 1km²) permet de s'affranchir d'une focalisation très précise des données brutes.

3.5.1. ESTIMATION DU DOPPLER CENTROÏDE

Le « Doppler Centroïde » est la fréquence centrale du spectre Doppler des données. Il est utilisé lors de la focalisation azimut pour localiser le maximum d'énergie du signal et atteindre la meilleure résolution et le SNR optimal [Li-1985]. L'origine du Doppler Centroïde est principalement due au dépointage de l'antenne par rapport à la perpendiculaire du vecteur vitesse. Il peut y avoir une influence de la rotation de la Terre, qui est en général compensée par « yaw-steering », de manière à acquérir des données les plus proches possible du Zéro-Doppler et limiter ses variations en distance. Ceci permet d'avoir une estimation du Doppler résiduel plus précise, d'optimiser le recouvrement des spectres azimut lors d'acquisitions interférométriques et de réduire le biais de phase lié aux erreurs de coregistration. D'autres postes interviennent dans le Doppler Centroïde, en particulier les erreurs liées à l'attitude du porteur.

Ainsi, le Doppler Centroïde ne peut être parfaitement estimé de manière théorique, mais la qualité de la focalisation nécessite une précision importante. On procède donc à une estimation du Doppler Centroïde directement sur les données brutes. Le Doppler Centroïde estimé de cette façon est la partie fractionnaire uniquement, comprise entre + ou - PRF/2, à laquelle il faut ensuite ajouter une composante entière dite d'ambiguïté Doppler. Pour cela, on calcule la différence de phase du signal ligne par ligne (méthode des voisins) et on procède à une moyenne pour limiter les erreurs liées au bruit thermique en particulier [Mads-1989]. La composante entière peut être estimée à partir des caractéristiques d'orbite et d'attitude, ou bien calibrée à partir de mesures sur des sites particuliers. Le Doppler Centroïde peut être calculé par bloc (buffer de lignes de données brutes), et considéré comme constant par bloc le long de l'image pour la focalisation azimut.

3.5.2. COMPRESSION EN DISTANCE

La compression en distance est similaire à celle effectuée en mode HR, mais avec quelques spécificités dues au fait qu'elle est pratiquée à bord. Cette étape est critique en termes de performance. La fonction de compression à utiliser doit donc être connue avec précision, car une simple information de type réplique embarquée à bord peut présenter des erreurs affectant les performances finales. On peut pour cette raison envisager de construire cette fonction à la fois à partir d'un modèle théorique embarqué, mais également à partir d'une composante dynamique dépendant des mesures de calibration en vol. Ceci permet d'effectuer une compression distance à bord plus précise qu'une simple réplique de phase embarquée.

3.5.3. COREGISTRATION ET FILTRAGE DE LA BANDE DE FREQUENCE COMMUNE

De la même façon que pour le traitement HR, il est nécessaire de coregistrer les images issues des deux antennes, le décalage distance entre elles n'étant pas négligeable, en particulier en fin de fauchée. De la même façon que pour le mode HR, une estimation du décalage à corriger est effectuée, et appliquée à travers un interpolateur en sinus cardinal.

Une autre étape importante est le filtrage de la bande commune des spectres des images issues des deux antennes [Rodr-1992] [Gatt-1994]. En effet, ce décalage fréquentiel induit une perte de corrélation géométrique qui se traduit par une perte de cohérence et une dégradation de la précision altimétrique. Toutefois, il est possible de décaler les spectres des deux images et de les filtrer de manière à ne conserver que leur partie commune, améliorant ainsi le SNR et la corrélation. Pour cela, on peut appliquer une correction du décalage fréquentiel estimé $\pm \Delta f/2$ par une rampe fréquentielle sur les deux images. On filtre ensuite les images avec un filtre RIF adapté pour ne conserver que la partie commune des spectres (Figure 39). Les variations d'incidence dans le cas de SWOT entraînent un décalage très variable dans l'axe distance. Pour cette raison, le décalage doit être appliqué dans le domaine fréquentiel.

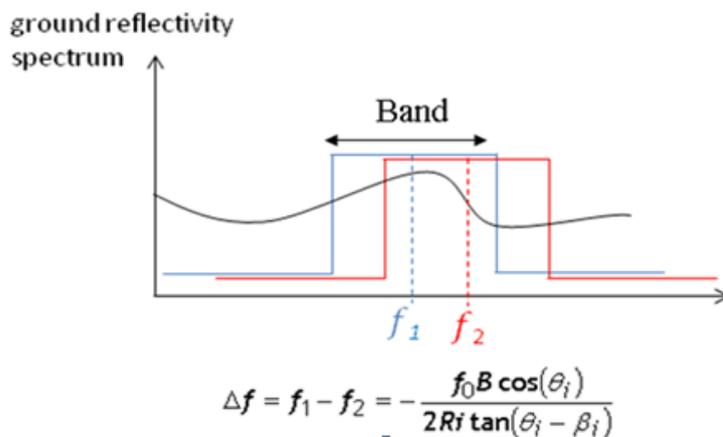


Figure 39 : Schéma de principe du filtrage de la bande commune des spectres [ATBD-SWOTPROTO]

Le décalage fréquentiel dépend fortement de la pente locale. L'hypothèse de surface plane peut être employée pour l'océan, permettant le recalage. On peut également noter que ce recalage des spectres améliorerait également la cohérence des produits HR, mais qu'il est plus compliqué à gérer, en raison des variations de topographie et de pentes. Des méthodes de correction de ce décalage fréquentiel en fonction des pentes locales estimées à partir d'un DEM ont été développées [Sant-2007] et pourraient être envisagées pour améliorer les résultats en mode continental.

Dans nos simulations, lorsque l'on utilise une défocalisation par un Chirp en distance au lieu d'une véritable simulation de données brutes dans les deux dimensions, ce phénomène n'est pas correctement pris en compte dans la simulation, et la correction présentée ci-dessous n'a pas besoin d'être appliquée.

3.5.4. TRAITEMENT AZIMUT NON FOCALISE

L'utilisation d'un traitement bord entraîne des limitations dans la complexité des calculs effectués dans l'OBP. Dans le cas de la focalisation azimuth, on cherche à préserver la précision altimétrique, mais une résolution à 1 km² est suffisante. En raison du temps de décorrélation de la surface océanique, il n'est pas optimal de focaliser sur toute la durée de l'intégration Doppler. Pour ces raisons, au lieu d'effectuer une focalisation classique en azimuth, on va ici réaliser un traitement de synthèse dit « non focalisé » et ainsi générer plusieurs vues de l'image, chacune correspondant à un angle d'observation différent et donc à une partie spectrale différente. Ce traitement est appelé par la suite DBS (Doppler Beam Sharpening).

Pour l'effectuer, une méthode simplifiée utilisant uniquement des transformées de Fourier peut être utilisée (Figure 40) : on traite alors les lignes de la donnée brute par paquet de D_k . Sur chacune de ces D_k lignes, on effectue une FFT dans la direction azimuth. On obtient alors toujours en sortie D_k lignes : la première vient s'ajouter à la vue 0, la seconde de la vue 2, etc. En procédant ainsi sur chaque groupe de D_k lignes de données brutes, on reconstitue les D_k vues (pour chacune des images maîtresse et esclave) et on produit les interférogrammes correspondants. On a alors pour chaque vue k , pour une colonne donnée, l'expression de la donnée focalisées à la vue k comme étant :

$$SLC_k = \sum_{n=0}^{Dk} D_{(n)} \exp^{-2i\pi \frac{n}{N}} \quad (94)$$

En pratique, le traitement est plus complexe. Afin de focaliser à Doppler nul, on utilise le Doppler calculé précédemment dans l'algorithme. De même, le pourcentage de bande utilisé lors de la focalisation peut être réglé. En pratique, on utilise environ 80% de la PRF. Dans ce cas, la formulation du traitement devient à Doppler nul :

$$SLC_k = \sum_{n=0}^{Dk} D_{(n)} \exp^{-2i\pi \frac{n}{N} \frac{B_{dopp}}{f_{PRF}}} \quad (95)$$

3.5 Le traitement bord en mode LR

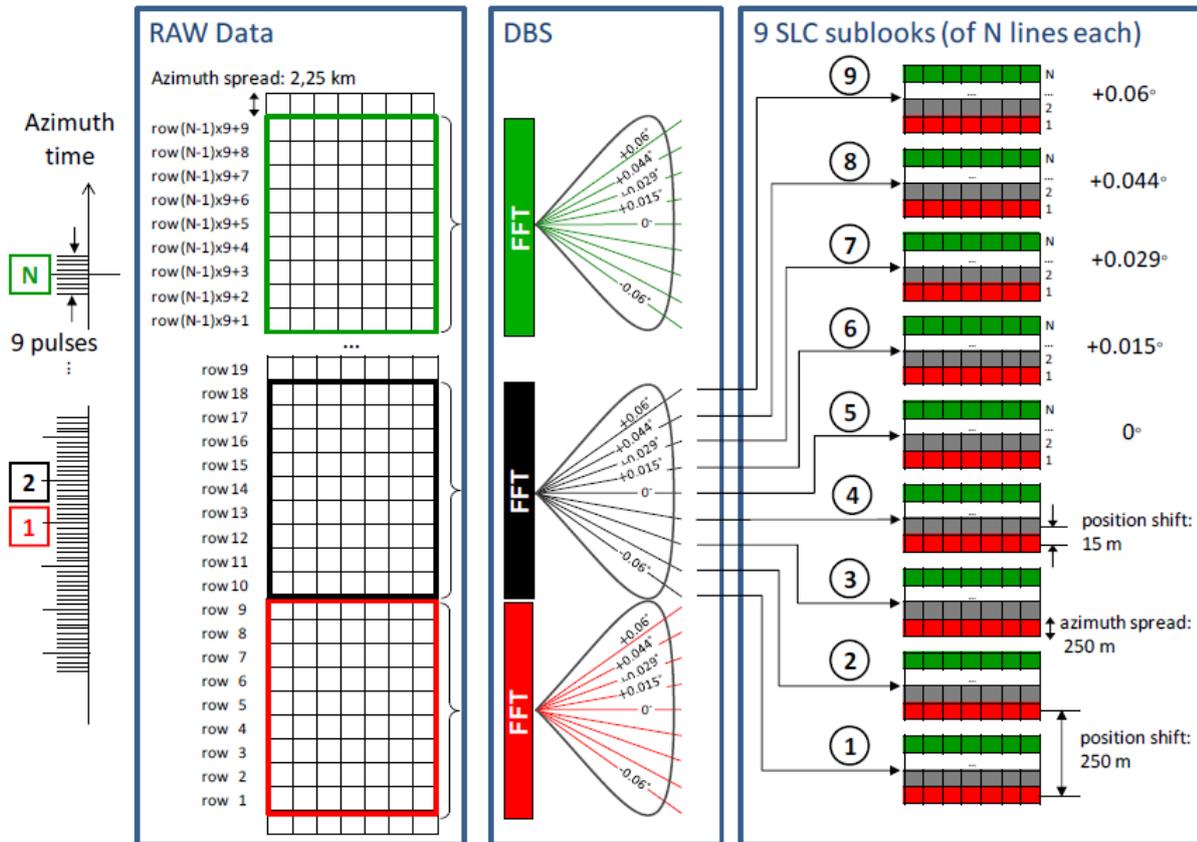


Figure 40 : Schéma de construction des différentes vues par traitement LR non focalisé

Pour KaRIn, on utilisera 9 vues pour des raisons expliquées par la suite. La vue centrale, correspondant au Doppler 0, sera la vue 5 et on disposera de 4 vues de part et d'autre de cette vue. Chacune présente 9 fois moins de cellules radar azimuth que la donnée brute. Si l'on considère que la zone balayée au sol correspond au lobe principal de l'antenne, on a alors un taux de compression azimuth N_a d'environ 1940, ce qui équivaut à une trace au sol de 2400 m. Lors du traitement DBS et du passage en fréquences Doppler, chaque faisceau Doppler correspond à une fraction de la trace au sol du radar (Figure 41), que l'on appellera vue ou « sub-look ». Chaque ligne obtenue par ce traitement correspond donc à une résolution azimuth d'environ 250 m, chaque ligne étant espacée d'environ 15 m : on a donc un chevauchement important des lignes radar consécutives à l'intérieur de chacune des vues.

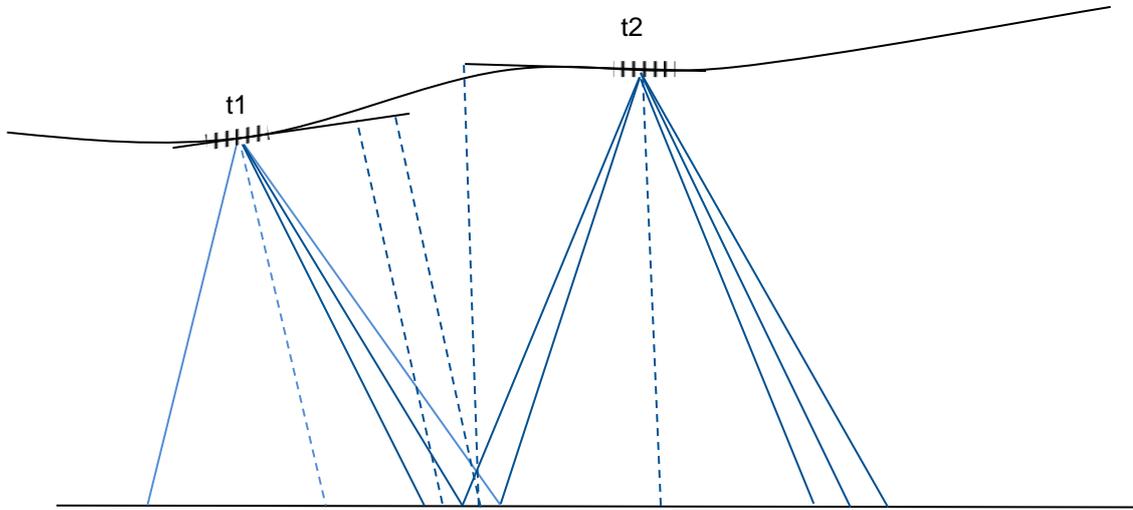


Figure 41 : Séparation en vues à partir de données à Doppler non nul : cas général

Deux effets majeurs sont à prendre en compte lors du dimensionnement de ce traitement de synthèse SAR non focalisé. D'une part, les lignes de données brutes qui vont être successivement combinées pour former les vues doivent être cohérentes afin d'atteindre la résolution théorique. La première condition porte donc sur le nombre d'impulsions successives D_k qu'il est possible de prendre en compte avant que celles-ci soient décorréliées. Si l'on considère que chaque prise de vue ou « pulse » est séparée d'un temps $1/f_{PRF}$ et que le temps de décorrélation de la surface océanique est de τ_c , on obtient la relation suivante :

$$\frac{D_k}{f_{PRF}} < \tau_c \quad (96)$$

Le temps de corrélation moyen sur océan estimé lors d'une étude par un diffusiomètre en bande Ka est de l'ordre de 3 ms [Chap-1994]. D'autres mesures sur les eaux continentales ont donné des valeurs du même ordre de grandeur, mais pouvant être parfois plus importantes, autour de 40 ms dans le cas de rivières peu agitées en l'absence de vent [Moll-2014]. Enfin, une thèse sur la rétrodiffusion des océans en bande Ka [Bois-2015] montre que le temps de corrélation (Figure 42) est fortement impacté par la vitesse du vent, pouvant conduire à des temps de corrélation sur océans faibles.

Cette condition montre que pour une valeur moyenne de PRF de 4420 Hz pour SWOT et un nombre de vues de 9, la condition est respectée pour des temps de corrélation supérieurs à 2 ms, c'est-à-dire une agitation moyenne de la surface (autour de 6 m/s de vent). Au-delà, on peut noter une perte partielle de corrélation entre les pulses combinés et une perte de résolution [Bois-2015]. Cependant, étant donné les moyennes effectuées par la suite et la résolution finale attendue, la perte de résolution provoquée par une légère décorrélation de la surface est probablement négligeable.

3.5 Le traitement bord en mode LR

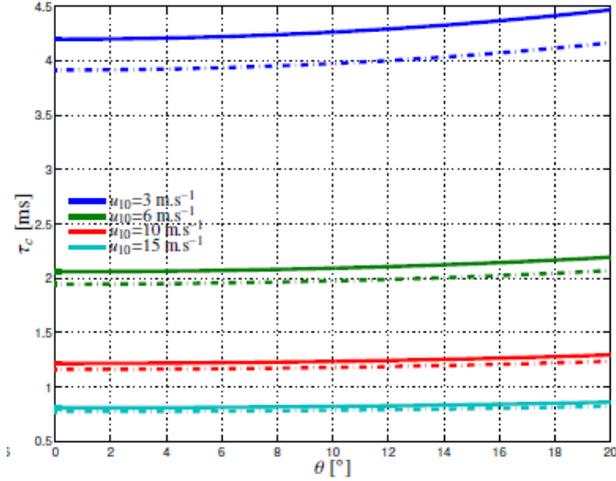


Figure 42 : Temps de corrélation sur océan en fonction de l'incidence et de la vitesse du vent [Bois-2015] selon des modèles théoriques

La seconde condition porte sur la focalisation de la donnée lors du traitement DBS. L'historique de phase des impulsions intégrées doit respecter la condition suivante pour que la combinaison des phases soit correcte :

$$\Delta\varphi(t) < \frac{\pi}{4} \quad (97)$$

Cela se traduit par la relation suivante :

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{V_{sat}^2 t^2}{R_0} \right) + 2\pi f_{dop} t < \frac{\pi}{4} \quad (98)$$

Soit :

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{V_{sat}^2 \left(\frac{N}{PRF} \right)^2}{R_0} \right) + 2\pi f_{dop} \frac{N}{PRF} < \frac{\pi}{4} \quad (99)$$

Dans le cas d'un Doppler nul, on obtient une condition sur D_k qui doit être inférieur à 37 vues, ce qui est moins critique que le critère sur la corrélation de surface. En pratique, c'est ce dernier qui semble être déterminant pour l'application du traitement non focalisé de SWOT.

3.5.5. GENERATION DES INTERFEROGRAMMES ET MOYENNE KILOMETRIQUE

Après la focalisation en distance et en azimuth des données, on effectue directement, et toujours à bord, la génération des produits interférométriques. Pour cela, on procède comme en mode HR, au produit

hermitien entre les deux canaux. Ici la donnée n'est pas présommée, mais a subi une amélioration de résolution lors de la focalisation azimuth d'un facteur égal au nombre de vues (typiquement 9). Selon les exigences scientifiques en termes de taille des phénomènes observés, une résolution de 1 km est suffisante en mode LR.

Avant de procéder à la moyenne des interférogrammes complexes, il est nécessaire d'aplatir préalablement la phase, en utilisant un modèle de hauteur de mer embarqué. Ceci sera détaillé plus tard dans la section 4.4. Afin de réduire le volume de données descendu, on procède alors à un moyennage massif des interférogrammes, afin de les ramener à une résolution de l'ordre du kilomètre. Une modification des exigences scientifiques est en préparation, pour passer d'une résolution de 1000 m à une résolution de 500 m échantillonnée à 500 m. Dans ce rapport, nous restons sur l'hypothèse de 1 km². Une fois la phase aplatie et les franges orbitales retirées, il est possible de moyennner les interférogrammes, en utilisant une fonction de pondération afin de réduire les artefacts liés au moyennage. Dans la direction azimuth, le gabarit dépend essentiellement de la PRF (pouvant varier le long de l'orbite) et est facilement déterminé de manière précise, la taille des pixels de l'image d'origine étant connue avec précision. En distance, en revanche, la taille des pixels varie le long de la fauchée, et dépend de la hauteur des niveaux d'eau qui n'est pas connue précisément a priori. On utilise donc le même modèle de hauteur de mer que pour l'aplatissement de la phase afin de déterminer approximativement la taille de chaque pixel radar. Celle-ci est ensuite utilisée lors de la moyenne sur la grille kilométrique. Comme pour toutes les étapes du traitement bord, il s'agit d'une étape critique sur laquelle il n'est pas possible de revenir au sol. La résolution obtenue suite à cette étape devient la résolution maximale des produits LR finaux et les structures plus fines sont perdues et moyennées à l'intérieur des pixels finaux. Lors de cette étape, on moyenne et descend au sol à la fois le produit interférométrique complexe, et également les puissances (intensités) des deux images, afin entre autre de pouvoir calculer la cohérence interférométrique au sol.

Pour la suite du traitement, ce sont ces interférogrammes qui seront inversés en hauteurs géolocalisées. La Figure 43 illustre les principales étapes du traitement bord LR permettant de générer les interférogrammes moyennés à partir des données brutes acquises. On observe sur cette figure, de haut en bas, la donnée brute, puis les interférogrammes intermédiaires de la vue centrale (amplitude et phase) avant l'étape de moyennage bord, et pour finir les interférogrammes après le moyennage au kilomètre et qui seront descendus au sol. L'illustration est faite sur une simulation présentant à la fois de l'eau et de la terre pour rendre les effets de focalisation plus visible que sur une scène de mer.

3.5 Le traitement bord en mode LR

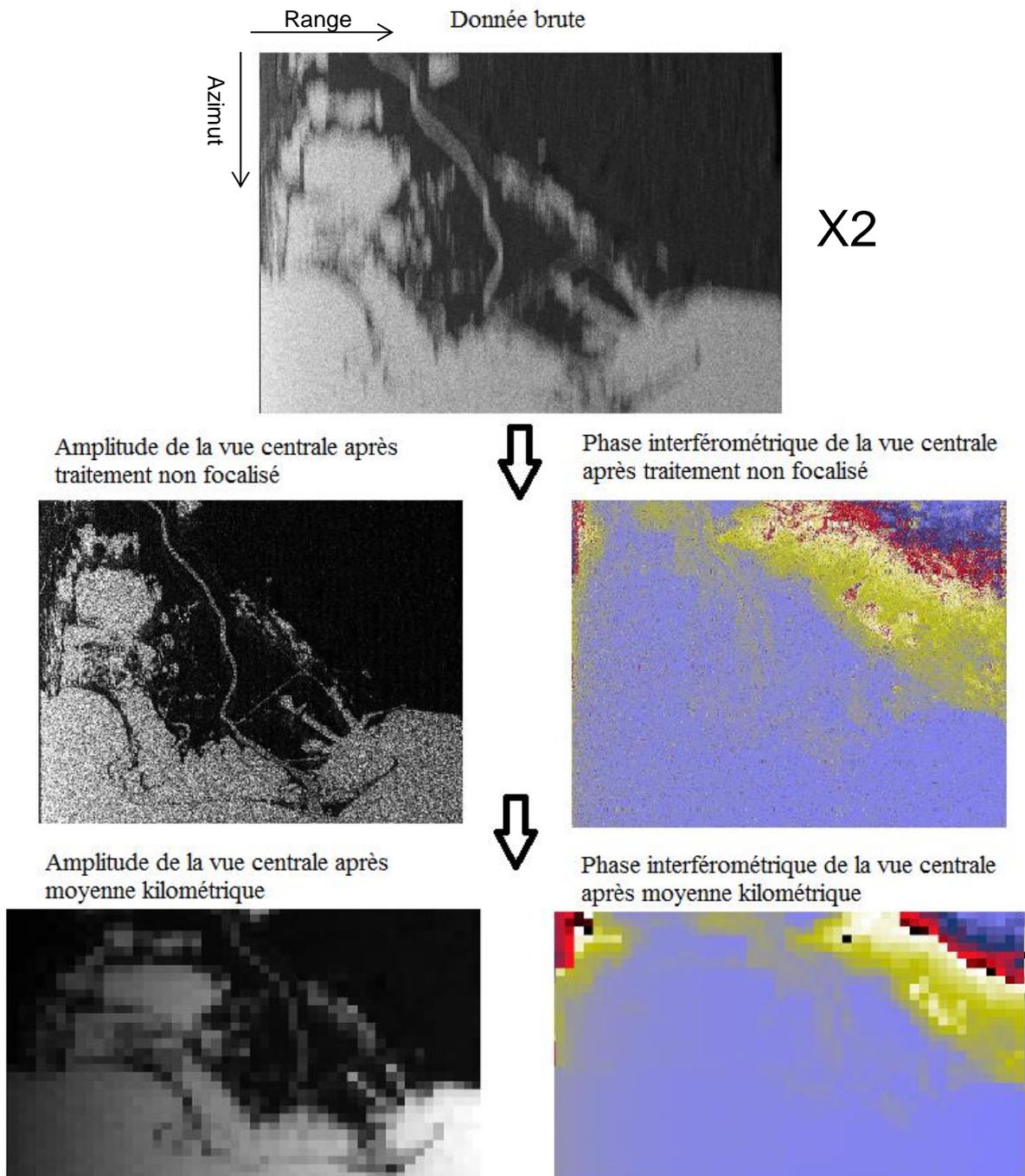


Figure 43 : Les principales étapes du traitement bord LR et les données associées

3.6. LE TRAITEMENT SOL EN MODE LR

La suite des traitements au sol est présentée sur le diagramme suivant (Figure 44) et brièvement résumée dans cette section. Les étapes liées directement à l'inversion de hauteur seront étudiées plus en détail dans la section 4.4.

Une fois les produits moyennés à bord descendus au sol (interférogrammes complexes et images d'intensité maîtresse et esclave), une étape majeure doit être appliquée sur les différentes vues. Il s'agit de corriger les biais de phase liés au non alignement des lignes iso-phases et iso-distances lors du traitement de synthèse non focalisé. De même, une étape de correction de l'amplitude est pratiquée afin de pouvoir correctement estimer la cohérence de chacune des vues. Une fois les différentes corrections appliquées, il est ensuite possible d'estimer à partir des images d'intensités le σ_0 et le SNR des différentes images, ce qui est utilisé dans l'étape de calcul de la hauteur moyenne des vagues (SWH) et l'estimation de la vitesse du vent [Dubo-2011]. Ces mesures sont déterminées par l'analyse des images de cohérence des différentes vues à partir desquelles il est possible d'isoler les différents postes de corrélation (cf. 4.5.1) afin d'estimer la composante géométrique liée en particulier aux vagues. Ces traitements sont sensibles au bruit thermique, et des études visent actuellement à définir le meilleur moyen d'estimer les différents paramètres étudiés.

Une fois l'étape d'estimation des hauteurs effectuées, et éventuellement après une itération visant à améliorer les corrections précédentes une fois une meilleure connaissance de la hauteur établie, il faut combiner les différentes vues. Cette combinaison peut être une simple moyenne directe, mais la qualité des vues varient en fonction de leur position. Une pondération en fonction de leur cohérence permet donc d'obtenir une combinaison plus performante. Une fois les produits combinés sur la grille en géométrie radar, c'est-à-dire sous la trace et perpendiculaire à celle-ci, une étape de projection sur une grille fixe utilisable par les océanologues est prévue. Enfin, la correction des différents paramètres géophysiques tels que les biais atmosphériques (cf. 3.4.5) ou de biais d'état de mer sur également des étapes du traitement à considérer. L'étape de calibration à partir des points de croisements sur l'océan permet de corriger les erreurs résiduelles est ainsi d'améliorer les produits finaux.

3.6 Le traitement sol en mode LR

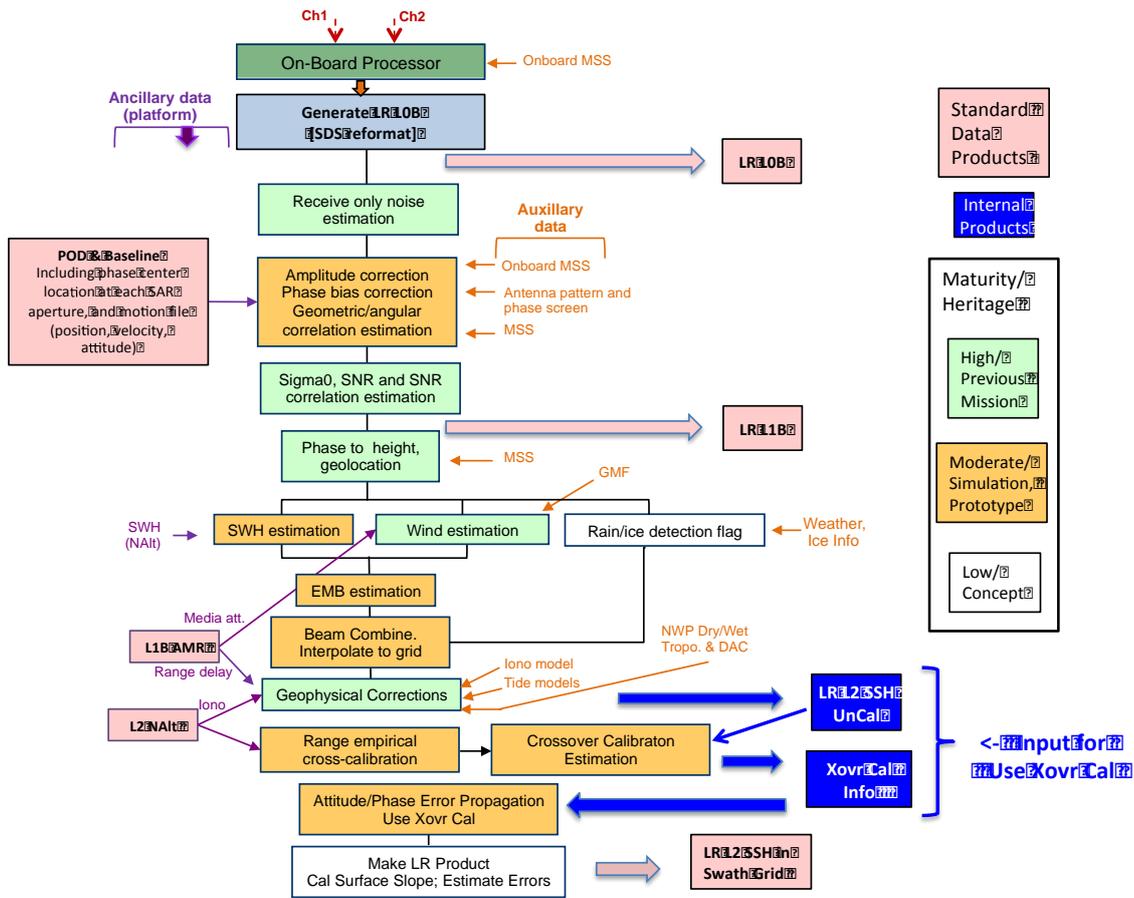


Figure 44 : Diagramme des traitements sol en mode LR pour SWOT

4. EXTRACTION DE HAUTEURS GEOLOCALISEES POUR KARIN/SWOT

Les traitements décrits dans le chapitre précédent permettent de produire les interférogrammes radar. Ce chapitre décrit les différentes méthodes permettant de les transformer en images de hauteurs, et présente quel choix a été fait dans la cadre de la thèse, étant donnée la physique de la mesure particulière de SWOT. Un exemple d'application de déroulement sur des données réelles issues d'acquisitions TerraSAR-X/TanDEM-X est présenté, afin de montrer les résultats d'une inversion de phase en hauteur sur des surfaces d'eau. La méthode d'inversion phase-hauteur pixel par pixel développée pendant la thèse est analysée en détail. Le budget d'erreur de hauteurs est abordé, dans le but d'étudier comment la méthode peut s'inscrire dans une architecture de traitement globale permettant de réduire une partie des erreurs de hauteur, en particulier celles liées au layover.

4.1. DEROULEMENT DE LA PHASE EN INTERFEROMETRIE RADAR

Rappelons que l'interférométrie radar est issue de la combinaison de deux images radar, obtenues dans des conditions quasi-identiques de prise de vue. La différence entre ces images permet d'obtenir des informations sur l'évolution temporelle entre les prises de vue (interférométrie non simultanée) comme pour les missions ERS ou sur la topographie (interférométrie simultanée) : c'est le cas des missions SRTM, SWOT, etc. Dans la suite de ce chapitre, nous étudierons les effets liés à la topographie.

L'interférogramme, est constitué de trois éléments : l'amplitude, la phase et la cohérence. L'image de phase est celle qui peut être reliée aux hauteurs de la surface observée. Toutefois, la connaissance de la phase est obtenue modulo 2π : il est nécessaire de connaître en tout point le nombre entier de cycles à ajouter à la phase afin d'obtenir la phase dite « déroulée ». Les méthodes permettant d'y arriver sont appelées « déroulement de la phase » ou « phase unwrapping ». La Figure 45 présente l'interférogramme brut issu de la génération des produits interférométriques. Afin de l'exploiter, une étape simple consiste à retirer les franges orbitales, c'est-à-dire à supprimer la composante de phase issue de la construction géométrique du décalage des deux antennes qui viseraient un sol d'altitude constante. On voit qu'une partie des franges disparaît, mais la phase reste cependant ambiguë sur une large partie de l'image de phase.

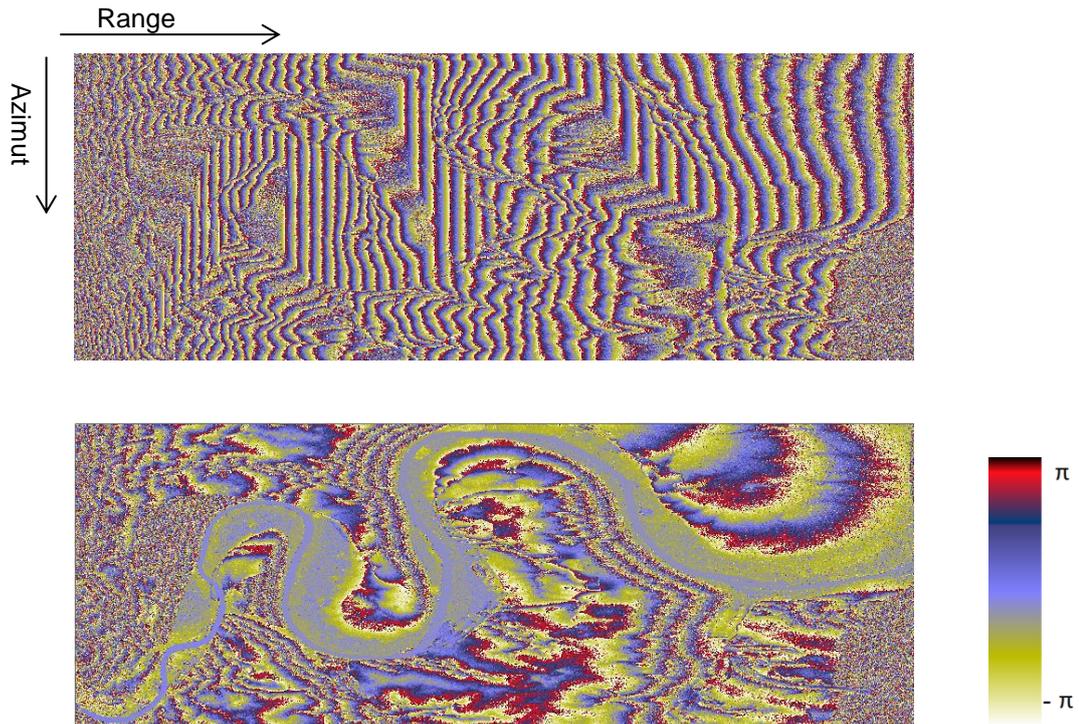


Figure 45 : Interférogramme de la région de la Seine avant et après retrait des franges orbitales correspondant à un sol plat d'altitude $h = 0$ m

Plusieurs approches ont été étudiées afin de dérouler la phase, avec des degrés de complexité et de précision différents. On peut identifier deux grandes classes d'algorithmes, basées sur des méthodes locales développées initialement par Goldstein et al [Gold-1988], ou globales par Ghiglia et Romero [Glia-1994].

4.1.1. LES METHODES LOCALES DE TYPE «BRANCH CUT»

Les méthodes locales de déroulement de phase sont basées sur une hypothèse simple : deux points voisins dans l'image de phase ne peuvent présenter un saut de phase supérieur à π en valeur absolue. Afin d'obtenir une phase déroulée absolue, ces méthodes nécessitent un ou plusieurs points de référence (« Ground Control Points ») à partir desquels il faut alors dérouler la phase en se déplaçant pixel à pixel dans l'image. Lors de sauts de phase en bord de frange, on identifiera le nombre de tours de phase correspondant à la nouvelle frange grâce à l'hypothèse précédente sur l'absence de larges sauts.

Cependant, des erreurs de propagation importantes peuvent apparaître avec ces méthodes, notamment à cause du bruit de phase. Lorsque la condition sur le gradient n'est plus respectée, des erreurs apparaissent en 1D, mais ne sont pas visibles. Toutefois en image 2D, un phénomène dit d'inconsistance intervient. La condition de régularité de la phase à la fois dans la dimension verticale et horizontale n'est pas respectée et deux solutions différentes sont alors possibles. Selon le chemin retenu pour l'intégration, on peut obtenir un déroulement de la phase différent et biaisé propageant des erreurs sur tout le reste de l'image.

4.1 Déroulement de la phase en interférométrie

Le chemin choisi pour l'intégration est donc primordial afin de sélectionner celui qui entraîne le moins d'erreurs. La méthode utilisée par Goldstein [Gold-1988] consiste à calculer la « charge » de chaque pixel de l'image, c'est-à-dire la somme des différences entre quatre points en considérant toujours la condition du demi-cycle de phase à ne pas dépasser. On obtient ainsi des points de charge nulle, égale à 1 ou à -1.

Dans cet exemple illustré Figure 46, on voit que la majeure partie des points ont une charge nulle, ce sont les points consistants, le point de charge +1 est appelé un « résidu ».

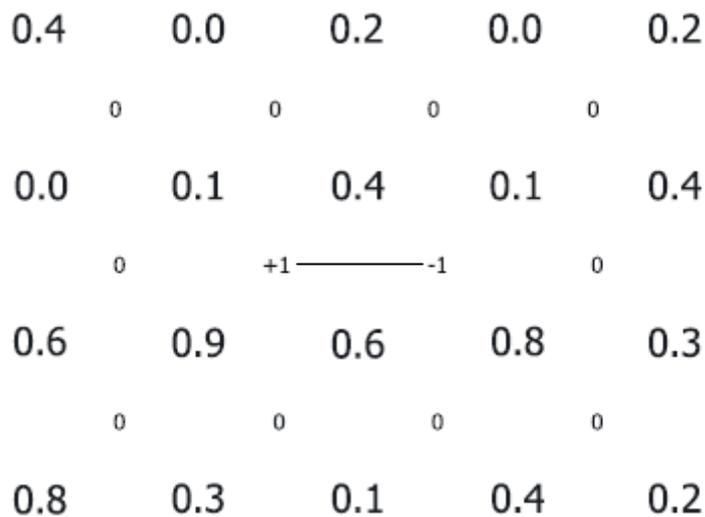


Figure 46 : Illustration du principe des branch-cut, les résidus -1 et +1 sont connectés pour former un chemin non franchissable par l'algorithme d'inversion du gradient de phase

La méthode d'intégration consiste à relier les « résidus » entre eux, chaque résidu positif étant raccordé avec un négatif si possible, ou avec le bord de l'image sinon. Ces lignes sont appelées « branch cuts » et ne doivent pas être franchies par le chemin d'intégration. On peut remarquer qu'il existe de nombreuses façons de relier les points et ensuite plusieurs choix de chemins d'intégration. Différents algorithmes ont été développés afin de choisir le chemin le plus adapté à l'image en reliant les résidus entre eux de manière à obtenir le chemin le plus court possible. On peut également noter que certaines zones de l'image complètement « encerclées » par des branch-cuts risquent de ne pas être intégrées correctement avec cette méthode, c'est l'une de ses limitations importantes [Zebk-1998]. Des méthodes dérivées de celles-ci utilisent des cartes de qualité de l'image, en particulier la cohérence interférométrique [Dere-1995], comme guide pour relier les résidus entre eux, en commençant par travailler sur les zones ayant la meilleure qualité de phase : « quality based path following ».

Il existe d'autres méthodes de déroulement locales, comme celles qui emploient la détection des franges [Lin-1994]. En réduisant d'abord le bruit de l'image par filtrage, il est possible d'identifier les franges de l'image. On procède ensuite à un ajout de 2π à travers ces lignes de séparation afin de dérouler la phase sur toute l'image. Des améliorations de ces méthodes représentant l'image de phase en nœuds et arcs ont

été développées par Chen [Chen-2001]. Cette méthode dite de Minimum Span Tree (MST) est basée sur des théories graphiques [Akuj-1993]. Leur objectif est de générer un chemin reliant les résidus qui ne crée pas de trous dans l'image, mais dessine des « arbres », permettant de traiter toute l'image.

4.1.2. LES METHODES GLOBALES : MINIMISATION DES MOINDRE CARRES

Les méthodes globales pour le calcul de la phase déroulée consistent à minimiser la différence entre le gradient de la phase sur l'image et celui de la solution recherchée. La formulation de ce problème d'optimisation peut s'écrire pour une image de taille M x N comme :

$$\min\left(\sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} w_{i,j}^{(y)} |\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} - \Delta\varphi_{i,j}^{w_r(y)}|^p + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} w_{i,j}^{(x)} |\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} - \Delta\varphi_{i,j}^{w_c(y)}|^p\right) \quad (100)$$

w étant le poids, les indices i et j représentant les gradients dans les directions correspondantes et p le degré de la norme d'optimisation.

La minimisation de la norme L^p entre la phase déroulée et la phase enroulée, a de multiples solutions y compris pour le même degré d'optimisation. Elle a été résolue pour p=2 par [Glia-1994] en utilisant la transformée en cosinus discrète. Cette équation disposant d'une solution analytique, il est possible dans notre cas de considérer la formule comme un problème matriciel pouvant être résolu directement dans les images de petites tailles. Dans le cas de l'imagerie radar toutefois, on procèdera en général par un passage en fréquentiel (transformée de Fourier) pour résoudre ces systèmes.

Cette méthode a l'avantage d'effectuer le déroulement sur toute l'image de phase, sans créer de « trous » comme pour la plupart des méthodes locales. Cependant, les « résidus » présents dans les méthodes locales sont assimilés pendant le traitement et traités comme tout point de l'image, entraînant une erreur répartie sur toute l'image, d'autant plus importante que celle-ci est bruitée et la densité de résidus importante.

Afin de pallier à cela, des méthodes améliorées, basées sur une pondération des pixels de l'image sont parfois employées. Par exemple, les points « résidus » peuvent être caractérisés dans l'image de cohérence radar comme étant des points de cohérence faible (décorrélation géométrique, layover, bruit...). En pondérant les points dans l'équation de minimisation en fonction de la cohérence, il est possible d'améliorer les résultats en diminuant l'erreur. Toutefois, les méthodes de choix de pondération sont souvent complexes et diminuent l'intérêt de la méthode globale en introduisant des difficultés de traitement algorithmiques similaires à celles des traitements locaux.

4.1.3. METHODE UTILISEE DANS LE CAS DE SRTM

Dans le cas de l'exploitation des données SRTM, une nouvelle méthode a été développée à partir des travaux de M. Costantini [Cost-1998]. Cette méthode, appelée MCF (Minimum Cost Flow) utilise le fait que la

4.1 Déroulement de la phase en interférométrie

différence de phase entre deux points peut être estimée à une erreur près qui est un multiple entier de 2π . Le problème de déroulement de phase consiste alors à minimiser, sur l'ensemble de l'image, la différence entre la phase estimée et la phase inconnue déroulée, en contraignant l'écart à rester entier. La solution pratique passe ensuite par l'utilisation d'un découpage en réseau de l'image, pour lequel il existe des résolutions possibles pour ce problème de minimisation.

Eineder et al [Eine-1995] ont repris et adapté cette méthode dans le cadre des données SRTM : il s'agissait notamment de pouvoir traiter des données de taille plus importante. La première version utilisée, Relax-4, présente des temps de calcul élevés dès que la densité des résidus augmentait. L'image découpée en réseau est composée de résidus reliés par des branch-cut. L'enjeu principal de cette méthode est de relier de manière réaliste ces résidus. Une approche dite à « coût constant » permet un meilleur temps de calcul mais offre des résultats peu réalistes. Eineder a donc d'une part optimisé la méthode afin de réduire significativement le temps de calcul et d'autre part développé de nouvelles fonctions de coût plus réalistes afin d'améliorer la qualité du déroulement de phase, particulièrement dans les zones de fort relief.

Par la suite, diverses optimisations de cette méthode ont été utilisées dans le cadre des traitements des données SRTM, notamment en exploitant les données de cohérence, afin d'augmenter la qualité du traitement et d'identifier les erreurs de déroulement.

4.1.4. METHODE UTILISEE DANS LE CAS DE TANDEM-X

La mission TanDEM-X présente des caractéristiques particulières : les deux satellites évoluent en formation rapprochée et disposent chacun d'une antenne utilisée pour la prise de vue simultanée de la zone étudiée [Krie-2007]. Le choix fait pour l'extraction des hauteurs à partir des interférogrammes est basé sur le fait que la majeure partie des terres observées le sera deux fois en cours de la mission, mais avec un décalage entre les deux antennes différent, la base étant modifiée au cours de la mission [Lach-2008]. Durant la seconde année d'acquisition, la base sera augmentée en modifiant légèrement l'orbite d'un des satellites. En effet, une base plus importante implique une altitude d'ambiguïté plus faible, ce qui se traduit par un déroulement plus difficile mais également par une sensibilité de mesure plus importante, et donc potentiellement par une meilleure précision.

La méthode utilisée pour dérouler la phase est constituée de plusieurs étapes. La première consiste en un déroulement des interférogrammes issus des deux prises de vues différentes (de chaque année) effectué avec la méthode MCF employée sur SRTM. La seconde étape consiste ensuite à comparer les résultats afin d'identifier les zones présentant des erreurs. En effet, le changement de base devrait seulement introduire un décalage constant entre les interférogrammes déroulés. Les zones qui diffèrent de ce décalage peuvent être considérées comme présentant des erreurs. Une fois celles-ci identifiées, les zones concernées sont à nouveau traitées avec un algorithme de croissance de région : une méthode de déroulement locale qui utilise les résultats interférométriques des deux années et qui réitère jusqu'à ce que le déroulement soit correct, c'est-à-dire identique sur nos deux images. Une fois ces zones corrigées, elles sont ensuite combinées avec l'interférogramme le plus précis du point de vue du déroulement, c'est-à-dire

celui de la deuxième année (base plus grande) afin d'obtenir notre phase déroulée finale [Lach-2012-a] [Lach-2012-b].

Cette méthode, combinant à la fois une approche globale et locale, a été utilisée dans le cadre du traitement opérationnel de la mission TanDEM-X. Des améliorations de cette méthode ont également été développées, notamment en utilisant des données auxiliaires : calcul de compatibilité entre les interférogrammes, utilisation de la phase stéréo-radargrammétrique afin d'identifier et corriger les zones d'erreur. Cette approche multi-base permet de faciliter le déroulement de phase interférométrique et les erreurs sur celles-ci, tout en conservant les avantages d'une grande base, en offrant une meilleure sensibilité phase/hauteur et ainsi une précision altimétrique accrue.

Une fois le traitement interférométrique réalisé, des étapes d'ajustement des différents blocs de données (points de contrôles, ajustement, correction de biais), de mosaïque en tuiles de $1^\circ \times 1^\circ$ par fusion des données, et des contrôles des données finales sont effectuées afin d'obtenir les DEM. En termes de résolution, le produit final a une résolution constante de $0.4''$ (seconde de degrés) en latitude et de $0.4''$ (environ 12.3 m) en longitude à l'équateur jusqu'à $4.0''$ aux pôles [Eine-2008]. La précision horizontale absolue est de 10 m circulaire et la précision verticale de 10 m linéaire. La précision relative inter-pixel est de 2 m pour les zones à faible pente ($< 20^\circ$) et de 4 m pour les zones à forte pente ($> 20^\circ$). Afin de réduire l'erreur aléatoire en hauteur, on procède parfois à un moyennage des pixels à $1.0''$ (30 m) ou $3.0''$ (90 m) comme taille de grille.

4.1.5. UTILISATION DES POINTS STABLES OU POINTS PERMANENTS

Afin de dérouler de manière absolue la phase, et parfois de servir de points d'appui au déroulement de phase, on utilise dans certains cas des points stables. L'utilisation de points brillants, à forte cohérence, comme points de référence, à la fois pour leur phase stable et pour la faculté de les identifier et localiser avec précision pour pouvoir en mesurer la distance réelle au satellite, s'avère difficile dans SWOT. En effet, les données terrestres seront très bruitées, et même si localement il était possible de détecter des points permanents à forte réflectivité, l'exploitation de cette information par déroulement sur des images bruitées serait difficile. De même, sur l'eau, la notion de points permanents n'est pas exploitable, en raison des mouvements de la scène et des variations de hauteur entre chaque acquisition. Ces points ne constituent donc pas une approche directement utilisable pour inverser la phase en hauteur absolue, même s'ils pourraient servir comme référence pour aider à la restitution des berges si le niveau de signal était suffisant.

4.1.6. LES LIMITES DE METHODES CLASSIQUES DE DEROULEMENT

Les différentes méthodes présentées ici sont issues des missions d'interférométrie SAR des dernières décennies. Elles ont permis l'exploitation des interférogrammes et la génération des MNT utilisés aujourd'hui. Toutefois, on peut noter des limitations importantes dans la perspective de SWOT.

Le temps de calcul est conséquent, notamment dans le cas d'images bruitées ou présentant du layover (zones de faible cohérence). Il est difficile de traiter ainsi des images de grandes tailles, ce qui sera le cas pour SWOT où l'on recevra au sol environ 1 To de données par jour, dont la majorité pour le mode HR. Le fort volume de données nécessite des méthodes de déroulement efficaces et entièrement automatisables sans intervention manuelle. Les données SWOT sont en outre affectées d'un fort bruit thermique, d'où une forte variabilité de la phase, en particulier sur les surfaces terrestres. D'autre part, dans le cas du mode HR, les structures d'eau exploitables sont parfois très étroites, de l'ordre de quelques pixels de largeur pour les rivières, avec un risque de perte de connectivité, rendant l'utilisation de ces algorithmes de déroulement difficile. L'ensemble de ces facteurs : grande quantité de données, bruit thermique fort (SNR faible), présence de layover, etc., rendent l'utilisation des méthodes classiques de déroulement difficile sur SWOT.

4.2. HAUTEURS D'EAU A PARTIR DE PRODUITS TANDEM-X A FAIBLE INCIDENCE

L'utilisation de MNT de référence est d'un intérêt majeur pour SWOT. Ces MNT permettent d'obtenir, à différentes résolutions et précisions, une modélisation des hauteurs terrestres, permettant d'établir une bathymétrie qui peut servir à modéliser ensuite les différents niveaux d'eau de référence utilisés pour dérouler la phase de SWOT, ainsi que pour la détection et l'identification des surfaces d'eau. La mission TanDEM-X [Krie-2007], du DLR a produit un MNT complet, résolu et précis, des surfaces terrestres du globe. L'imagerie SAR classique est en général inadaptée aux mesures sur les surfaces d'eau, en raison des incidences utilisées, typiquement de 30° à 50°, qui souvent ne permettent pas d'obtenir une radiométrie significative sur l'eau. Cependant, sous certaines conditions, la réponse de l'eau au signal radar peut devenir correcte et exploitable, notamment à faible incidence. Cette section porte sur une étude sur une série de mesures TanDEM-X acquises en 2012 à incidence volontairement faible (environ 20 degrés) et vise d'une part à évaluer la précision sur les surfaces terrestres des données comparées à un MNT précis, et d'autre part à étudier le déroulement sur les surfaces d'eau et à évaluer la qualité des mesures obtenues.

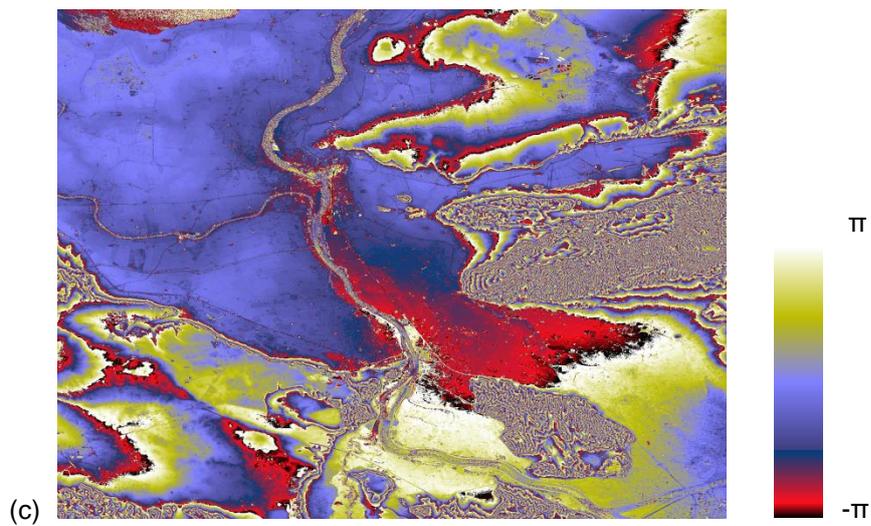
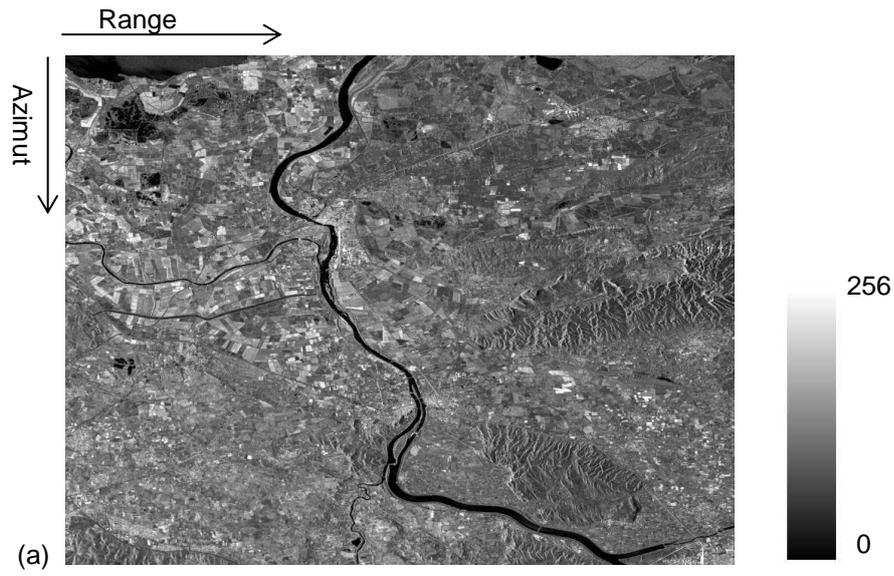
4.2.1. EXTRACTION DE HAUTEURS A PARTIR DES COUPLES TERRASAR-X/TANDEM-X

Les données TanDEM-X traitées sont des CoSSC (Coregistered Single look Slant range Complex), c'est à dire des images mono-vues complexes déjà coregistrées entre elles [DLR-2012-a]. La chaîne de traitement consiste donc ici à générer les produits interférométriques (amplitude, cohérence et phase), à produire les images de phase multi-vues et le MNT à partir de celles-ci.

La production des MNT est constituée de trois étapes majeures [Rich-2007] : d'une part le déroulement de la phase interférométrique, c'est à dire la détermination du nombre de tour de phase en chaque pixel afin de lever l'ambiguïté. Différents algorithmes variant en termes de précision et de temps d'exécution sont utilisables pour cette étape. Dans le cas du logiciel de traitement d'images interférométriques Diapason [Mass-1996], il s'agit de SNAPHU, une méthode statistique de minimisation (Network-Flow algorithm). La seconde étape consiste en l'inversion de la phase déroulée afin d'obtenir les cartes de hauteur toujours en géométrie radar. Cette étape nécessite l'utilisation de GCP (Ground control points) afin de servir de référence absolue pour l'inversion [Ferr-2001] [Kamp-2005] [Duro-2010]. La dernière étape est l'orthoprojection, c'est-à-dire la projection des hauteurs en géométrie radar locales dans une géométrie sol en coordonnées cartésiennes globales.

Les différents produits obtenus au cours du traitement Diapason sont présentés sur la Figure 47. Dans l'image d'amplitude, caractéristique de la rétrodiffusion de la surface, les surfaces d'eau présentent une réponse faible par rapport aux surfaces terrestres. L'image de cohérence interférométrique, représentative de la qualité de la phase, est également faible sur les différents bras de la rivière. L'image de phase interférométrique est déroulée, puis on reconstruit les hauteurs. Sur l'image de cohérence, on peut remarquer les faibles valeurs sur les surfaces d'eau, ainsi qu'une perte de cohérence sur les zones où la topographie varie rapidement. Ceci se retrouve également sur la phase interférométrique, dont les zones bruitées sont corrélées avec celles à faible cohérence. Sur les zones relativement plates, on peut noter que la phase semble facilement déroulable, mais que les zones à forte topographie présentent plus de difficultés.

4.2 Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence



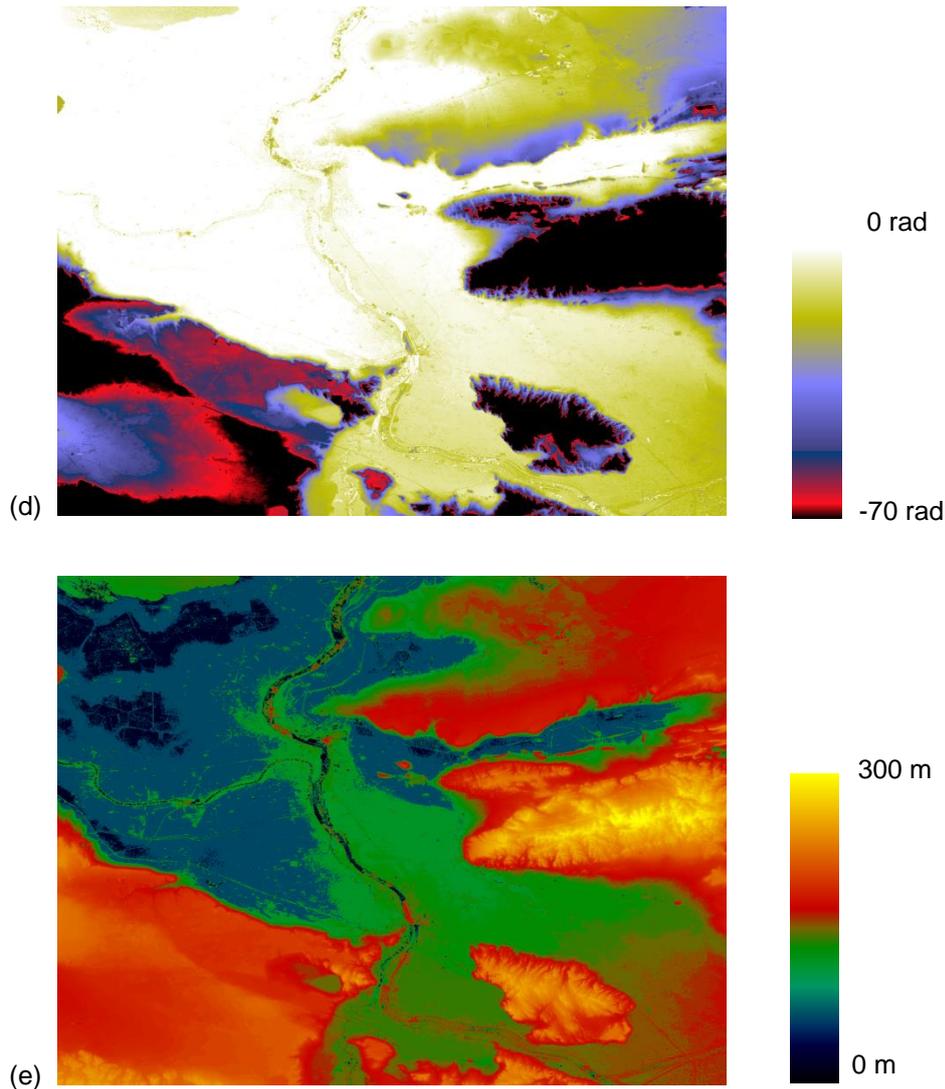


Figure 47 : Données issues d'un couple d'images TerraSAR-X/TanDEM-X fournies par le DLR par le biais de l'AO XTI_HYDR0388. Scène acquise sur le Rhône le 03/10/2012 en mode bi-statique. (a) Amplitude interférométrique, (b) cohérence interférométrique, (c) phase interférométrique enroulée, (d) phase interférométrique déroulée et (e) hauteurs géolocalisées en repère cartésien 30 m x 30 m

Les résultats obtenus ont ensuite été comparés à un MNT très résolu de la zone produit par l'IGN (résolution de 2 m et précision de 20 cm) afin de valider la précision sur les étendues terrestres. Après l'inversion phase-hauteur effectuée avec Diapason, on obtient sur l'image de hauteur un biais moyen de 0.65 m et une variance de 0.25 m sur une zone cohérente. En étudiant les résultats sur les surfaces d'eau, on peut observer des erreurs de hauteur importantes, ainsi qu'une forte hétérogénéité, à la fois en terme d'erreur absolue et de variance. Plusieurs phénomènes sont à mettre en cause.

4.2.2. CARACTERISATION DE L'EAU EN IMAGERIE SAR CLASSIQUE

En imagerie SAR classique (incidences de 20° à 50°), la plupart du temps, les régions recouvertes d'eau ne présentent pas d'information. En effet, le signal reçu est souvent trop faible pour assurer une cohérence interférométrique significative. Cela se traduit par une phase très bruitée et non inversable en hauteur, le bruit étant prépondérant. Le bruit de phase est directement relié à la cohérence, plus celle-ci sera faible, plus la phase sera bruitée et inexploitable (Figure 48). De plus, la configuration géométrique de TanDEM-X ne permet pas directement ici d'obtenir une information de hauteurs des surfaces d'eau à partir de la phase interférométrique. En effet, dans les cas où la rivière n'est pas parallèle à l'orbite, celle-ci est fortement affectée par une composante de phase due à une base along-track, qui caractérise non pas la hauteur de l'eau, mais son déplacement. Nous étudierons ce phénomène dans la section 4.2.5.

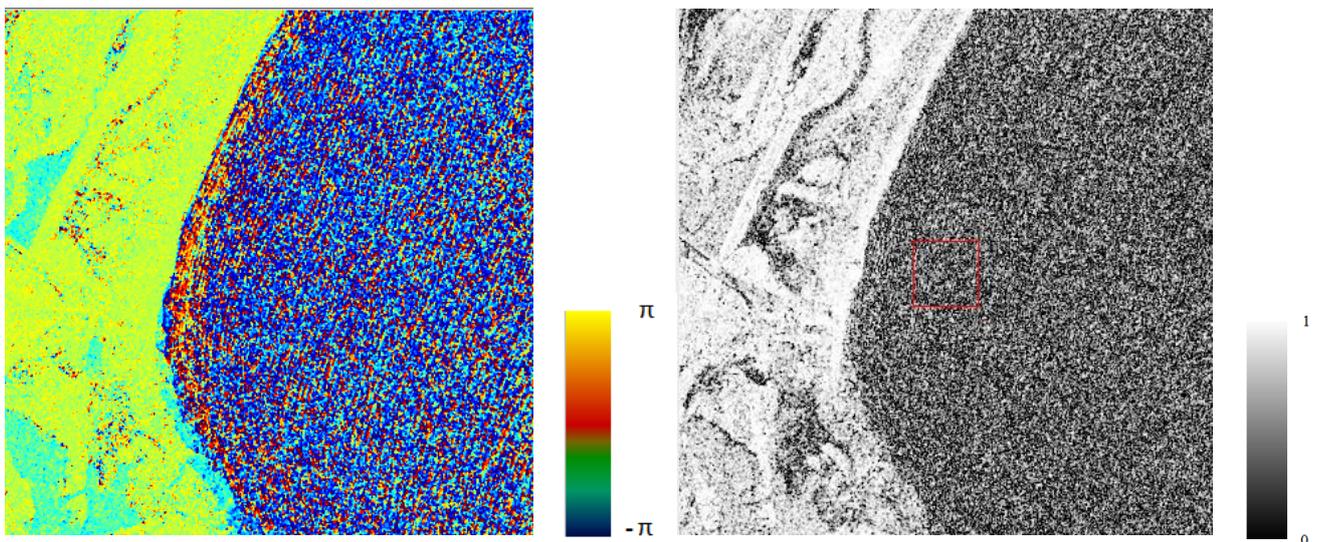


Figure 48 : Phase et cohérence d'une zone de mer : extrait d'une donnée TerraSAR-X/TanDEM-X bi-statique du 02/10/2012

4.2.3. ETUDE DES SURFACES D'EAU COHERENTES ET RESTITUTION DES HAUTEURS

Dans les données TanDEM-X traitées, on remarque que la cohérence sur l'eau varie fortement. Certaines zones géographiques présentent une cohérence accrue et une phase moins bruitée qu'ailleurs. Par ailleurs, la cohérence varie sur une même zone en fonction des dates de prise de vue, ce qui s'explique par une variation de la rugosité liée à la vitesse du vent et au débit.

Sur la Figure 49, avec respectivement de gauche à droite, la phase, la cohérence et l'amplitude, représentant une partie de la rivière où l'on trouve un barrage, on remarque qu'une partie de la rivière présente une cohérence plus forte et une phase peu bruitée. Sur la même zone, l'amplitude y apparaît également plus forte que sur le reste de la rivière.

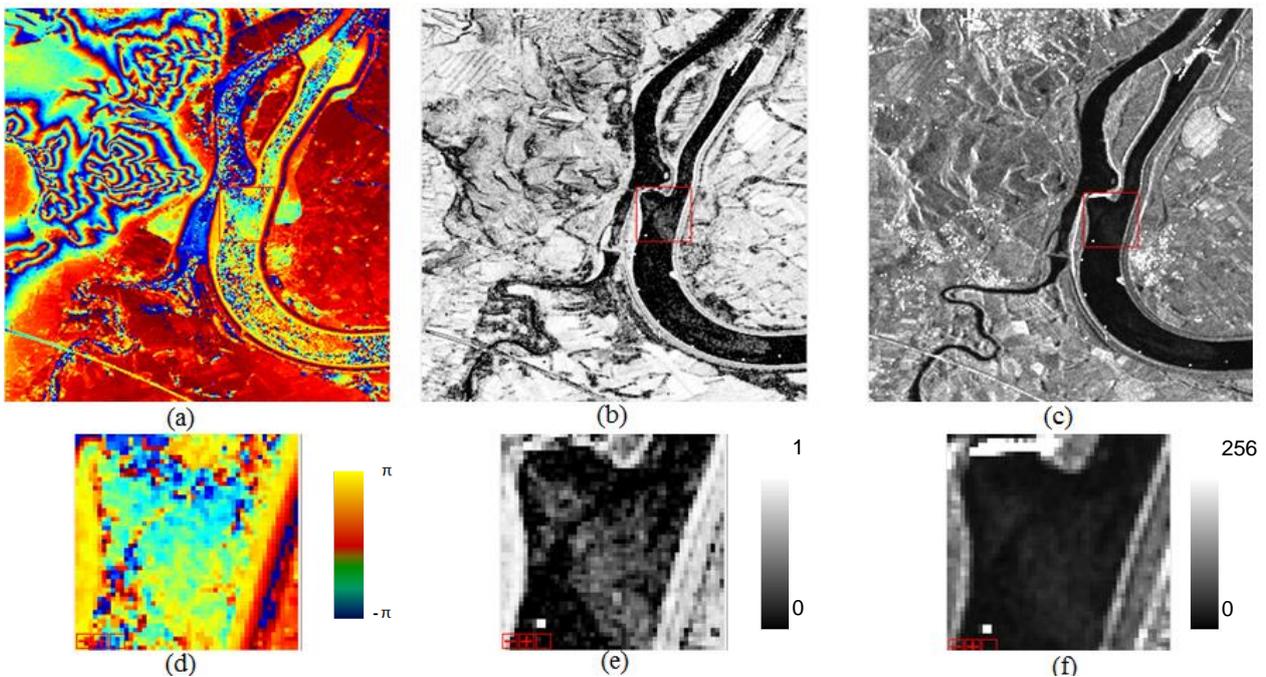


Figure 49 : Phase (a-d), cohérence (b-e) et amplitude (c-f) d'une portion de rivière présentant un barrage

Même si la zone n'est pas déroulée correctement par l'algorithme global employé, on voit sur la Figure 50 que l'information de phase est localement suffisamment propre pour qu'on puisse y pratiquer une inversion phase/hauteur en relatif par rapport à la berge voisine, ou en absolu si l'on emploie une référence. Les résultats présentés ont été produits à partir des interférogrammes générés par la chaîne Diapason, avec une moyenne d'un facteur 5 en azimut et de 3 en distance.

$$H_{amb} = \frac{\lambda H \tan \theta}{2B} \approx 21.6 \text{ m}$$

La valeur moyenne de l'eau par rapport au géoïde sur la coupe est de 22 m (Figure 51), si l'on retire une altitude d'ambiguïté, on obtient une hauteur d'eau d'environ 0.50 m ce qui paraît assez réaliste sachant que les berges sont à 12 m et 15 m de part et d'autre de la rivière. Toutefois, nous ne disposons pas des valeurs du MNT de référence IGN précis sur cette zone pour confirmer.

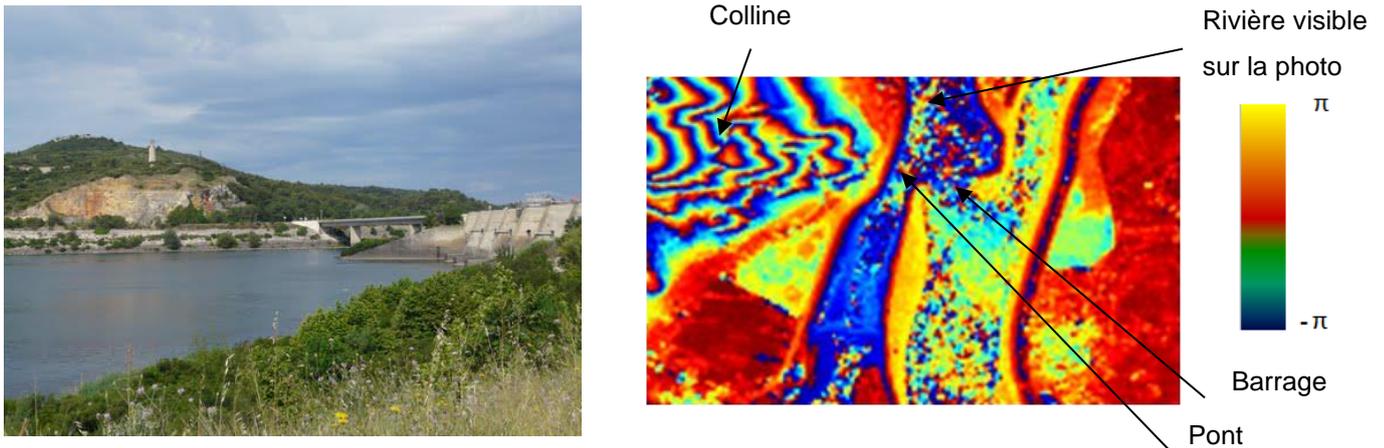


Figure 52 : Barrage de Vallabrègues et image de la phase dans la zone du barrage

En travaillant directement sur la phase (Figure 52) dans la zone considérée, on peut évaluer approximativement la valeur moyenne de la phase sur la portion de rivière qui est cohérente et sur une des rives. On obtient une phase de 3.11 rad sur l'eau et une phase de 5.61 rad sur la rive (dont la hauteur est d'environ 12 m). Cela se traduit par une différence de phase de 2.50 rad, soit pour une hauteur d'ambiguïté de 21.8 m une différence de hauteur de 8.6 m, soit une hauteur d'eau de 3.4 m, ce qui est relativement proche des résultats obtenus à partir de l'image de hauteur géolocalisée. De même, on peut déterminer la variance en phase puis en hauteur sur cette zone : 2.5 m.

Sur la Figure 53, on peut noter une forte variabilité au niveau de la qualité de la phase. Un des bras secondaires de la rivière présente une phase peu bruitée et facilement déroulable à ce niveau. A noter que ce bras rejoint le cours principal comme indiqué sur l'image, ce qui explique probablement les conditions particulières sur l'état de surface de l'eau. Etant donné la localisation de la zone observée, on peut supposer que la vitesse de la rivière est faible mais présente des remous, entraînant une rétrodiffusion radar suffisante pour assurer une réponse du signal. On peut également observer que la zone d'eau cohérente correspond, là aussi, à une zone de forte amplitude du signal, par rapport à l'eau bruitée.

4.2 Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence

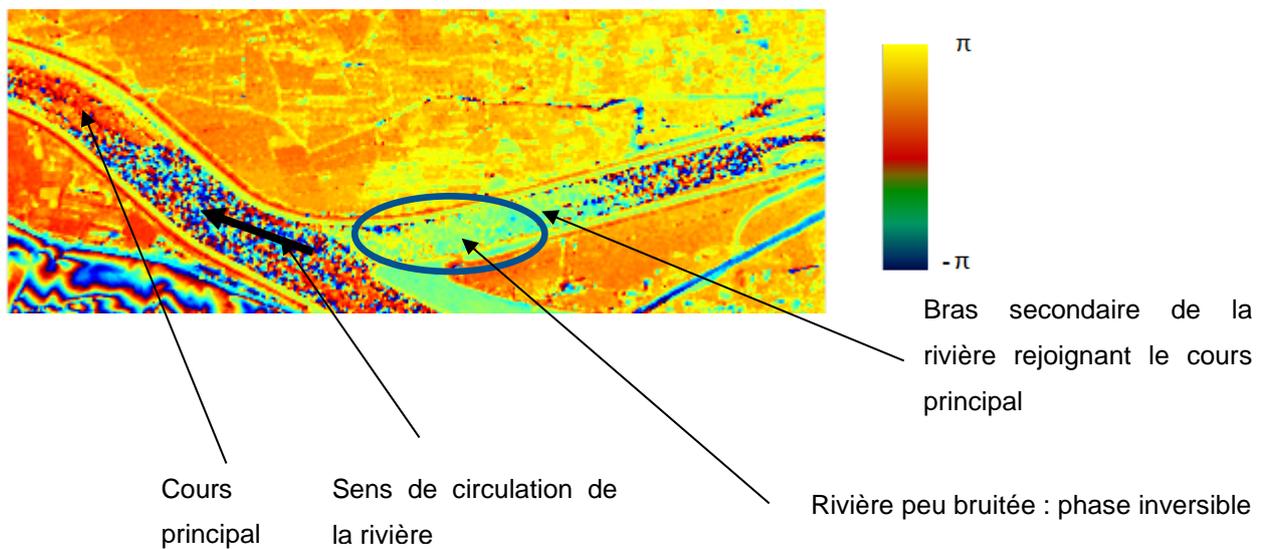


Figure 53 : Observation de la phase sur un bras de la rivière

Sur une coupe de la phase au niveau de la rivière cohérente et présentant peu de mouvement (Figure 54), on voit que l'on peut identifier et inverser les hauteurs de manière assez précise.

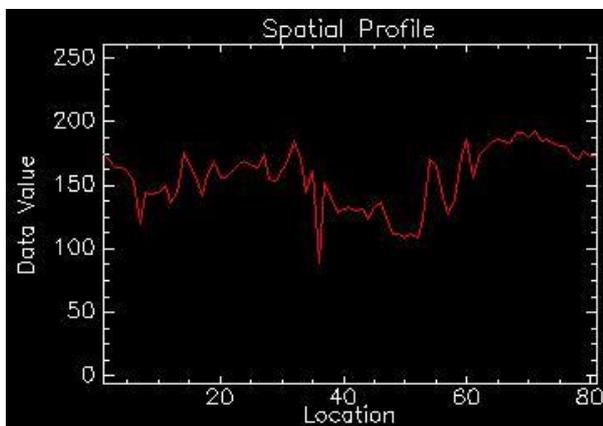


Figure 54 : Profil de la rivière et de ses berges

Une analyse de la phase sur cette zone nous donne une valeur de 3.34 rad pour l'eau et de 3.85 rad pour la rive, soit un écart de phase de 0.51 rad. Ce qui correspond pour une hauteur d'ambiguïté de 21.6 m à un écart de hauteur entre berge et rive de 1.77 m. Ces valeurs sont plausibles par rapport aux images Google Earth de la zone.

4.2.4. FACTEURS LIES AUX VARIATIONS DE COHERENCE DE L'EAU

Précédemment, on a pu remarquer que des facteurs géographiques semblaient liés à la qualité de la phase. Les zones d'eau lente mais avec du remous, avant le barrage ou au confluent de la rivière (bande d'eau morte) avec le Rhône, présentent une réponse en amplitude plus forte ainsi qu'une phase moins bruitée et une précision altimétrique en restitution de hauteurs plus importante. Ceci est probablement dû à la caractéristique physique de l'eau qui présente ici des conditions de rétrodiffusion plus favorables liées à l'augmentation de la rugosité locale ou aux variations. De plus, outre le facteur de qualité de phase, dû ici à une amplitude suffisante, on peut noter que ces zones lentes semblent donner une phase réaliste associée à la topographie de l'eau. Les zones rapides présentent elles une phase qui semble être fonction de la direction de la rivière par rapport à la trace orbitale.

Les différentes acquisitions de zones géographiques identiques présentent de fortes variations en termes de qualité de la phase. Suivant les dates, on peut remarquer que la phase peut être totalement bruitée et inexploitable ou bien remarquablement cohérente sur une partie de la rivière.

Ainsi sur les mesures du 10/01/2012, on note que la phase (Figure 55) est peu bruitée sur la majeure partie de la rivière. De même, l'étang de Vaccarès et ceux aux alentours présentent une cohérence relativement élevée localement.

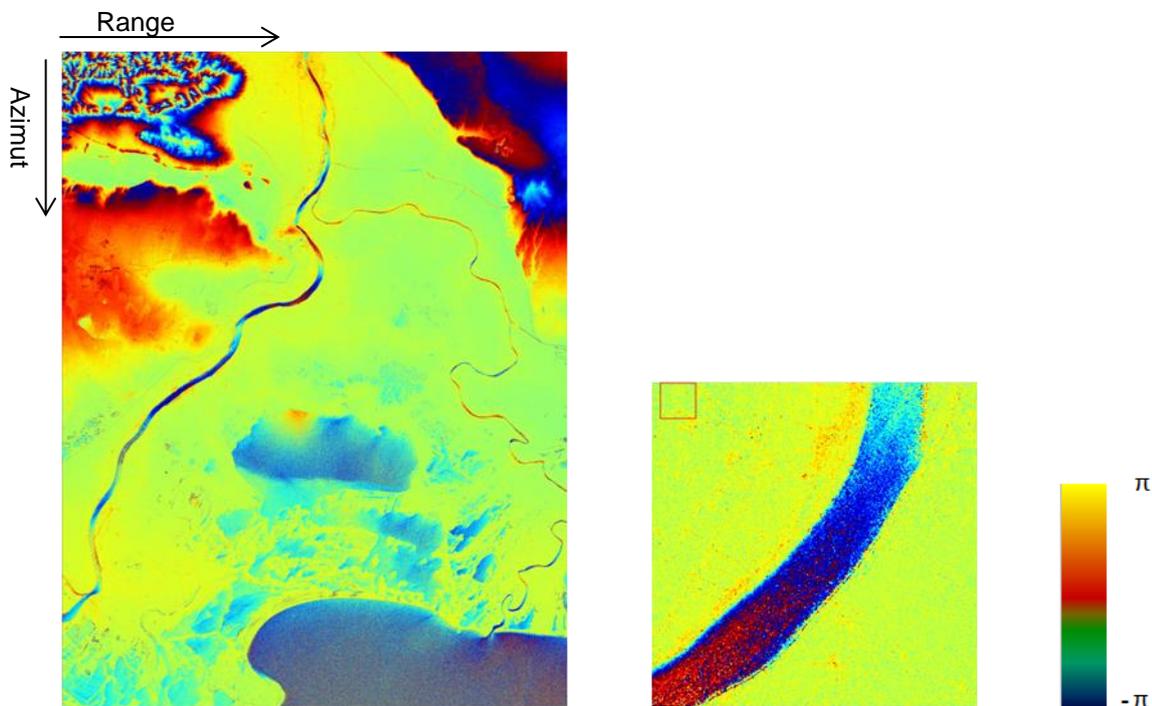


Figure 55 : Phase sur la Camargue le 10/01/2012

En étudiant les données météo, on peut noter que le niveau d'eau était élevé à cette période de l'année en comparaison des autres acquisitions (0.15 mNGF sur Vaccarès). De même, les données du 19/12/2011, acquises dans des conditions météorologiques proches, présentent des caractéristiques similaires avec une rivière et des étangs très cohérents (Figure 56). A cette date, le niveau d'eau moyen

4.2 Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence

était important (+0.30 mNGF sur Vaccarès). Des données sur la vitesse du vent nous informent aussi que le vent était présent ce jour-là (1.7 m/s) ce qui explique l'augmentation de rugosité et donc d'amplitude des surfaces d'eau.

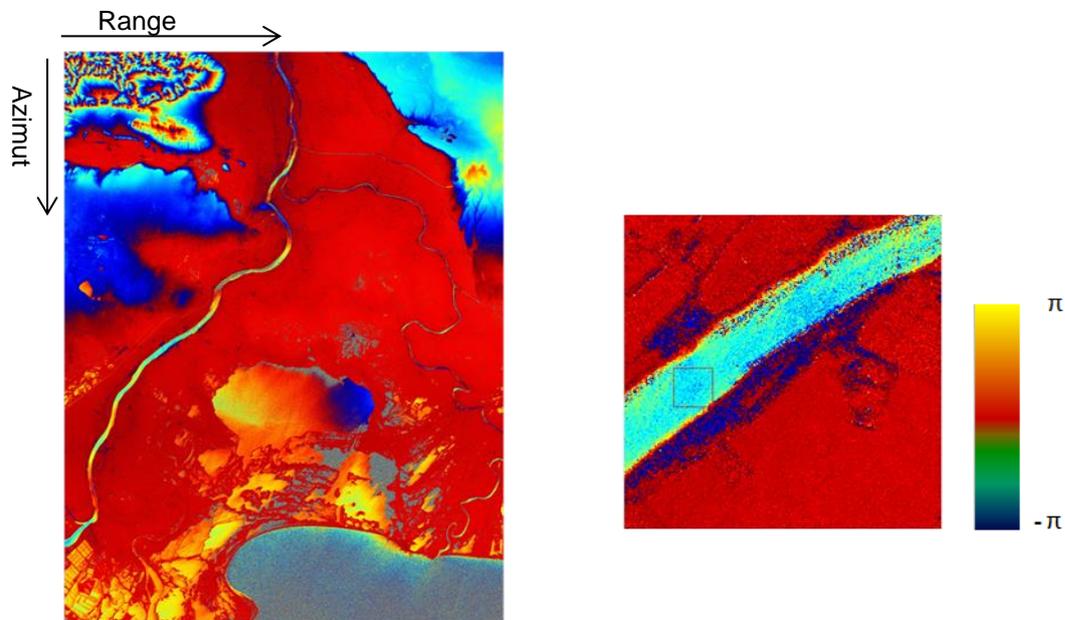


Figure 56 : Phase sur la Camargue le 19/12/2011 (présence de vent)

Au contraire, le 02/11/2012 (Figure 57), la phase sur les surfaces d'eau est très bruitée, sauf localement dans les zones d'eau étudiées ci-dessus. Les mesures météo de cette période nous montrent que le vent était faible (0.3 m/s) ce qui explique notamment pourquoi le lac apparaît aussi noir sur l'image d'amplitude (Figure 58).

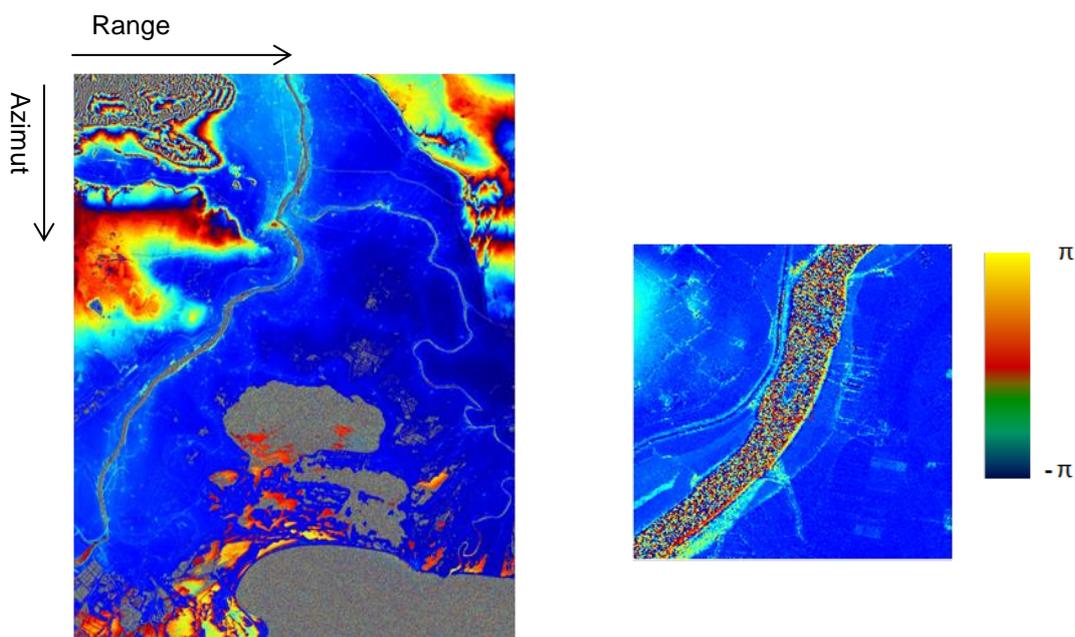


Figure 57 : Phase sur la Camargue le 02/11/2012 (pas de vent)

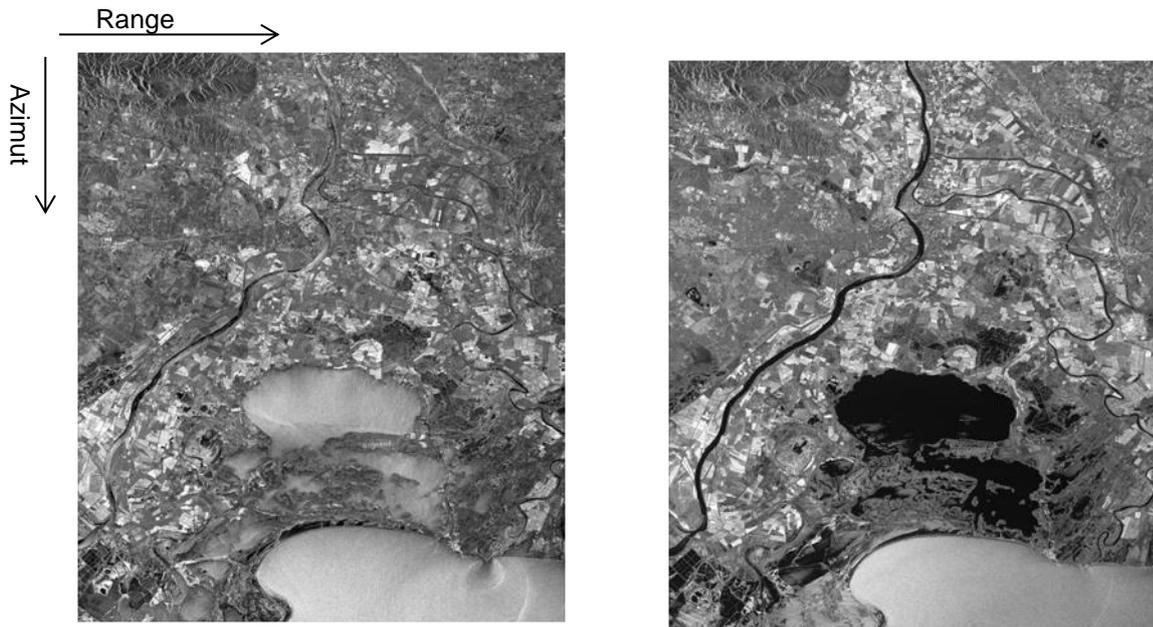


Figure 58 : Images d'amplitude avec vent / sans vent sur la même zone d'acquisition

En comparant les images d'amplitude, cohérence et phase, on remarque bien une ressemblance forte entre elles. Ainsi sur la rivière, la rétrodiffusion en cas de faibles vents et sans remous est trop faible aux incidences SAR. Le signal reçu par le récepteur est trop faible pour assurer une cohérence correcte et la phase est donc bruitée. Dans certains cas toutefois, les conditions météo (vent modéré à fort) entraînent une modification de l'état de surface de l'eau qui devient plus « rugueuse » et augmente sa rétrodiffusion et ainsi sa réponse en amplitude. Dans ce cas, le retour est suffisant pour assurer une cohérence correcte qui permet d'obtenir une phase exploitable. Il aurait également pu s'agir de précipitations qui ont également pour effet de produire de la « rugosité de surface » sur l'eau mais les bulletins météo n'indiquent pas de pluie aux dates considérées.

Lors des acquisitions sans vent, la rétrodiffusion et la cohérence sont faibles sur l'eau. Cependant, certaines zones spécifiques présentent une réponse forte et une phase peu bruitée. Il pourrait s'agir de zones où la rugosité est forte localement. C'est notamment le cas avant le barrage et au confluent des deux rivières. La jonction des deux bras peut créer des zones de remous qui entraînent de la rugosité même en l'absence de vent et une meilleure réponse radiométrique.

4.2.5. ETUDE DES EFFETS DU MOUVEMENT DE L'EAU SUR LA PHASE

On a vu précédemment que la phase sur les zones de rivière en mouvement n'était pas réaliste pour être seulement due à une composante topographique (excepté quand la rivière est orientée along-track). En effet, on observe ici un phénomène provoqué par la composante azimutale de la base « along track

4.2 Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence

interferometry » [Rome-2000], celle-ci n'étant pas exclusivement perpendiculaire au déplacement du satellite. Ainsi, on mesure le déplacement suivant l'axe distance de la zone observée, ce qui dans la rivière se traduit par l'apparition d'une variation de phase résiduelle. Dans le cas où la rivière est parallèle à l'axe azimut, la composante radiale de la vitesse est nulle, et la phase observée est directement la phase topographique (si l'on néglige les courants transversaux de la rivière). Dans les autres cas, on peut mesurer la composante radiale de la vitesse de la rivière, au maximum quand celle-ci est perpendiculaire au déplacement du satellite. Des études à partir des données SRTM et TerraSAR-X ont été menées sur ces aspects, à la fois sur les rivières [Rome-2007, Rome-2010] ainsi que sur les océans [Rome-2014].

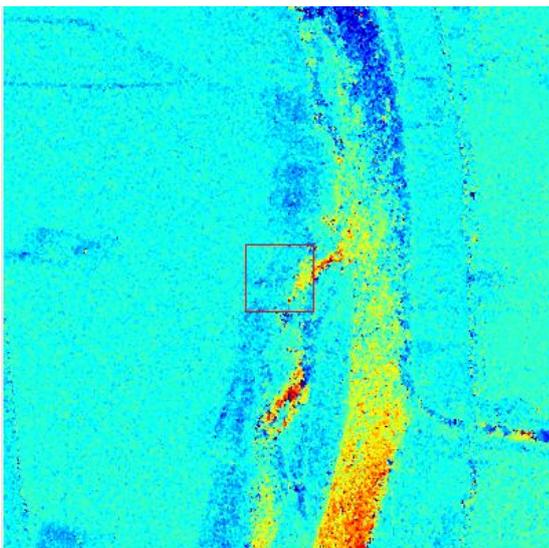
A partir des équations de l'interférométrie along-track [Nouv-2008], on peut relier la différence de phase, entre une zone immobile et une en mouvement, avec la différence de vitesse entre les deux :

$$V_{radiale} = \frac{\lambda V_{sat} \varphi}{4\pi B_{along} \sin(\theta)} \quad (101)$$

avec λ la longueur d'onde, φ la différence de phase, V_{sat} la vitesse du satellite, B_{along} la composante azimut de la base, et θ l'angle de visée.

La phase observée contient ici à la fois la composante topographique et celle du mouvement, les deux n'étant pas dissociables. Pour parvenir à une estimation correcte de la phase liée au mouvement de l'eau, on suppose que la phase topographique sur la rivière est globalement constante, la variation de niveau d'eau étant très faible vis-à-vis de la hauteur d'ambiguïté. On estime cette phase topographique sur une zone de la rivière où la phase along-track est nulle, c'est-à-dire la rivière est parallèle à la trace du satellite. Une fois cette phase estimée, on la considère comme un biais constant à retirer pour estimer la composante courant de la phase.

Sur la zone étudiée, on peut ainsi calculer diverses vitesses radiales en fonction de l'orientation de la rivière (Figure 59).



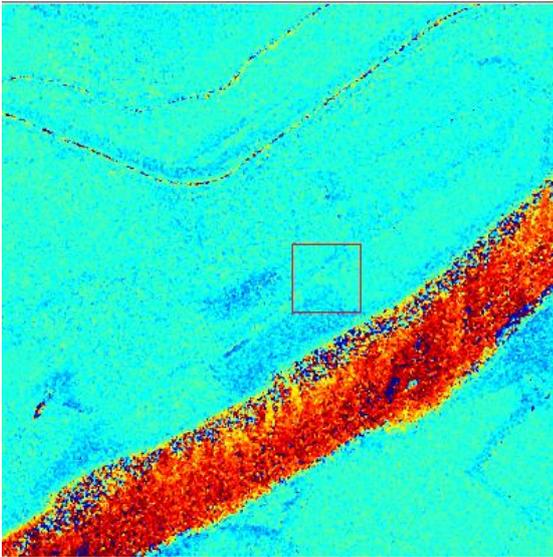
Référence (rivière parallèle à la trace orbitale) :

$$\Phi_{ref} = -0.04 \text{ rad}$$

$$\varphi = 0.$$

$$V_{rad} = 0. \text{ m/s}$$

$$V = ? \text{ m/s (non estimable)}$$



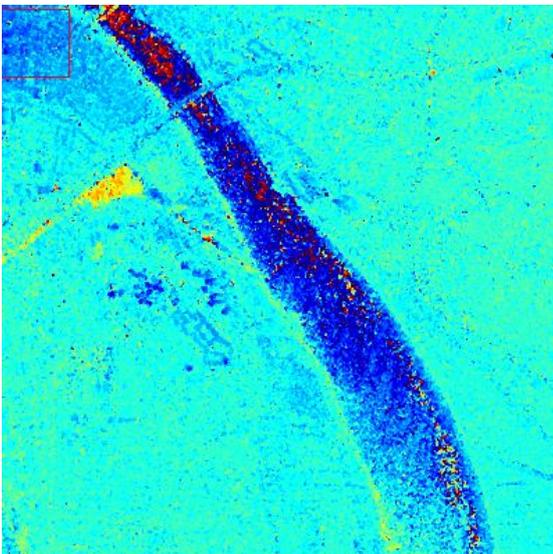
$$\Phi = -1.87 \text{ rad}$$

$$\varphi = \Phi_{\text{ref}} - \Phi = 1.83 \text{ rad}$$

$$V_{\text{rad}} = 1.53 \text{ m/s}$$

$$\text{Pente} = 1.13 \text{ rad}$$

$$\mathbf{V = 1.70 \text{ m/s}}$$



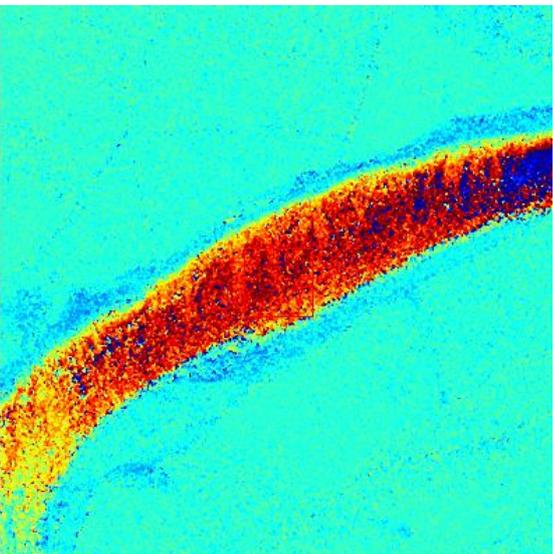
$$\Phi = 1.50 \text{ rad}$$

$$\varphi = -1.54 \text{ rad}$$

$$V_{\text{rad}} = -1.35 \text{ m/s}$$

$$\text{Pente} = -0.70 \text{ rad}$$

$$\mathbf{V = 1.90 \text{ m/s}}$$



$$\Phi = -1.91 \text{ rad}$$

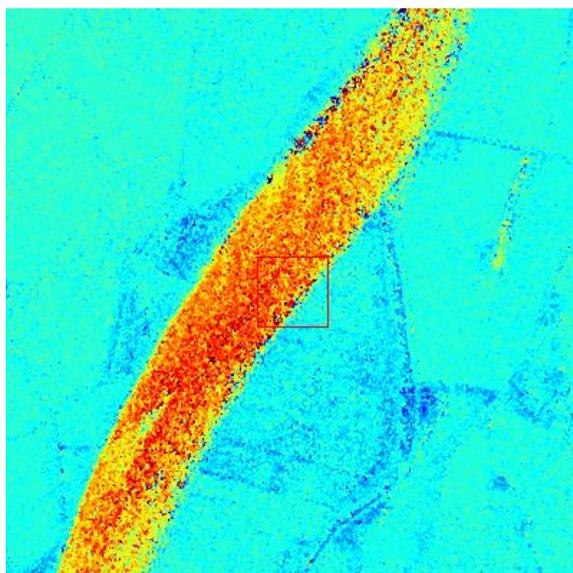
$$\varphi = 1.87 \text{ rad}$$

$$V_{\text{rad}} = 3.14 \text{ m/s}$$

$$\text{Pente} = 1.10 \text{ rad}$$

$$\mathbf{V = 1.75 \text{ m/s}}$$

4.2 Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence



$$\Phi = -1.60 \text{ rad}$$

$$\varphi = 1.56 \text{ rad}$$

$$V_{\text{rad}} = 1.36 \text{ m/s}$$

$$\text{Pente} = 0.73 \text{ rad}$$

$$\mathbf{V = 1.95 \text{ m/s}}$$

Figure 59 : Images de phase sur le Rhône utilisées pour extraire la vitesse moyenne de surface

La vitesse le long de la rivière semble relativement constante. Les écarts que l'on peut observer sont dus aux mesures sur les zones de phase « rouges » qui sont à la limite de transition de phase avec le « bleu » (saut de phase) ce qui provoque des erreurs de mesure. Pour corriger cela, il faudrait dérouler la phase ou bien filtrer les valeurs. Les mesures de vitesse de courant de surface observées autour d'Arles fournies par la Compagnie Nationale du Rhône à la date de la prise de vues montrent des vitesses moyennes autour de 1.5 m/s, ce qui est proche des mesures issues de l'inversion de phase.

On voit ainsi que l'étude des hauteurs d'eau sur les images TanDEM-X est difficile à faire automatiquement. Le calcul de la composante along-track de la phase augmente l'imprécision de la mesure de la topographie des zones d'eau, même lorsque celles-ci présente une réponse radar suffisante.

4.2.6. PERSPECTIVES ET APPLICATIONS POUR SWOT

Dans le cadre de SWOT, un MNT mondial servira de référence pour inverser la phase interférométrique et prédire le layover. Différents MNT, plus ou moins résolus, sont issus de missions antérieures, comme TanDEM-X, SRTM, etc.... Cependant, ces MNT ne présentent en général pas d'information de hauteur exploitable sur l'eau, de par la rétrodiffusion trop faible à ces angles de vues qui empêche souvent l'exploitation des mesures de phase, ou bien des hauteurs inconsistantes du fait de différentes dates d'acquisitions. Acquérir des informations sur les niveaux d'eau moyens est donc, dans le

mode HR (hydrologique) de SWOT, un enjeu important dans la production du MNT et du masque d'eau de référence.

Les observations faites à partir des images TanDEM-X montrent, que sous certaines conditions et en certaines zones, il est possible d'acquérir une information de phase peu bruitée, de laquelle on peut extraire des hauteurs d'eau permettant ainsi de compléter ou corriger les informations des MNT terrestres existants. Cependant, en réalité puisque les surfaces d'eau sont mobiles, selon l'orientation de la rivière, la phase peut être majoritairement composée d'un terme de déplacement et il est donc difficile d'extraire très précisément les hauteurs. Avec une caractérisation des effets du mouvement de la rivière selon l'axe azimutal, on pourrait envisager une méthode de restitution des hauteurs malgré le terme de vitesse. Dans le cas de SWOT, ces effets d'interférométrie along-track seront peu présents, étant données les caractéristiques physiques de la base (pas de composante along-track) offrant ainsi pour cette mission des conditions idéales pour la mesure de hauteurs des surfaces d'eau.

Au niveau du déroulement de la phase, les données TanDEM-X ont pu montrer comment les algorithmes classiques de déroulement peuvent échouer à cause du bruit de phase. Même si les conditions seront différentes dans SWOT (stabilité de la phase plus forte sur l'eau, pas de base along-track), des difficultés similaires peuvent être rencontrées dès lors que les structures seront fines ou la rugosité trop faible sur toute la rivière. Pour ces raisons, la méthode présentée dans la section suivante a pour but de s'affranchir des méthodes classiques de déroulement.

4.3. PRINCIPE DE RESTITUTION DE HAUTEURS SANS DEROULEMENT SPATIAL DE PHASE EN MODE HR

Une caractéristique majeure de SWOT est son point de fonctionnement particulier par rapport aux missions passées. L'objectif est d'imager des zones d'eau, aux variations topographiques faibles entre les différentes acquisitions. Ainsi, on peut considérer que, malgré une altitude d'ambiguïté fine, qui permet d'obtenir une sensibilité topographique forte, les variations mesurées n'auront pas une amplitude trop importante. Dans ce cas, l'utilisation de modèles numériques de terrain précis, ou bien issus ou améliorés à partir des acquisitions SWOT précédentes, peut permettre d'obtenir un déroulement de phase pixel par pixel.

Précédemment, on a vu que les méthodes « classiques » de déroulement de la phase peuvent être très complexes, présenter des temps de calcul importants et être source d'erreurs. Dans le cas de SWOT, le contexte est différent de celui des missions antérieures car SWOT bénéficie de la disponibilité de données auxiliaires a priori relativement précises comme la nouvelle version du MNT mondial généré grâce à la mission SRTM à 30 m de résolution, complété aux hautes latitudes, et avec des niveaux d'eau édités. De

4.2 Hauteurs d'eau à partir de produits TanDEM-X à faible incidence

plus, des masques d'eau préétablis à partir d'images Landsat et une importante base de données des lacs et des rivières sont également en cours de préparation pour la mission SWOT. Tout ceci s'avère être un appui de taille dans le déroulement de la phase. En effet, l'utilisation d'une référence, simulée dans les conditions d'acquisition de la mesure SWOT, permet de générer un interférogramme de référence présentant une phase proche de la phase mesurée. Dans le cas où l'incidence de référence estimée est proche de l'incidence réelle de l'image, c'est-à-dire si la référence utilisée est suffisamment proche de la réalité mesurée, il est possible de lever l'ambiguïté de phase, sans employer des méthodes de déroulement local spatial. Le critère de l'altitude d'ambiguïté, qui est la hauteur pour laquelle la phase fait un tour complet, est utilisé pour quantifier la qualité du déroulement par MNT de référence.

Différentes méthodes utilisant plusieurs couples interférométriques ont été développées pour des missions précédentes. Le JPL, à partir des données SEASAT [Gabr-1989], a testé une méthode alternative de déroulement de phase. De la même façon, utiliser l'information d'un modèle numérique de terrain préexistant, permet de simuler un couple interférométrique dit « de référence » qui permettra de faciliter le déroulement de phase [Eine-2005]. Enfin, pour le traitement des données TanDEM-X, des méthodes combinant l'utilisation d'un MNT de référence auxiliaires et des acquisitions de multi-base interférométriques ont été proposées [Lach-2012-a]. A partir de trois images de phase acquises à des dates proches, et en générant deux interférogrammes présentant une base différente, on peut générer un premier MNT facilement déroulable grâce à sa forte hauteur d'ambiguïté à l'aide du MNT auxiliaire. De fait, il sera relativement peu précis, mais pourra servir d'appui pour dérouler le second couple interférométrique, présentant une hauteur d'ambiguïté plus faible et donc une meilleure précision altimétrique.

La méthode présentée par la suite utilise le déroulement de phase direct, pixel par pixel, appliqué à SWOT. A partir de l'interférogramme mesuré, des paramètres d'acquisitions (orbites, near-range, etc...) et d'un MNT de référence suffisamment précis, l'objectif est de déterminer les coordonnées X, Y, Z de chaque point de l'interférogramme.

4.3.1. SCHEMA GENERAL ET PRINCIPE DE LA METHODE

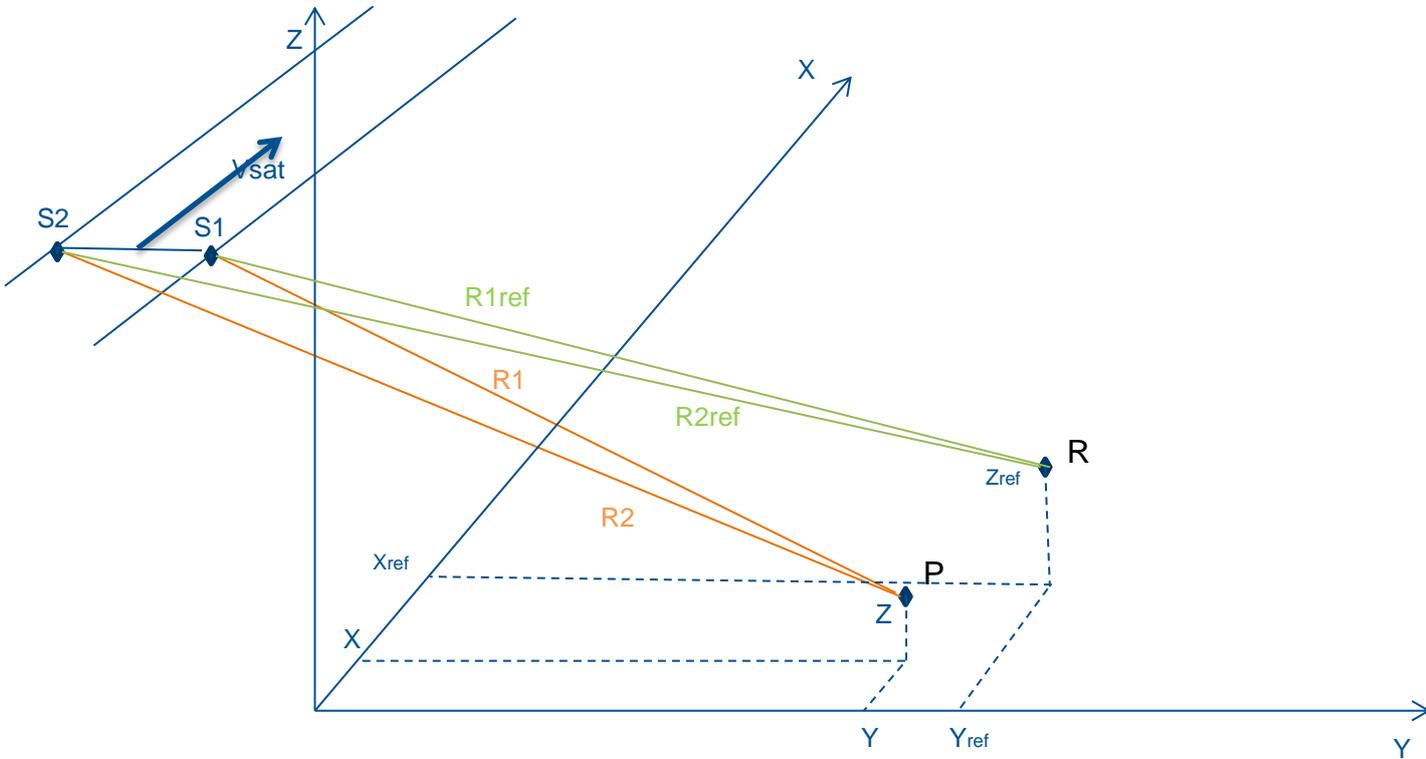


Figure 60 : Schéma général du principe de restitution de hauteur par MNT de référence, dans un référentiel cartésien

Les équations d'inversion de la phase en hauteur permettent, à partir de la connaissance de trois éléments : la mesure de distance absolue à l'émission, R_1 , la mesure de phase interférométrique et le Doppler de restitution de l'image, d'obtenir précisément les coordonnées géoréférencées de chacun des points de l'interférogramme (Figure 60).

$$(X - X_{S1})^2 + (Y - Y_{S1})^2 + (Z - Z_{S1})^2 = R_1^2 \tag{102}$$

$$(X - X_{S2})^2 + (Y - Y_{S2})^2 + (Z - Z_{S2})^2 = R_2^2 \tag{103}$$

$$V_X(X - X_{S1}) + V_Y(Y - Y_{S1}) + V_Z(Z - Z_{S1}) = -\frac{\lambda f_{dop} R_c}{2} \tag{104}$$

4.3 Principe de restitution de hauteurs sans déroulement spatial de phase

La première équation (102) relie le range d'acquisition R_1 , connu à partir des mesures d'horloge de l'instrument, aux coordonnées X , Y , Z recherchées. Les composantes X_{S1} , Y_{S1} , Z_{S1} sont connues et déterminées à partir de la trajectoire de l'orbite. La seconde équation (103) relie le range de l'antenne réceptrice R_2 aux coordonnées X , Y , Z . Il s'agit de l'équation clé de la méthode. En effet, la composante R_2 n'est a priori pas connue (R_2 n'émet pas), celle-ci dépendant de la topographie du milieu observé, et n'étant pas calibrée par l'horloge de l'instrument comme R_1 . Il faut la déterminer à partir de l'interférogramme de référence. A partir du MNT de référence, on détermine les points de référence en moyennant les points du MNT associés à une même case radar. A partir de ces derniers, on calcule une phase de référence φ_{ref} telle que :

$$\varphi_{ref} = -\frac{2\pi}{\lambda}(R_{1ref} - R_{2ref}) \quad (105)$$

De plus, on dispose de la phase enroulée φ de notre image telle que :

$$\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \quad (106)$$

R_2 ne peut pas être directement déduit de (5) car la phase n'est pas déroulée, mais uniquement connue modulo 2π . Cependant, grâce à l'hypothèse de proximité entre le MNT de référence et la réalité, on peut déterminer une phase différentielle φ_{diff} telle que :

$$\varphi_{diff} = \varphi_{ref} - \varphi = -\frac{2\pi}{\lambda}((R_{1ref} - R_{2ref}) - (R_1 - R_2)) \quad (107)$$

A partir de l'hypothèse précédente, la phase est désormais inversable directement sans déroulement et on peut extraire R_2 tel que :

$$R_2 = -\frac{\lambda}{2\pi}\varphi_{diff} + R_1 + R_{2ref} - R_{1ref} \quad (108)$$

La seconde équation peut ainsi être exploitée, les seules inconnues restantes étant les X , Y , Z .

La troisième équation (104) utilise l'information de Doppler de l'image. Dans la majeure partie des cas, on focalise les images à Doppler nul. Dans ce cas, le plan d'acquisition est orthogonal à la vitesse du satellite. On peut ainsi à partir de ces trois équations déterminer les coordonnées X , Y , Z .

4.3.2. GENERATION D'UN INTERFEROGRAMME DE REFERENCE

L'enjeu principal de cette approche est donc de pouvoir produire un interférogramme de référence suffisamment proche de la réalité pour présenter les mêmes franges interférométriques, de manière à lever les ambiguïtés par différence.

Pour cela, on projette un MNT de référence dans la géométrie d'acquisition de SWOT, à partir des caractéristiques orbitales et instrumentales (Figure 61). Pour chaque porte radar, à un angle Doppler de l'interférogramme mesuré, les coordonnées d'un pixel moyen X_{ref} , Y_{ref} et Z_{ref} sont déterminées, puis on calcule la phase interférométrique de référence équivalente correspondant à cette position. Cette étape est importante si l'on veut éviter les erreurs de déroulement. L'objectif est ici d'obtenir des points de référence qui sont suffisamment proches du point dont on cherche à inverser la phase, c'est-à-dire ayant un angle d'incidence voisin, car c'est ce facteur qui détermine la condition de rupture d'ambiguïté. Nous verrons par la suite différentes méthodes permettant d'optimiser cette étape de projection en géométrie radar, et visant à limiter les erreurs de déroulement.

Un autre aspect important à considérer est que le MNT de référence n'est pas toujours suffisamment résolu pour pouvoir associer à chaque pixel radar des contributeurs issus de la référence. Dans ce cas, il faut soit suréchantillonner le MNT de référence, soit interpoler les résultats de la projection. Dans ce dernier cas, il convient d'être vigilant. La position X_{ref} , Y_{ref} et Z_{ref} des points de référence n'a pas besoin d'une précision importante, il suffit qu'elle soit dans une zone suffisamment proche de la position réelle respectant le critère d'ambiguïté pour dérouler correctement. Cependant, il faut veiller à ce que la phase de référence du pixel i corresponde parfaitement aux coordonnées de référence du point i associé, sous peine de faire apparaître des erreurs lors de l'inversion. En pratique, cela consiste à interpoler les coordonnées des pixels de référence sur tous les pixels radar, puis à calculer la phase de référence en ces points. En revanche, il ne faut pas interpoler la phase de référence en même temps que l'interpolation des coordonnées, sous peine de ne plus être parfaitement cohérent entre la phase de référence et les coordonnées de référence permettant d'inverser l'équation (108).

4.3 Principe de restitution de hauteurs sans déroulement spatial de phase

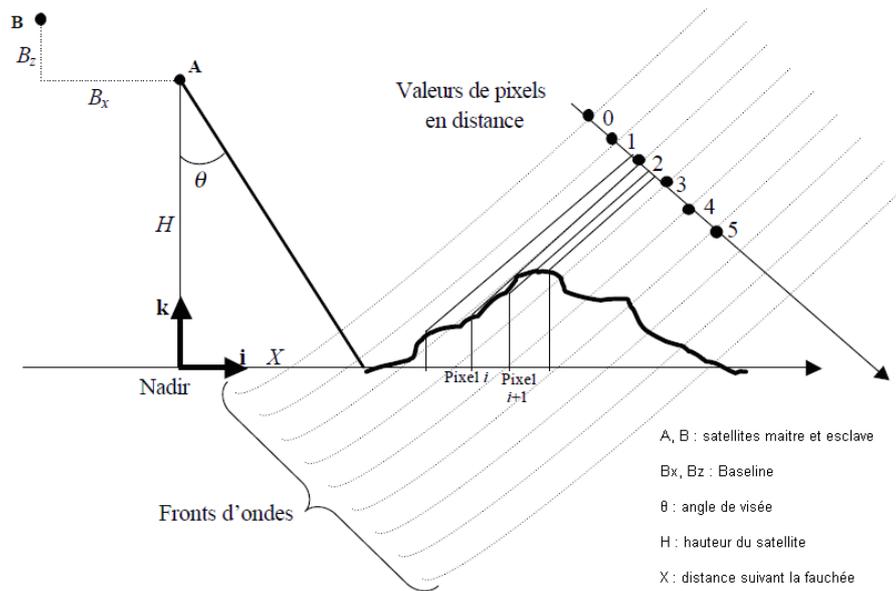


Figure 61 : Méthodologie de projection de l'interférogramme de référence : même principe géométrique que pour la simulation d'images SWOT

4.3.3. PRESENTATION DES RESULTATS DANS UN CAS IDEAL

Les résultats suivants sont obtenus sur une image simulée réaliste avec un niveau de bruit thermique représentatif de SWOT, mais où la restitution de hauteur est effectuée avec un MNT de référence parfait (égal au MNT de simulation) et sans erreurs de connaissance du range d'acquisition (orbite, attitude et délais troposphériques supposés parfaitement connus). La Figure 62 présente l'interférogramme que l'on souhaite dérouler, en pleine résolution (multivue d'un facteur 10 en azimuth seulement pour la visualisation).

On peut alors vérifier que la restitution est de bonne qualité, et non biaisée, en comparant avec les images d'entrée. Les hauteurs obtenues (Figure 63) sont cependant très bruitées. De même, la géolocalisation des pixels est affectée fortement par le bruit. Les méthodes utilisées pour obtenir les produits de hauteurs d'eau à partir des hauteurs géolocalisées « brutes » issues de la phase seront décrites dans le chapitre suivant. Pour valider les résultats à ce niveau, les pixels d'eau sont moyennés directement et pondérés avec leur surface théorique, et la hauteur obtenue est comparée avec la moyenne des hauteurs d'eau du MNT de simulation.

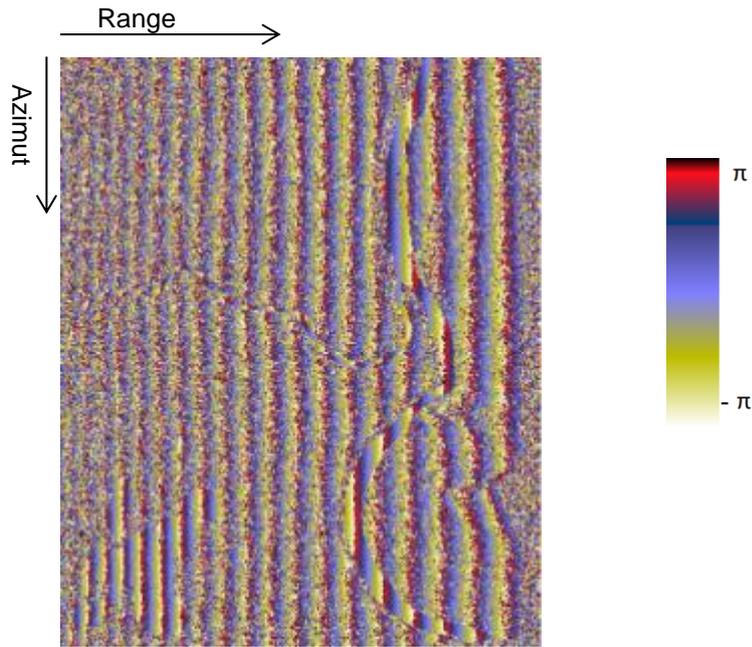


Figure 62 : Interférogramme de simulation avant déroulement et inversion de phase

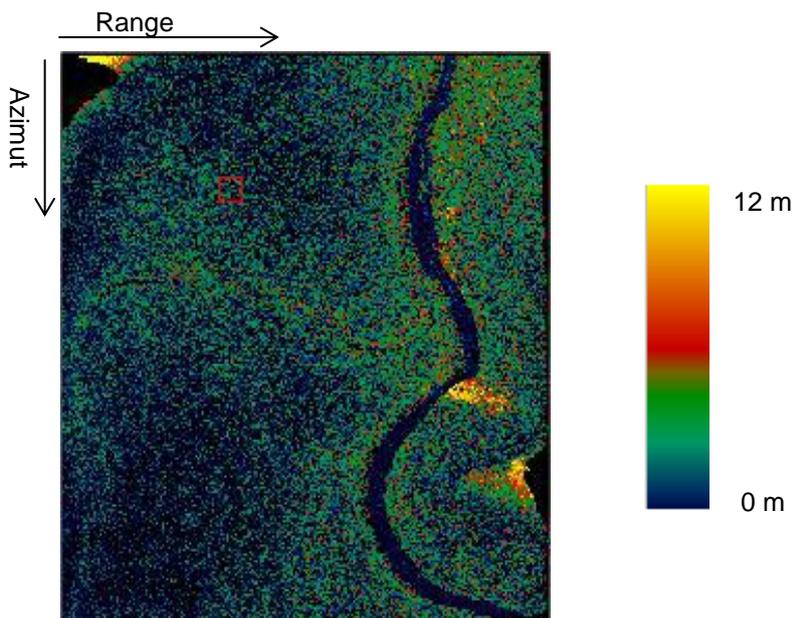


Figure 63 : Hauteurs restituées à partir de l'interférogramme dans un cas idéal (parfaite connaissance du range, MNT de référence identique à celui utilisé pour simuler les données)

4.4. ESTIMATION DE HAUTEURS EN MODE LR

Dans la section précédente, une méthode d'inversion phase-hauteur utilisable pour le mode HR de SWOT a été décrite. Dans le cas du mode LR, de fortes similitudes permettent d'envisager une méthodologie de traitement proche. Quelques spécificités liées en particulier au traitement bord et à la moyenne des produits descendus au sol sont abordées dans ce chapitre, afin d'illustrer les différences avec la méthode proposée.

4.4.1. L'INVERSION PHASE-HAUTEUR : HAUTEUR DE REFERENCE ET MEAN SEA SURFACE

Les neuf vues générées à bord constituent les produits interférométriques du mode LR de SWOT. Comme décrit dans le chapitre 3, une fois les données brutes focalisées, un déroulement différentiel est appliqué aux interférogrammes à partir d'une donnée de hauteur de référence embarquée à bord. De la même façon que pour le mode HR, où l'on utilise un MNT de référence, en simulant la phase correspondant à une surface de mer à une hauteur de référence donnée, on obtient une phase de référence proche de notre phase d'acquisition. En combinant les deux par produit hermitien, on obtient un interférogramme différentiel qui ne présente plus de sauts de phase (ou très peu), et dont les valeurs sont représentatives de l'écart entre notre hauteur de référence utilisée et la réalité de notre acquisition. On peut ensuite moyennner les produits interférométriques des neuf vues à bord par km^2 avant de les descendre au sol. L'absence de saut de phase permet le moyennage. A noter que s'il reste quelques franges résiduelles, typiquement au near-range, il est possible de les supprimer durant le traitement sol. En revanche, une frange à l'intérieur d'un pixel kilométrique crée une erreur irréversible lors de l'étape de moyennage, ce qui doit donc être évité.

4.4.1.1. PRESENTATION DE LA SURFACE MOYENNE DE LA MER (MSS)

Plusieurs conditions sont nécessaires à la bonne mise en œuvre du déroulement de phase par utilisation de la MSS. Dans cette partie, nous décrivons la condition permettant d'atteindre un déroulement de bonne qualité sur toute l'image, sans avoir de phase résiduelle à dérouler au sol. Pour cela, la valeur utilisée comme référence doit être proche de la réalité, pour satisfaire le critère dit de « hauteur d'ambiguïté », à savoir la variation de hauteur pour laquelle la variation de phase correspond à un tour complet. Celle-ci varie en fonction du range, d'environ 8 m en near range jusqu'à 50 m au far range, ce qui donne un critère critique de + ou - 4 m autour de notre valeur réelle. Si l'on ne satisfait pas cette condition, il reste des tours de phase dans l'interférogramme différentiel et il n'est plus possible d'associer directement phase et hauteur sans déroulement spatial local. Pour cette raison, la valeur de la hauteur de référence embarquée utilisée est un enjeu important. La MSS (Mean Sea Surface) représente la valeur moyenne du niveau de la mer obtenue en combinant l'historique des acquisitions de diverses missions altimétriques (Figure 64). L'écart type des variations de hauteurs moyennes autour de ses valeurs est d'environ 0.5 m, ce

qui est satisfaisant par rapport à notre critère d'ambiguïté. En revanche, les marées, les mouvements de houle, les variations de troposphère ou bien le bruit de phase ne sont pas pris en compte. Tous ces facteurs affectent également le critère de déroulement.

La surface de référence, combinée avec la connaissance précise de la position des antennes sur l'orbite, va nous permettre de lever l'ambiguïté interférométrique sans procéder à un déroulement spatial. En pratique, n'importe quelle surface, dès lors qu'elle satisfait au critère d'ambiguïté peut être utilisée. C'est pour cette raison que la forte précision ainsi que la couverture globale du globe fait de la MSS un produit adapté pour être utilisé comme référence.

Les valeurs de MSS ne sont pas constantes sur le globe, et varient localement de plusieurs dizaines de mètres, il faut donc embarquer et rafraichir périodiquement une information localisée de la valeur de MSS le long de l'orbite.

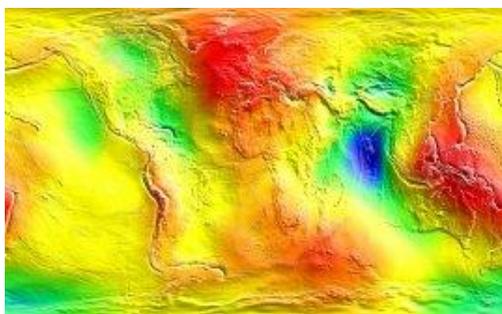


Figure 64 : Mean Sea Surface CNES_CLS_2011

4.4.1.2. STOCKAGE ET ECHANTILLONNAGE DE LA MSS

Pour cela, plusieurs options sont possibles dans la chaîne de traitement bord, dépendant des capacités de stockage de l'OBP :

- Une information 2D géolocalisée de la MSS.
- Une information 1D sous la trace de l'orbite.
- Une information « hybride », par exemple sous la trace et en fin de fauchée.

La quantité de données embarquées (environ 16 Mo) permet d'exclure la première solution. On s'oriente donc vers une information monodimensionnelle. Il reste cependant à savoir à quel échantillonnage il faut réactualiser la valeur de MSS sous l'orbite. Au cours de son orbite, SWOT retrouve sa position initiale tous les 22 jours, parcourant ainsi environ 13.7 millions de km dans le cas d'une orbite à 873 km. Dans le cas d'une capacité de stockage de 16 Mo, on considère ici que les deux données stockées (la position sur l'orbite exprimée en temps, et la valeur de la MSS associée) sont codées sur des entiers 16 bits. La précision obtenue ainsi sera suffisante pour le codage du temps de l'orbite. Pour la MSS, des variations importantes de précision apparaissent suivant la surface à partir de laquelle elle est exprimée (ellipsoïde ou géoïde) : la complexité de cette surface peut accroître le temps de calcul.

Dans notre cas, on a la possibilité d'embarquer 4 millions de points sur une information 1D, soit un rafraichissement tous les 3.5 km, ce qui est satisfaisant, mais peut diminuer dans le cas où l'on choisit

4.4 Estimation de hauteurs en mode LR

d'importer une information hybride (2 lignes), ou d'augmenter la taille de codage de la MSS (flottant ou double), etc.

Afin d'étudier les variations de la MSS et de connaître le taux de rafraîchissement nécessaire à celle-ci, on observe les valeurs locales de la MSS dans une certaine fenêtre d'acquisition. On utilise le produit MSS_CNES_CLS2011 (Figure 64), échantillonné à environ 3 km par 3 km. On note toutefois que le contenu physique de la MSS CNES_CLS2011 ne résout pas d'échelles inférieures à 10 km. Avec une fenêtre 20x20, on peut par exemple analyser les effets d'une réactualisation de la MSS tous les 60 km le long de la trace. Dans l'axe distance, le critère est beaucoup plus souple, la hauteur de référence augmentant le long de la fauchée. Actuellement, le principe d'utilisation de la MSS s'oriente vers une MSS 1D extrapolée en surface de référence 2D en supposant une « terre ronde » à un certain radius (mi-latitude).

On définit un seuil critique correspondant à la demi hauteur d'ambiguïté au near-range, soit + ou - 4 m ; si la valeur du seuil critique est dépassée, la construction de l'interférogramme différentiel peut générer des sauts de phases. Les Figure 65 et Figure 66 présentent le cas d'une fenêtre glissante de 18x18 km². Les valeurs min et max de la MSS dans la fenêtre dépassent rarement le seuil critique. Pour plus de réalisme, on pourrait également tenir compte de l'écart type des variations entre la surface réelle de la mer (SSH) et la MSS, d'environ 0.5 m, diminuant ainsi d'autant le critère. Pour l'étude de sensibilité qui suit, on fixe le critère de variabilité à + ou - 3 m. Les résultats obtenus Figure 65 montrent que sur la majorité de l'image, la condition est respectée et les variations restent inférieures au seuil critique. Localement, on a toutefois certaines zones de fortes variations où le critère n'est pas respecté, il s'agit souvent de transitions mer/continent (iles, Cordillère des Andes) visibles Figure 66 sur l'image d'écart entre la valeur centrale de la MSS et le maximum local. Les zones océaniques restantes pourraient bénéficier d'un échantillonnage plus précis pour permettre de respecter le seuil des variations.

Points out of criterion.

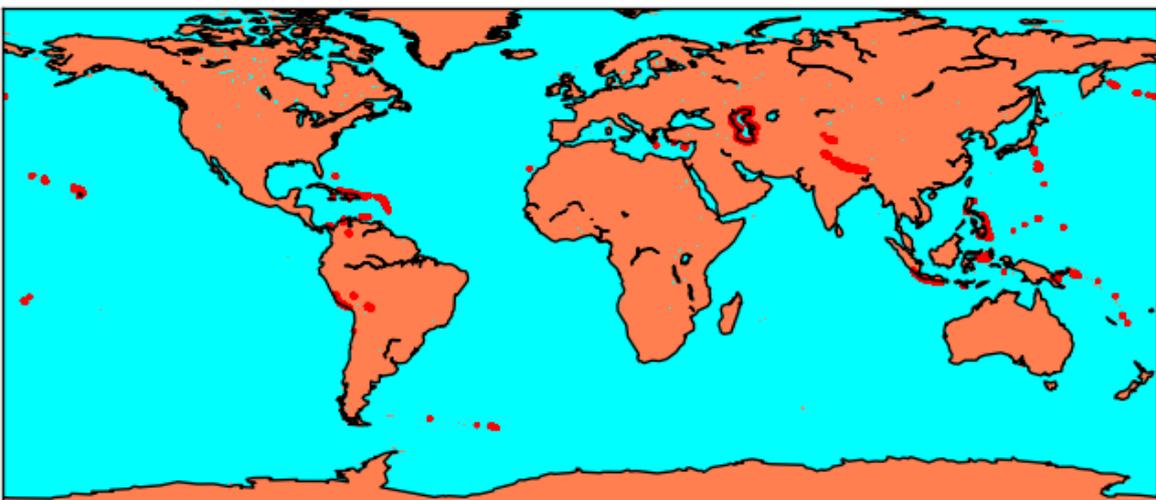


Figure 65 : En rouge : zones où le critère ($h_{crit} = 3m$) n'est pas vérifié, pour une fenêtre de 18x18 km

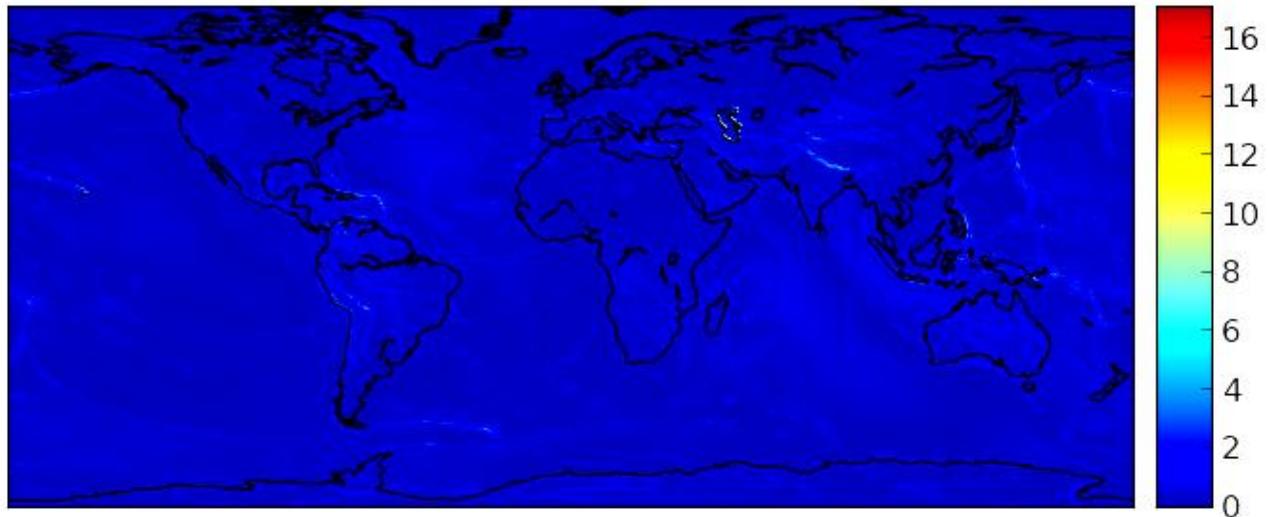


Figure 66 : Ecart en mètres entre la valeur centrale de la MSS et le maximum local dans le cas d'une fenêtre 18x18 km

Si l'on augmente la taille de la fenêtre considérée (Figure 67), c'est-à-dire le temps entre chaque rafraîchissement de la MSS, on obtient plus de zones où la condition critique n'est pas respectée, même si dans le cas par exemple d'une fenêtre de 60x60 km (Figure 68), on est globalement bon sur les océans (environ 2% d'erreurs, surtout localisées dans le pacifique). A noter que les valeurs « sur terre » ne sont là qu'à titre indicatif et n'ont pas de réel sens physique, les variations locales autour des valeurs utilisées étant beaucoup plus importantes que dans l'océan, rendant la méthode impraticable sur les continents.

Tableau 1 : Estimation des erreurs en fonction de la taille de la fenêtre de rafraîchissement

	18x18 km ²	24x24 km ²	30x30 km ²	60x60 km ²
nombre_points	51771612	51752416	51733220	51637240
nombre_points_terre	16380908	16374507	16368042	16335619
nombre_points_ocean	35390704	35377909	35365178	35301621
pourcentage de points faux	0.10842	0.31572	0.63657	3.4503
pourcentage de points terre faux	0.19418	0.45004	0.82073	4.4913
pourcentage de points océan faux	0.06872	0.25355	0.55133	2.9689

Points out of criterion.

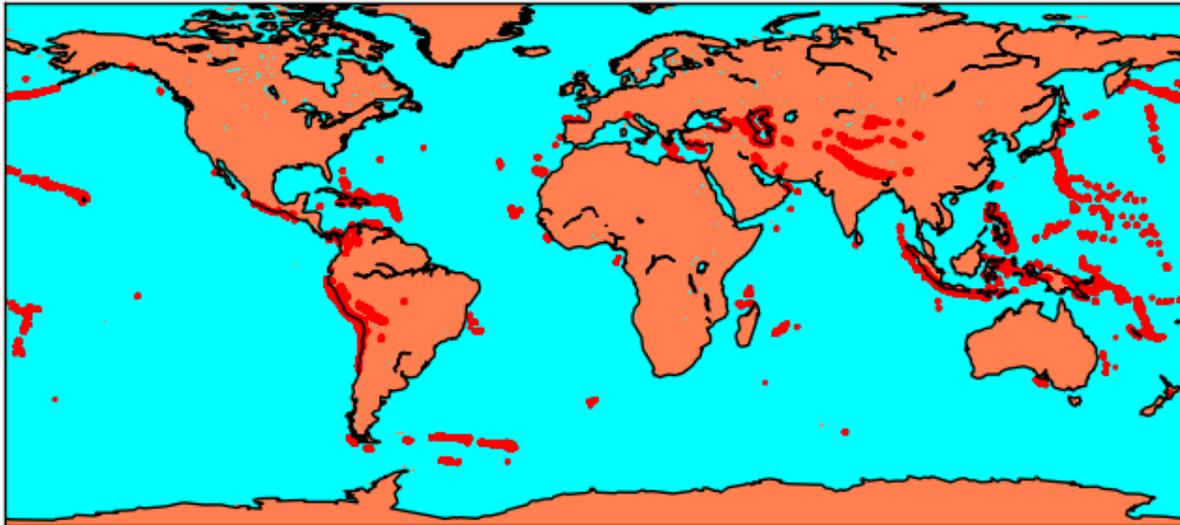


Figure 67 : En rouge : zones où le critère ($h_{crit} = 3m$) n'est pas vérifié, pour une fenêtre de 30x30 km

Points out of criterion.

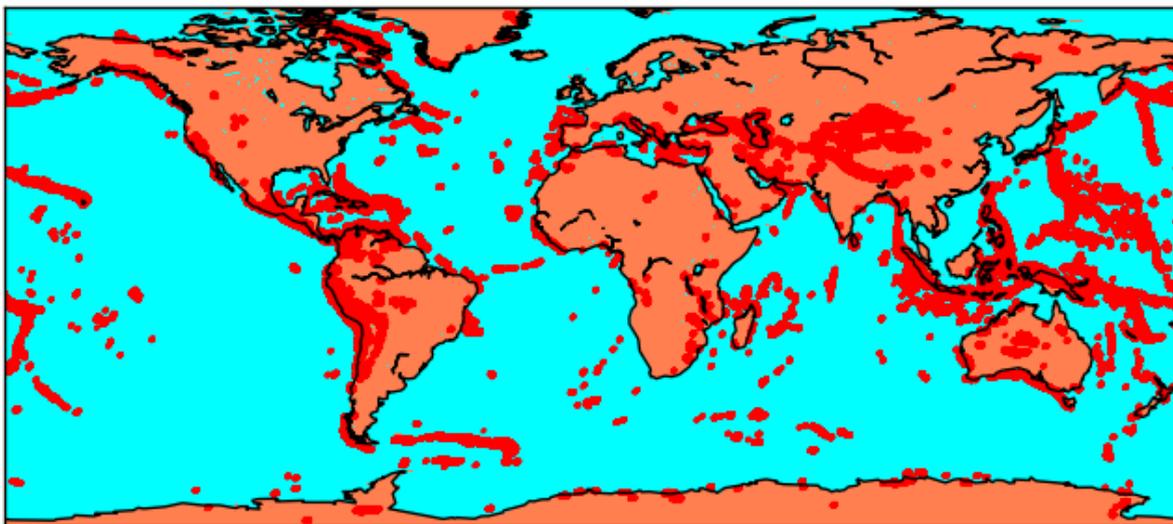


Figure 68 : En rouge : zones où le critère ($h_{crit} = 3m$) n'est pas vérifié, pour une fenêtre de 60x60 km

On peut ici conclure que le critère à 3 m semble pouvoir globalement être acceptable sur une large partie du globe, notamment avec un rafraîchissement tous les 30 km. Ce critère est relativement arbitraire, de nombreux effets ne sont pas pris en compte dans la MSS tels que les mouvements de marées, de houle, etc. Cependant, ces effets peuvent être relativisés dans notre étude, le critère « dur » de $\pm h_{amb}$ n'étant pas

critique dans le mode océanographique où les franges résiduelles peuvent être facilement déroulées. En revanche, il faut veiller à ce que les variations à l'intérieur d'un pixel kilométrique (ou de $250 \times 250 \text{ m}^2$) ne fassent pas plus d'un tour de phase, sous peine de corrompre définitivement la phase de ce pixel. De plus, le critère critique utilisé est valable en début de fauchée, et devient de plus en plus souple dès lors que l'on avance dans la fauchée (augmentation de la hauteur d'ambiguïté). Pour cette raison, seul le rafraichissement sous la trace dans l'axe azimuth devrait être considéré, assouplissant la condition. C'est également cette raison qui permet d'embarquer une mesure 1D de MSS, seulement sous la trace.

4.4.2. SURFACE DE REFERENCE ET MOYENNAGE

La valeur de la surface de référence utilisée pour chaque ligne azimuth est obtenue à partir d'une table embarquée : la jonction entre les points de mesures se fait par interpolation cubique entre les valeurs embarquées. Une fois les calculs en pleine résolution LR réalisés, on obtient, pour chacune des 9 vues, les interférogrammes différentiels déroulés. Il reste une étape supplémentaire avant d'envoyer les données au sol pour restitution des hauteurs : le moyennage au kilomètre des interférogrammes différentiels. Cette étape présente plusieurs difficultés.

La taille des cellules radar projetées en géométrie sol varie dans la fauchée suivant la porte distance considérée, mais également selon la hauteur du satellite et de la surface. La projection n'est possible qu'en ayant une connaissance complète de cette géométrie d'acquisition et notamment de la hauteur de la surface. Mais c'est justement la grandeur que l'on cherche à estimer, elle n'est connue que approximativement à travers la surface de référence. La taille des cellules radar projetées avant moyennage est donc celle des cellules radar dans la géométrie de référence (Figure 69). On introduit donc à ce niveau une légère erreur en n'utilisant pas une taille de pixel parfaitement maîtrisée.

4.4 Estimation de hauteurs en mode LR

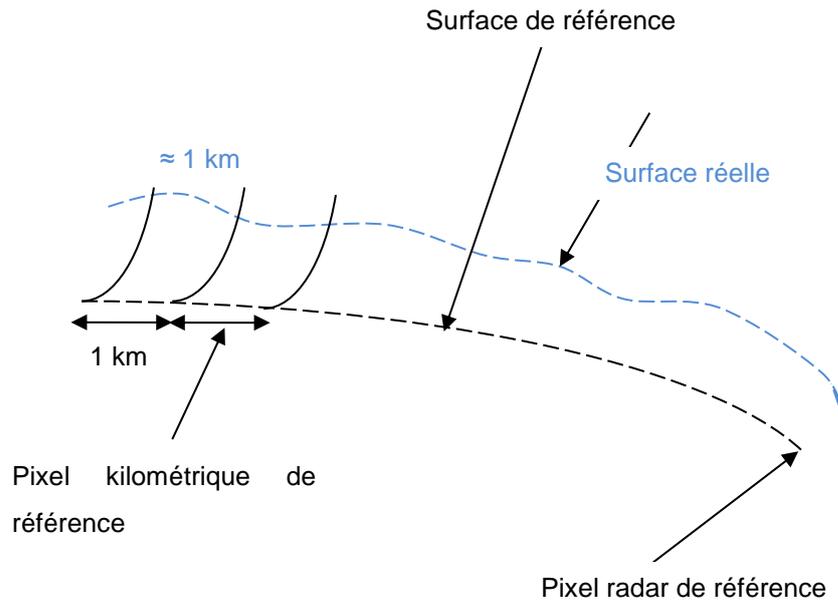


Figure 69 : Schéma du mécanisme de sélection des pixels radar pour la création du produit kilométrique

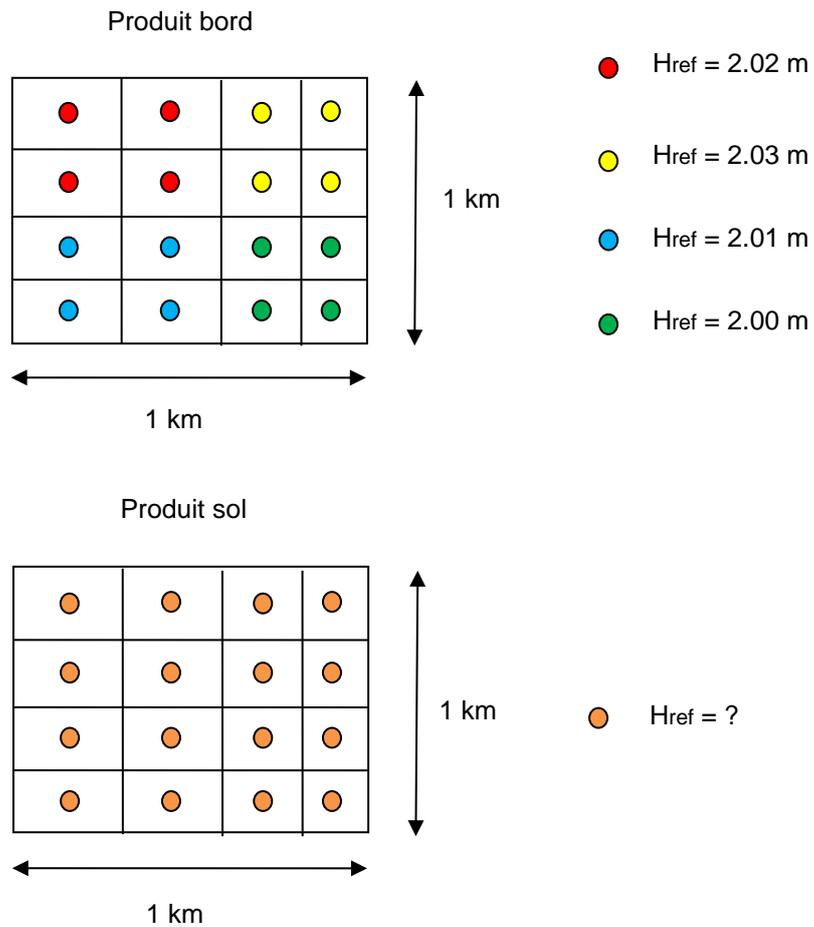


Figure 70 : Illustration du moyennage kilométrique de la phase et des hauteurs de référence associée

De plus, la valeur de la surface de référence (qui sera utilisée au sol en combinaison avec l'interférogramme différentiel kilométrique) varie donc lentement à l'intérieur d'un même pixel kilométrique (Figure 70). On doit donc calculer au sol la valeur moyenne équivalente de la surface de référence qu'il faudra utiliser lors de l'inversion phase-hauteur pour que l'estimation de la hauteur soit correcte, et établir un centre de phase équivalent pour la surface de référence kilométrique.

Dans le cas du moyennage dans l'axe azimut (Figure 71), on notera que les pixels des vues font environ 250 m de long, et se chevauchent avec un décalage inter-pixels d'environ 15 m. Lors du moyennage, nous appliquons un filtre en trapèze pour pondérer le poids des pixels moyennés, afin d'assurer une corrélation à 50% entre pixels voisins kilométriques et éviter les effets d'aliasing.

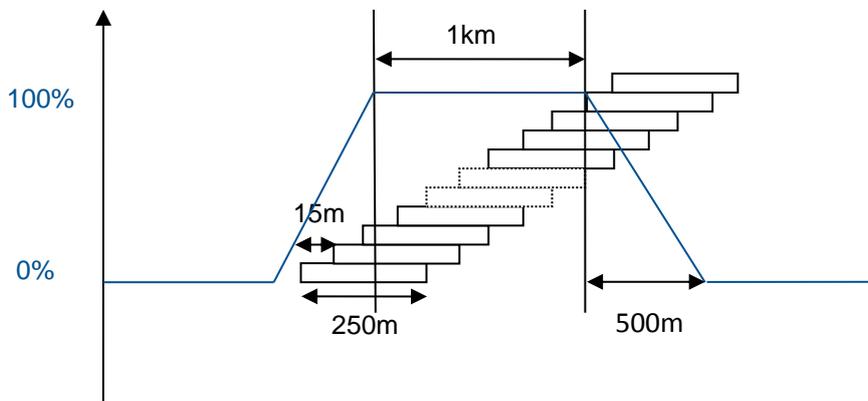


Figure 71 : Schéma de moyennage pondéré dans l'axe azimut

Dans l'exemple suivant, on a simulé la phase interférométrique (50 km en range pour 7 km en azimut) pour une surface de mer plate à 2 m au-dessus du rayon terrestre de référence, puis procédé au calcul de la phase différentielle.

C'est ce que l'on observe sur l'interférogramme de référence de la Figure 72. Comme attendu, la phase interférométrique différentielle ne présente pas de franges, la condition d'ambiguïté étant respectée, mais évolue en range à cause de l'écart entre la surface de référence et la réalité. Si l'on souhaite ensuite moyennner les produits interférométriques différentiels (complexes) pour obtenir un pixel moyenné au kilomètre, il faut, en utilisant la géométrie de référence simulée, identifier les cellules radar dont la projection sol est contenue dans le pixel. On moyenne ensuite les cellules contribuant au pixel kilométrique, en utilisant la fenêtre de pondération en trapèze décrite précédemment.

Une fois le moyennage range effectué, on procède de la même façon en azimut, à ceci près que l'on n'a pas de variation significative de la taille des cellules dans cette direction (excepté celle liée à de faibles variations de PRF).

4.4 Estimation de hauteurs en mode LR

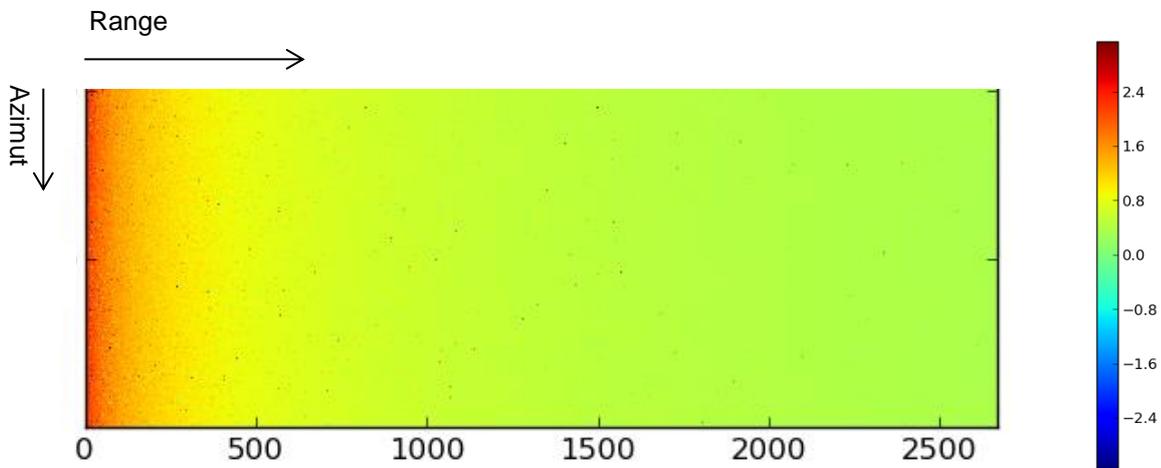


Figure 72 : Interférogramme différentiel simulé à partir d'une fauchée de 50 km et sur 500 pixels azimut

4.4.3. BIAIS DE HAUTEUR AU NEAR-RANGE SUR LE PRODUIT MOYENNE

Après moyennage au kilomètre, et en prenant en compte la taille et le nombre de cellules lors de la création de la hauteur de référence équivalente, on obtient un couple phase moyennée/hauteur de référence. Les résultats obtenus montrent une phase moyennée qui, après inversion, décrit un profil de hauteurs similaire à celui obtenu en pleine résolution, mais présentant tout de même un écart type de quelques centimètres ainsi qu'un léger biais au near-range (Figure 73).

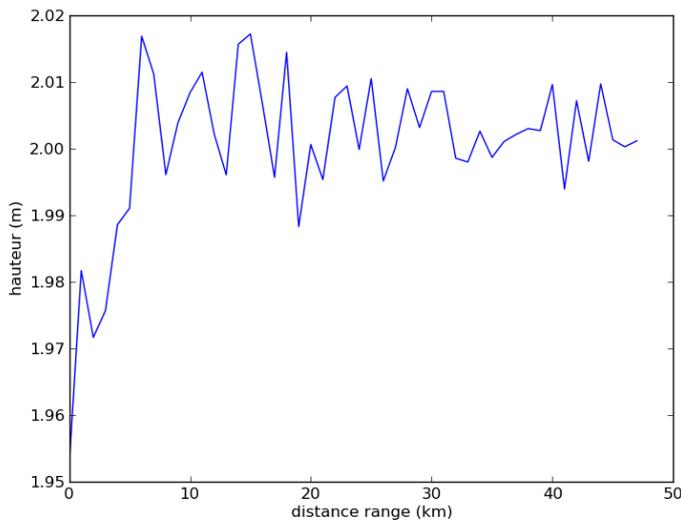


Figure 73 : Hauteurs restituées après moyennage (azimut et range) au kilomètre pour $h_{ref} = -1$ m et $h_{réel} = 2$ m

L'effet de biais qui apparaît en proche nadir est d'autant plus important que l'écart, entre les valeurs de hauteurs de référence et la réalité de l'acquisition, est fort. Dans le cas d'une référence proche de la réalité, le biais diminue (même si le bruit de phase semble identique) et s'accroît plus on s'approche de la hauteur d'ambiguïté. Ce phénomène sera détaillé dans la section 4.5.3.1.

4.5. ERREURS DE LA MESURE ET EFFET SUR LA RESTITUTION

Cette section a pour objectif de détailler les différents phénomènes conduisant à des erreurs de restitution de hauteur et de géolocalisation à partir d'images KaRIn, et de proposer des idées de méthodes permettant d'améliorer certains de ces aspects.

Ces erreurs de mesure peuvent être séparées en plusieurs groupes [Rodr-1992]:

- Les erreurs aléatoires sur la mesure de la phase interférométrique se traduisent en une erreur de hauteur. Celles-ci déterminent la précision relative de la mesure et sont fortement liées à l'architecture du système radar. La réduction de ces erreurs se fait par moyennage, en diminuant la résolution des produits
- Les erreurs directes liées à une mauvaise estimation de la géométrie d'acquisition introduisent un biais absolu dans le calcul des hauteurs et leur géolocalisation. Elles sont notamment liées aux erreurs sur l'orbite, à une mauvaise estimation des effets troposphériques ou à une estimation erronée de la distance absolue due aux erreurs sur les horloges de l'instrument.
- Le troisième type d'erreur sera décrit plus tard : il s'agira des erreurs liées au traitement de restitution de hauteurs, en particulier aux erreurs de déroulement de la phase interférométrique.

La Figure 74 présente les différentes erreurs à considérer lors de l'élaboration d'un budget d'erreur sur une mission interférométrique. Certains aspects du budget d'erreur tels que l'orbite, l'attitude du satellite, les déformations du mât, ne sont pas étudiés ici. On se consacrera dans cette section d'une part aux erreurs aléatoires provoquées par les pertes de corrélation (essentiellement bruit thermique et décorrélation géométrique) et d'autre part à l'effet des erreurs provoquées par une méconnaissance de la distance (erreur d'horloge, propagation troposphérique ou ionosphérique).

Par la suite, nous verrons plus en détail les différents effets de la restitution des hauteurs à partir d'un MNT de référence.

4.5 Erreurs de la mesure et effet sur la restitution

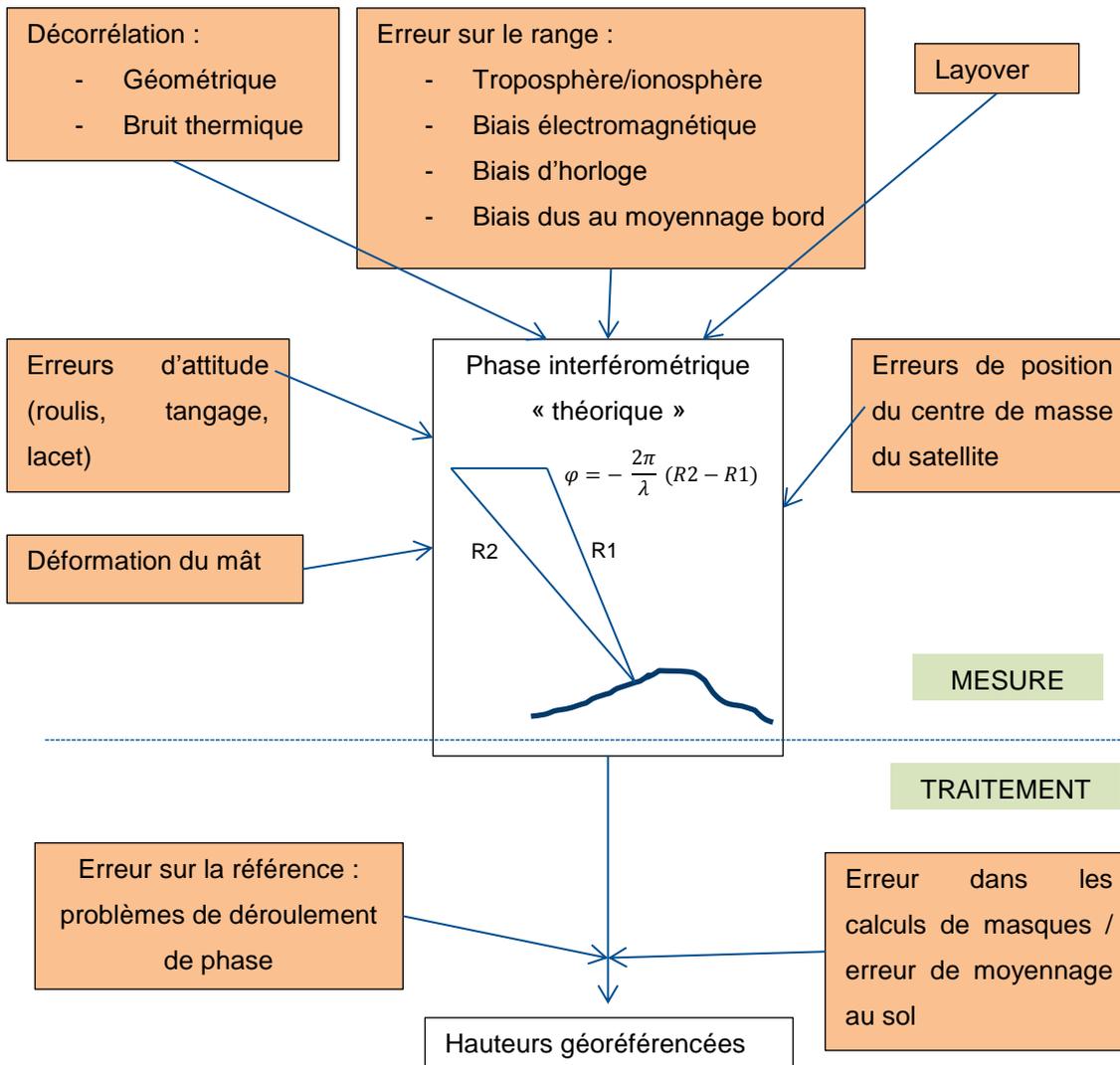


Figure 74 : Schéma récapitulatif des différentes erreurs rencontrées sur la mesure de hauteur par interférométrie

4.5.1. LES ERREURS ALEATOIRES DUES A LA DECORRELATION

Les premières erreurs rencontrées sur la phase interférométrique sont les erreurs aléatoires, qui se traduisent par une perte de corrélation du signal interférométrique [Rose-1999]. En effet, la cohérence interférométrique constitue la mesure de la variance de phase.

Ce facteur de décorrélation peut être estimé sur les données comme étant la cohérence interférométrique (41), pour deux images SLC coregistrées S_1 et S_2 .

Dans le cas d'un nombre important de vues, et d'une cohérence forte, la perte de cohérence peut être directement reliée à une variance de phase : c'est la borne de Cramér-Rao [Seym-1994] [Touz-1999], qui définit la limite asymptotique de la variance de phase en fonction de la cohérence.

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2N_t}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (109)$$

Ce bruit de phase se traduit ensuite directement sur la hauteur estimée, ainsi que sur sa géolocalisation. On peut alors estimer l'erreur de hauteur σ_z liée à l'erreur de phase due à la décorrélation :

On rappelle les équations interférométriques :

$$h = H - R\cos(\theta) \quad (110)$$

$$\varphi = k(R_1 - R_2) \simeq kB\sin(\theta - \alpha) \quad (111)$$

Par différentiation, on obtient :

$$\sigma_z = \frac{R\tan(\theta - \alpha)}{kB} \sigma_{\varphi} \quad (112)$$

L'erreur de géolocalisation associée σ_y associée peut s'approximer comme :

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{\varphi}\lambda H}{2\pi B} \quad (113)$$

Dans le cas de SWOT, on peut remarquer qu'à erreur de phase constante, l'erreur de hauteur associée pour un pixel est plus importante en fin de fauchée, tandis que l'erreur de géolocalisation reste constante. On verra plus loin que la décorrélation n'est pas constante dans la fauchée, elle est plus importante en début et fin de fauchée.

On peut considérer plusieurs sources de décorrélation (Figure 75) :

- γ_t : perte de corrélation due au bruit thermique.
- γ_g : facteur de décorrélation géométrique, induit par les variations de phase à l'intérieur d'une cellule radar et qui sont les plus importantes au near-range (pixels de grande taille).

4.5 Erreurs de la mesure et effet sur la restitution

- γ_z : facteur de décorrélation volumique qui est provoqué par les variations des réponses à l'intérieur d'une cellule volumique.
- γ_a : facteur de décorrélation angulaire dû à la courbure des cellules de résolution (qui sera ici négligeable dans le mode HR avec focalisation parfaite des images).
- γ_{temp} : facteur de décorrélation temporelle, que l'on considère nul ici (l'interférométrie simultanée).

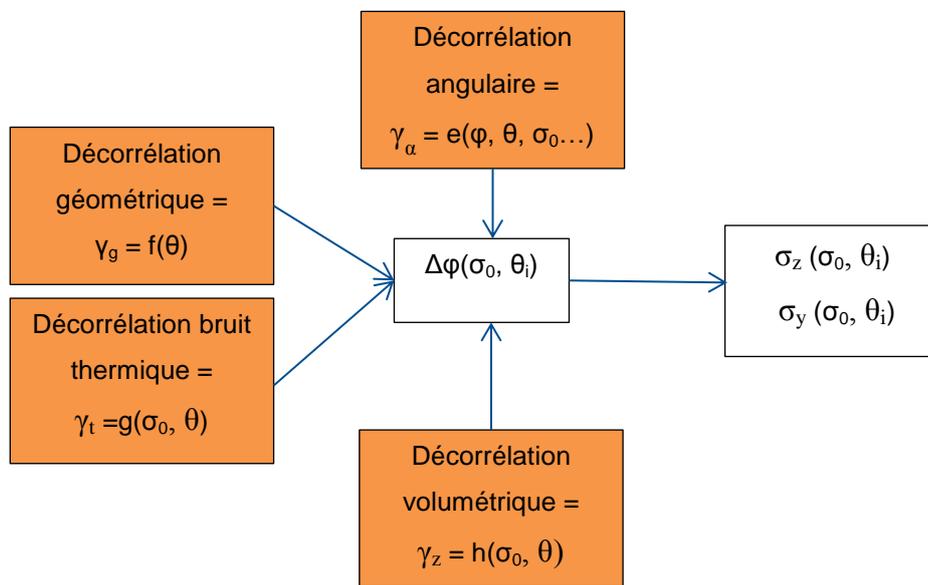


Figure 75 : Schéma de principe des effets de décorrélation

On peut ainsi considérer un facteur γ de décorrélation global tel que : $\gamma = \gamma_t \gamma_g \gamma_a \gamma_z$.

4.5.1.1. LE BRUIT THERMIQUE

L'une des caractéristiques majeures de KaRIn sur SWOT est son SNR faible. Le Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ) qui traduit la rétrodiffusion nécessaire d'une surface pour dépasser le niveau de bruit, est en effet de l'ordre de 9 à 0 dB, dépendant de la position dans la fauchée. Ceci est dû au fonctionnement en continu de KaRIn et de la puissance limitée qu'il est possible d'émettre pour chaque impulsion. Les valeurs de σ_0 attendues sur l'eau, qui sont aussi de l'ordre de la dizaine de dB, font du bruit thermique un des postes d'erreurs majeurs pour la mission SWOT. Ceci est particulièrement le cas sur les zones à faible radiométrie (terre, végétation), rendant celles-ci dans la plupart des cas inexploitable.

Dans le cas de l'eau, le bilan radiométrique est plus favorable, mais la perte de corrélation due au bruit thermique reste tout de même importante, entraînant un bruit aléatoire gaussien sur la phase interférométrique. A noter que le bruit thermique est constant sur l'image, en revanche la puissance du signal varie, induisant ainsi une perte de cohérence non constante sur la fauchée.

On peut quantifier l'erreur de phase et de hauteur liée au bruit thermique à partir du SNR. La décorrélation γ_t peut être reliée au SNR par le biais de l'équation suivante [Rose-1999] :

$$\gamma_t = \frac{1}{\sqrt{1 + 1/SNR_{S1}}} \frac{1}{\sqrt{1 + 1/SNR_{S2}}} \quad (114)$$

Si l'on considère que le SNR est le même sur les deux canaux, on obtient l'expression suivante :

$$\gamma_t = \frac{1}{1 + 1/SNR} \quad (115)$$

A partir des bornes de Cramér-Rao et de la relation entre le biais de phase et le biais de hauteur, on peut établir la relation suivante entre l'erreur de hauteur liée au bruit thermique et le SNR présenté Figure 76:

$$\sigma_z = \frac{R \tan(\theta)}{kB} \frac{1}{\sqrt{2N_l}} \frac{\sqrt{1 - \gamma_t^2}}{\gamma_t} \quad (116)$$

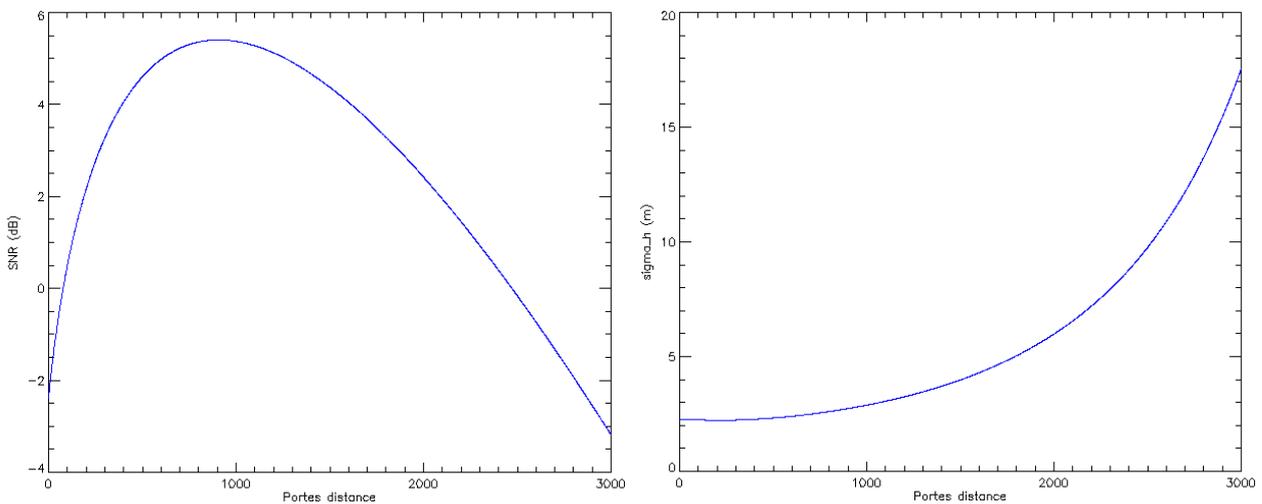


Figure 76 : SNR et erreur de hauteur liée au bruit thermique avec les paramètres de SWOT, avec $\sigma_0=10$ dB et prise en compte d'une marge système de 5 dB (sans moyennage)

4.5.1.2. LA DECORRELATION GEOMETRIQUE

La décorrélation géométrique est provoquée par les variations de phase à l'échelle du pixel. En effet, la distribution de phase à l'intérieur du pixel radar n'est pas homogène. Géométriquement, cela se traduit par un angle de visée différent le long de la cellule de résolution projetée au sol. L'angle de visée, étant directement relié à la phase interférométrique, on a alors une phase qui varie à l'intérieur du pixel, introduisant de la décorrélation. Lorsque les deux signaux deviennent totalement décorrélés, l'information interférométrique est perdue.

Illustrons ce phénomène sur la Figure 77, où l'on suppose une pente du sol nulle pour simplifier :

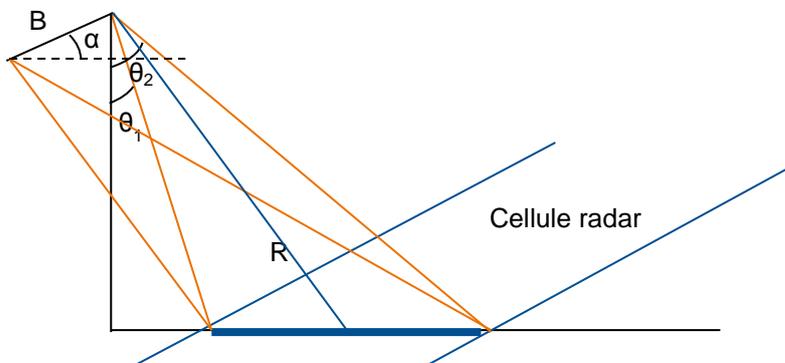


Figure 77 : Schéma de principe de la décorrélation géométrique

On peut définir un critère sur la base géométrique B, appelé base critique B_c , pour laquelle la phase du pixel devient totalement incohérente, ce qui arrive quand il y a un écart de phase de 2π entre le début et la fin du pixel. La base doit être inférieure à cette base critique, sans quoi la donnée interférométrique n'est pas exploitable. A partir de [Rodr-1992] et [Zebh-1994], on peut établir :

$$\frac{d\varphi}{dR} = \frac{d\varphi}{d\theta} \frac{d\theta}{dR} = \frac{2\pi p B}{\lambda} \cos(\theta - \alpha) \frac{1}{R \tan(\theta)} \quad (117)$$

En égalisant l'équation (118) avec 2π pour une cellule de résolution ΔR , on obtient :

$$B_{c\perp} = B_c \cos(\theta - \alpha) = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{p \Delta R} \quad (118)$$

Avec $B_{c\perp}$ la base critique orthogonale, ΔR la résolution distance, λ la longueur d'onde, R la distance au satellite et p valant 1 si les canaux partagent la même antenne émettrice, et 2 si chaque antenne émet et reçoit séparément.

Dans le cas où $\alpha = 0$ (surface plane),

On peut définir la cohérence géométrique liée à la base comme étant :

$$\gamma_g = 1 - \frac{pB_{c\perp}\Delta R}{\lambda R \tan(\theta)} \quad (119)$$

Qui devient nul pour $B = B_{critique}$

Si l'on considère la seule variation de cohérence γ_g , on peut exprimer à partir de l'équation (116) la variance de hauteur comme :

$$\sigma_z = \frac{R \tan(\theta) p \Delta R}{\frac{2\pi}{\lambda} (1 - \gamma_g) \lambda R} \sigma_\varphi = \frac{\tan(\theta) p \Delta R}{2\pi (1 - \gamma_g)} \frac{1}{\sqrt{2N_i}} \frac{\sqrt{1 - \gamma_g^2}}{\gamma_g} \quad (120)$$

On voit qu'une forte base augmentera la précision de la mesure altimétrique en augmentant la hauteur d'ambiguïté, sans toutefois dépasser la valeur de base critique pour lequel les images sont décorréélées. Cependant, dans le cas de SWOT, on peut difficilement augmenter la taille du mât au-delà de 10 m pour des raisons de stabilité et d'encombrement. Ainsi, on a $B \ll B_{critique}$ et l'effet de décorrélation géométrique est principalement localisé en début de fauchée et reste faible comparativement à celui dû au bruit thermique, comme visible sur la Figure 78.

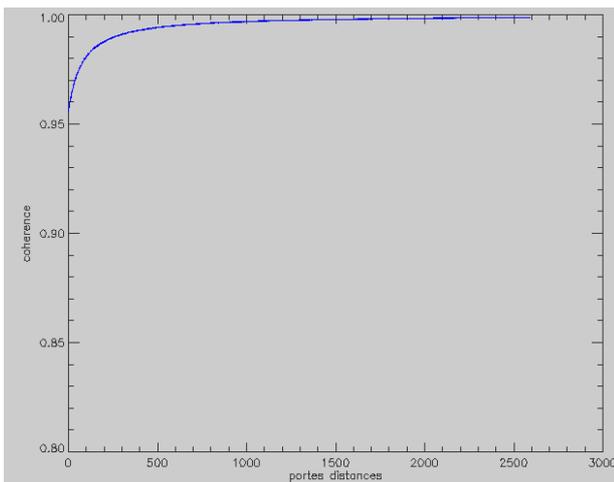


Figure 78 : Evolution de la cohérence géométrique le long de la fauchée SWOT

De la même façon que pour la cohérence géométrique pour une surface, on peut définir une cohérence volumétrique pour les éléments présentant une réponse volumique, comme par exemple un couvert végétal. Dans le cas de SWOT, la pénétration est relativement faible en bande Ka, les expressions

4.5 Erreurs de la mesure et effet sur la restitution

analytiques ne sont pas développées ici mais l'effet est reproduit partiellement par le procédé de simulation de la végétation décrit dans 3.3.2.5.

De même, la décorrélation angulaire n'est pas traitée ici. Elle est spécifique au mode de traitement bord LR dit « non-focalisé », en raison du non alignement des iso-distances et des iso-phases.

4.5.2. REDUCTION DES ERREURS ALEATOIRES PAR MOYENNAGE

Comme présentés dans la description de l'étape de multivue en 3.4.4, les bruits liés à la décorrélation sont généralement non biaisés, et leur écart type est réduit d'un facteur \sqrt{N} lorsque l'on moyenne N points non corrélés. Cependant, une erreur systématique est parfois introduite par des phénomènes qui induisent ces pertes de corrélation. En particulier, la perte de corrélation angulaire lors du traitement bord LR introduit à la fois un biais systématique non affecté par le moyennage et une erreur aléatoire.

Au niveau pixelique, à erreur de phase constante, l'écart type en hauteur serait plus élevé au far-range, où l'altitude d'ambiguïté est plus forte (Figure 79). Cependant, la taille de pixel plus faible en fin de fauchée permet de moyennner plus de points pour une même surface, dans les mêmes proportions que l'évolution de l'erreur de hauteur. En revanche, l'évolution de l'erreur de géolocalisation ne dépend pas de la position dans la fauchée. Dans ce cas, on aurait à surface finale constante approximativement une erreur de hauteur constante après moyennage, et une meilleure précision en géolocalisation en far-range.

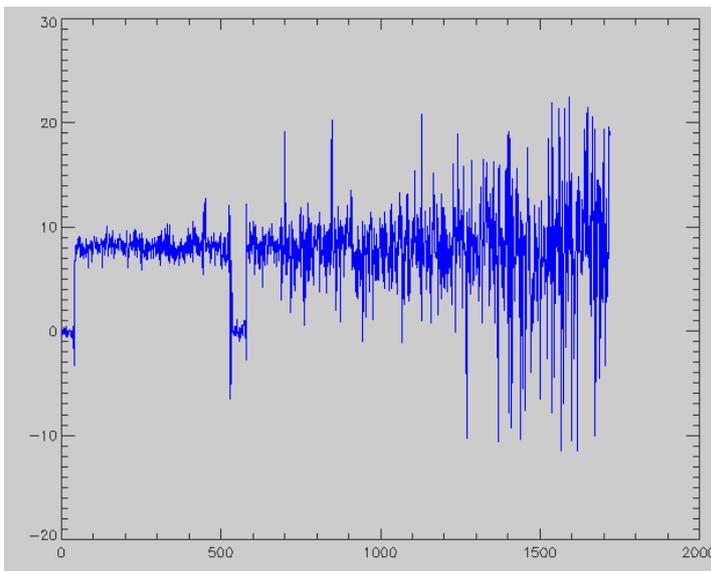


Figure 79 : Profil de restitution de hauteurs pleine résolution en géométrie radar (sans moyennage) sur un MNT artificiel (avec référence parfaite)

Cependant, l'évolution de l'erreur de phase le long de la fauchée est en grande partie conditionnée par l'évolution de SNR (et de la décorrélation géométrique), qui est liée au diagramme d'antenne distance (Figure 80). On a donc cette forme de variation d'erreur de hauteur en « sourire » et une meilleure performance en milieu de fauchée.

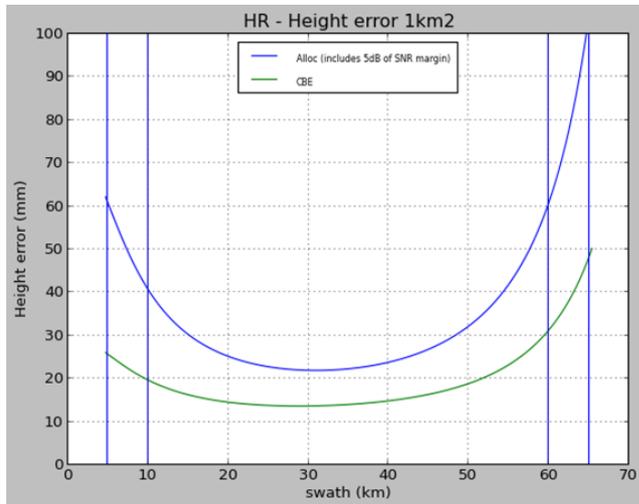


Figure 80 : Erreur de hauteur après moyennage sur 1 km² avec (en bleu) et sans (en vert) la marge système de 5 dB

Ces erreurs de hauteurs et de géolocalisation sont totalement liées. Ainsi, une erreur de hauteur positive sera associée à un décalage de la géolocalisation vers la direction opposée au satellite. De même, une erreur négative de hauteur se traduira par une géolocalisation biaisée en direction de l'orbite.

Cela se voit notamment sur l'image de géolocalisation des points d'eau comme par exemple sur la Figure 81, où les points présentant le plus de biais (positif ou négatif) se retrouvent sur le nuage de points de part et d'autre du « nuage central » de la rivière correspondant aux points où la géolocalisation et l'estimation de hauteurs sont plus précises. On pourrait envisager de se servir de ceci lors du moyennage, en moyennant seulement les points dont la géolocalisation tomberait dans une zone plausible du masque d'eau, avec toutefois des précautions importantes à prendre, le masque d'eau précis issu des données n'étant à ce moment-là connu qu'en géométrie radar, et n'étant pas précisément géolocalisé.

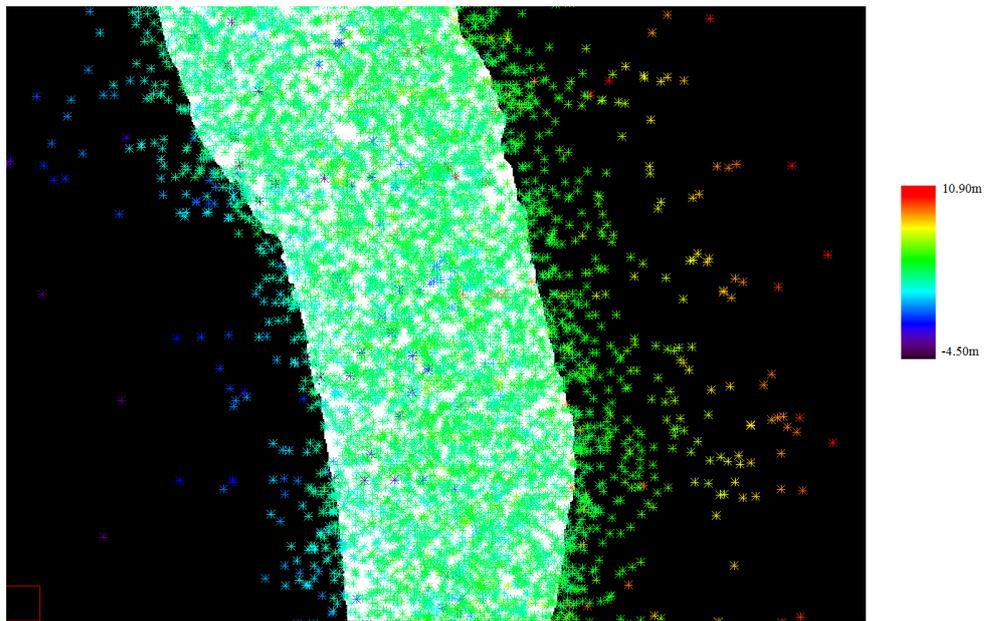


Figure 81 : Géolocalisation issue d'une simulation SWOT. A droite, au near range, les points en rouge correspondant à une surestimation de la hauteur liée au bruit thermique (et au layover), à gauche, les points en bleu correspondant à une sous-estimation de la hauteur (monovue).

4.5.3. LES ERREURS DUES A UNE MECONNAISSANCE DU RANGE

Les erreurs d'estimation du range sont principalement provoquées par la méconnaissance des effets troposphériques, mais peuvent aussi provenir d'autres facteurs comme le biais électromagnétique sur l'océan, des erreurs d'horloge, ou des effets de moyennage. Dans le cas de l'interférométrie, on peut noter que ces erreurs ont un impact négligeable sur la phase interférométrique, les erreurs se compensant sur les deux canaux dans le cas d'acquisitions quasi-simultanées et dans les mêmes conditions de prises de vues. Cependant, pour obtenir des hauteurs absolues, le range doit être estimé avec précision pour pouvoir résoudre l'inversion des équations de restitution de hauteur présentées dans la section 4.3.

En effet, une mauvaise connaissance du range induit un décalage entre le cercle iso-distance de la mesure physique correspondant à une phase donnée, et le cercle iso-distance supposé connu utilisé lors de l'acquisition. Cela entraîne un biais de restitution et de géolocalisation, en particulier dans le cas de SWOT, en l'absence de points d'appuis précis (Ground Control Points).

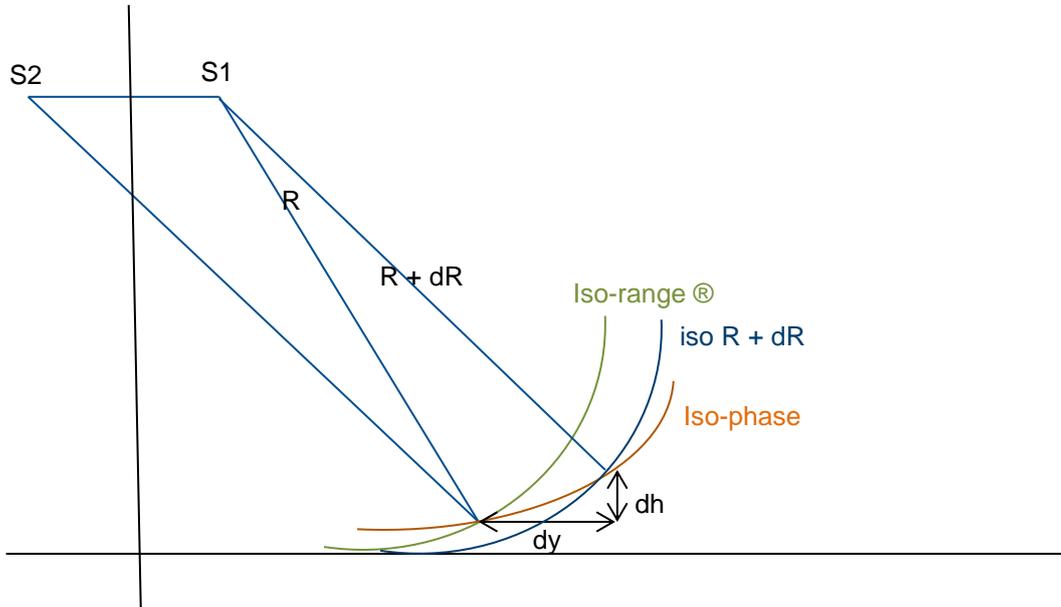


Figure 82 : Effet d'une erreur sur l'estimation du range d'acquisition

Cette erreur sur la connaissance de range absolu se traduit par une erreur directe qui peut se décomposer en un biais de hauteur dh et un biais de localisation dy tels que :

$$dh = dR \cos(\theta) \quad (121)$$

$$dy = dR \sin(\theta) \quad (122)$$

Au premier ordre, on voit donc que pour un angle d'incidence faible (autour de 1° à 4° pour SWOT), l'erreur de hauteur est proche de l'erreur d'estimation du range, tandis que l'erreur de géolocalisation augmente de manière importante lorsque l'on se rapproche des plus faibles incidences.

Il faut cependant noter que cette mauvaise estimation de range a des effets à d'autres niveaux dans le traitement, en particulier lors des étapes de moyennage. Même après correction et calibration de cette erreur, la mauvaise connaissance du range lors du traitement bord (cf. section 4.5.3.2), a des impacts résiduels sur la précision finale. De même, les erreurs sur la référence peuvent avoir des effets similaires, y compris dans le cas où l'on respecte la condition d'ambiguïté lors du déroulement. On peut alors supposer pour la suite que l'erreur considérée vient à la fois de l'estimation du range, et également de la différence entre MNT de référence et réalité.

4.5.3.1. EFFETS DU MOYENNAGE DANS L'ESTIMATION DU RANGE EN MODE LR

Même dans un cas idéal où la correction du biais de range réalisé au sol est parfaite, dans le mode LR, il reste un résidu d'erreur dû à l'étape de moyennage lors du traitement bord (OBP) présentée dans la section 3.5. Lors de celle-ci, c'est le range embarqué qui est employé pour déterminer les pixels à moyenner ainsi que le range équivalent après moyennage. Ceci provoque alors un biais résiduel, le range moyen calculé n'étant pas parfaitement en adéquation avec le centre de phase du pixel moyenné.

Cependant, à partir de la connaissance de l'écart entre la MSS embarquée et la MSS utilisée lors du traitement sol, on peut a posteriori estimer les erreurs troposphériques connues avec une meilleure précision, et les compenser en partie.

On peut identifier deux effets principaux (Figure 83) :

- un biais dû au calcul approché du range équivalent après moyennage
- une erreur due à une perte de corrélation lors du moyennage

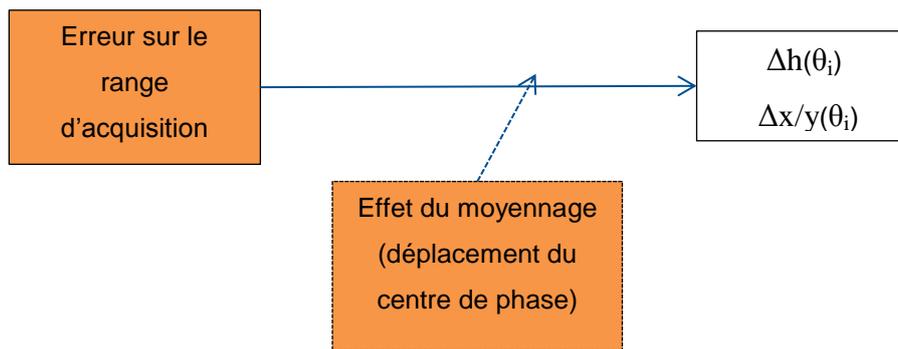


Figure 83 : Effets des erreurs dans l'estimation du range R

Le biais peut être corrigé au sol, et est dépendant de l'estimation du range moyen pour chaque pixel kilométrique. La Figure 84 présente le principe du moyennage des produits interférométriques dans la direction distance en mode LR.

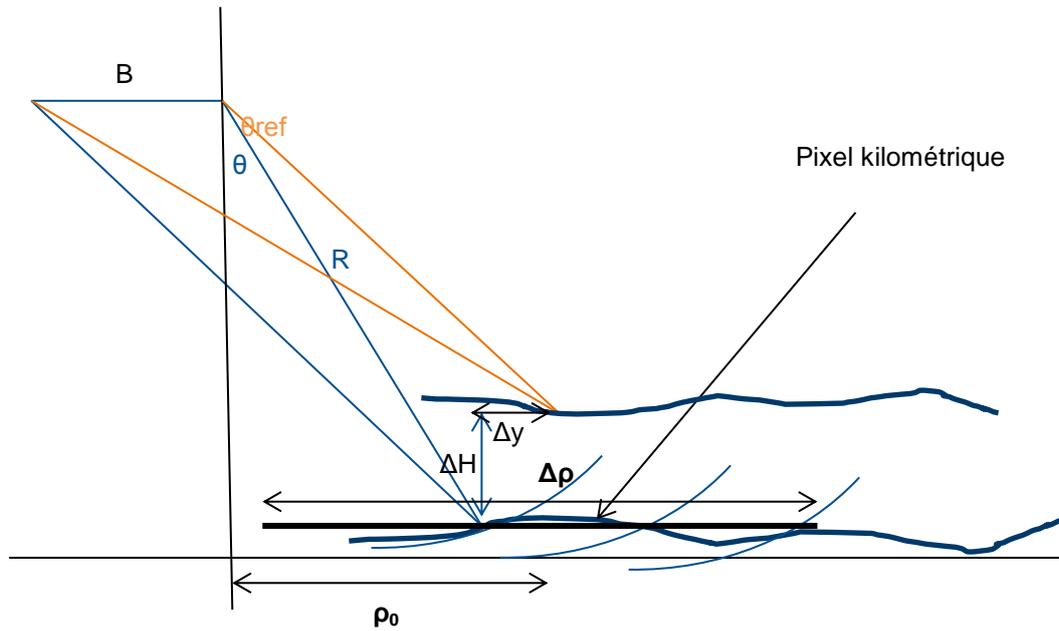


Figure 84 : Illustration du moyennage de phase différentielle kilométrique en mode LR

Pour simplifier, on considère ici le traitement sur une seule vue (vue centrale).

Géométriquement, en considérant un biais de distance entre la réalité et la référence employée lors de l'aplatissement de la phase à bord, on trouve que :

$$\Delta\varphi \approx \frac{2\pi B}{\lambda} (\sin(\theta) - \sin(\theta_{ref})) \quad (123)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi B}{\lambda} \frac{\Delta y}{R} \quad (124)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi B}{\lambda} \frac{\Delta H}{R} \frac{2H}{2\sqrt{R^2 - H^2}} \quad (125)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi B}{\lambda} \frac{\Delta H}{\rho} \quad (126)$$

avec H proche de R.

Par l'intégration de cette expression entre $\rho_0 - \Delta\rho/2$ et $\rho_0 + \Delta\rho/2$, on obtient l'expression suivante :

4.5 Erreurs de la mesure et effet sur la restitution

$$\overline{\Delta\varphi} = \frac{1}{\Delta\rho} \int_{\rho_0 - \Delta\rho/2}^{\rho_0 + \Delta\rho/2} \frac{2\pi B \Delta H}{\lambda \rho} d\rho = \frac{1}{\Delta\rho} \frac{2\pi B \Delta H}{\lambda} \ln\left(\frac{\rho_0 + \frac{\Delta\rho}{2}}{\rho_0 - \frac{\Delta\rho}{2}}\right) \quad (127)$$

Si l'on compare cette valeur avec celle de la différence de phase en ρ_0 , on constate un biais de phase variant le long de la fauchée, se traduisant par un biais de hauteur (Figure 85 et Figure 86):

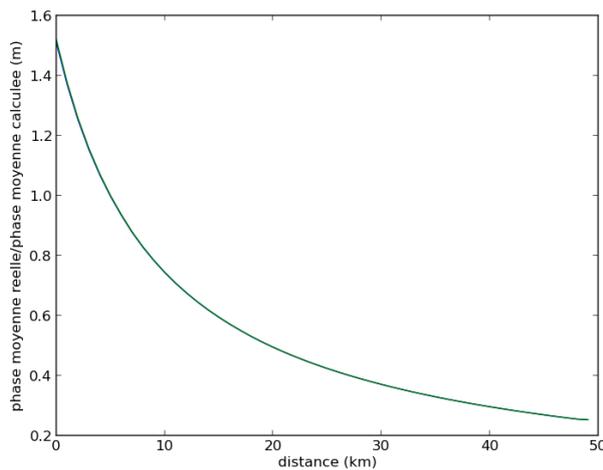


Figure 85 : Evolution de la phase différentielle avant moyenne kilométrique (en vert) et après moyennage kilométrique (en bleu) pour une erreur sur la référence de 2 m

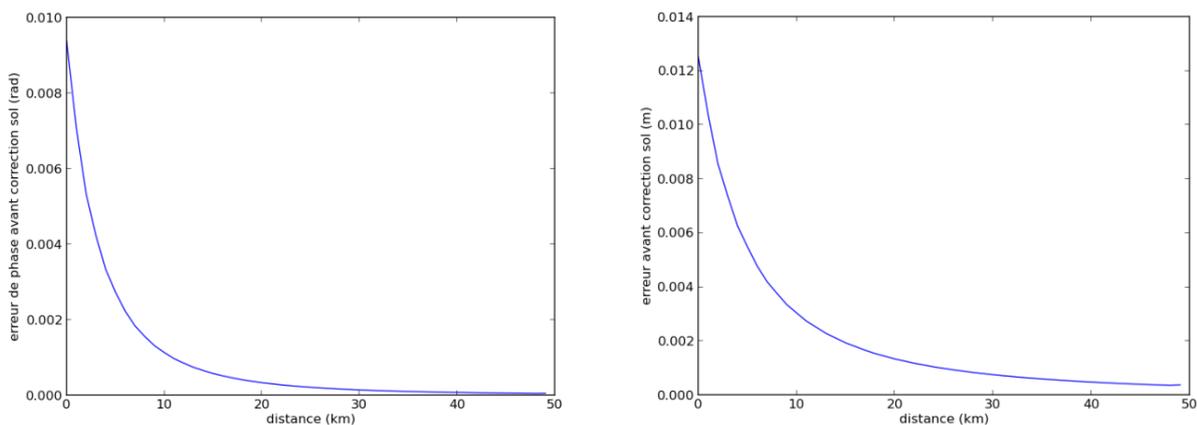


Figure 86 : Erreur de phase (à gauche) et de hauteur (à droite) produite par le moyennage kilométrique pour une erreur sur la référence de 2 m

Pour corriger ce biais de phase, il convient de connaître l'estimation du range corrigé des effets atmosphériques, afin de pouvoir estimer la valeur précise du range utilisé au sol pour l'inversion phase-hauteur, corrigé du biais induit lors du moyennage de la phase différentielle. L'évolution de la phase différentielle dépendant d'autres facteurs tels que la qualité de la référence, il faut en pratique procéder à

une première estimation biaisée de la hauteur, sans la connaissance précise de l'effet de la phase différentielle sur la mesure. Une fois une première estimation de hauteur réalisée, on peut itérer avec un second traitement des données, cette fois ci prenant compte des effets méconnus lors du premier traitement, tels que les erreurs sur la hauteur de référence.

On peut alors corriger précisément ce biais. Le biais résiduel restant sera dû au caractère non uniforme de l'échantillonnage lors du moyennage, et sera extrêmement faible.

En plus de ce biais corrigeable, on peut également noter une perte de cohérence lors du moyennage, qui est également faible, et qui est dû à la variance de la phase dans un intervalle de moyennage. On peut y voir une similitude avec la décorrélation géométrique, mais à une échelle beaucoup plus faible, la phase différentielle du pixel kilométrique étant très homogène.

On peut quantifier la perte de corrélation (Figure 87) due à ce moyennage ainsi :

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi B}{\lambda} \frac{\Delta H}{\rho}$$

$$d(\Delta\varphi \left(\rho_0 + \frac{\Delta\rho}{2} \right)) - d(\Delta\varphi \left(\rho_0 - \frac{\Delta\rho}{2} \right)) = -\frac{2\pi B}{\lambda} \Delta H \left(\frac{1}{\rho_0 + \frac{\Delta\rho}{2}} - \frac{1}{\rho_0 - \frac{\Delta\rho}{2}} \right)$$

$$d(\Delta\varphi) = -\frac{2\pi B}{\lambda} \Delta H \left(\frac{-\frac{2 \cdot \Delta\rho}{2}}{(\rho_0 + \frac{\Delta\rho}{2})(\rho_0 - \frac{\Delta\rho}{2})} \right)$$

$$d(\Delta\varphi) \approx \frac{2\pi B}{\lambda} \Delta H \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0^2} \right) \quad (128)$$

On peut démontrer que l'écart type de cette distribution est :

$$\sigma_0^2 = \frac{q^2}{12} = \frac{\pi B}{6\lambda} \left(\Delta H \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0^2} \right) \right)^2 \quad (129)$$

Or d'après l'équation (109) pour une seule vue (N=1), on obtient :

$$\gamma_{moy} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sigma_0^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \sigma_0^2 = 1 - \frac{1}{12} \frac{\pi B}{\lambda} \left(\Delta H \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0^2} \right) \right)^2 \quad (130)$$

4.5 Erreurs de la mesure et effet sur la restitution

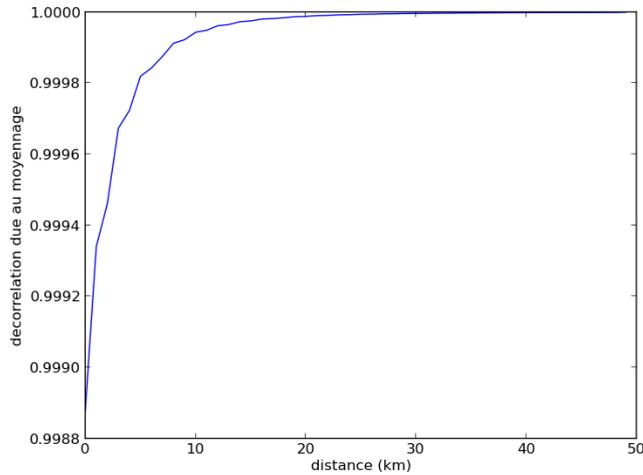


Figure 87 : Perte de corrélation produite par le moyennage kilométrique pour une erreur sur la référence de 2m

4.5.3.2. LES ERREURS DUES A UNE MECONNAISSANCE DU RANGE EN MODE HR

Afin de faciliter certaines étapes de traitement, comme la détection des surfaces d'eau, un éventuel déroulement de phase sur certaines zones ou bien simplement une amélioration de la qualité de la phase pour réduire le risque d'erreur de déroulement à cause du bruit thermique, différentes étapes de moyennage des produits interférométriques sont envisagées. En pratique, on effectue un premier moyennage azimut, d'environ 4 vues (pixels), avant les étapes de détection des surfaces d'eau et d'inversion de hauteur, cf. section 3.4.4. Afin d'atteindre la précision de hauteur spécifiée, il faut également adopter une stratégie de moyennage, qui sera décrite dans le chapitre 5.4. Une étape de moyennage adaptatif des interférogrammes, utilisant les masques d'eau préalablement extraits, est envisagée pour SWOT (Figure 88).

Dans ce cas, les phénomènes observés en mode LR doivent également être considérés, à leurs échelles respectives (en général à une fenêtre de moyennage plus faible). Un effet supplémentaire que l'on étudie ici est le caractère adaptatif de cette moyenne, qui peut entraîner des erreurs spécifiques. Dans le cas du mode HR, l'interférogramme est à la fois composé de pixels d'eau et de sol comme présenté Figure 89. Ceux-ci ont une phase différente et ne doivent pas être moyennés ensemble pour éviter de fortes erreurs de phase et de hauteur. Pour cela, on peut à la fois travailler sur les variations à l'intérieur de la distribution de phase considérée, ou sur un masque d'eau préétabli ou extrait des données.

4.5 Erreurs de la mesure et effet sur la restitution

Dans la Figure 89, on voit dans l'exemple d'une fenêtre de 5 par 5 pixels, l'effet produit dans la direction distance, où la phase différentielle varie, même pour une surface plane, en raison de la variation d'altitude d'ambiguïté.

Dans le cas des pixels d'eau en bordure de la rivière, le moyennage obtenu ne sera plus centré sur le pixel central d'origine, et un biais de phase (en plus des autres effets vus précédemment) est introduit, dépendant à la fois de la taille de la fenêtre, du pourcentage de pixels « terre » exclus, et de l'allure de la phase différentielle, c'est-à-dire à la fois des biais de mesure de la distance et des erreurs sur le MNT de référence.

Par simulation, on peut obtenir des ordres de grandeurs des biais qui apparaissent lors du moyennage, en fonction des différents paramètres affectant ceux-ci.

Dans nos exemples, on suppose que la moitié de la fenêtre est composée de pixels de sol, l'autre moitié, de pixels d'eau. Les résultats obtenus sont présentés Tableau 2 et Tableau 3 et montrent des biais pouvant être de l'ordre de quelques millimètres à centimètres, en fonction de la position dans la fauchée (near range et far range).

Tableau 2 : Biais de hauteur en mm au near-range en fonction de la taille de la fenêtre et de l'erreur sur la référence

Biais \ fenêtre	3x3	5x5	7x7	9x9
1m	0.32	6.4	9.6	12.8
2m	6.6	13.1	19.6	20.0
4m	13.5	26.9	40.2	53.4

Tableau 3 : Biais de hauteur en mm au far-range en fonction de la taille de la fenêtre et de l'erreur sur la référence

Biais \ fenêtre	3x3	5x5	7x7	9x9
1m	0.085	0.17	0.25	0.33
2m	0.17	0.33	0.50	0.65
4m	0.34	0.67	1.0	1.3

Ces biais supposent une connaissance parfaite du masque d'eau, et sont seulement dus à la non uniformité de la phase différentielle que l'on moyenne. Il est possible de limiter en partie ces effets en appliquant un moyennage prenant en compte le caractère non symétrique de la moyenne dès lors que l'on travaille près des berges.

4.6. LE LAYOVER

4.6.1. INTRODUCTION

Rappelons que le layover, source d'erreur majeure pour SWOT, provient de l'inversion de géométrie présente sur les images radar due à l'échantillonnage en distance de celles-ci (cf. section 3.2.1). Le phénomène de layover se produit lorsque la pente locale du terrain dans l'axe distance est plus importante que l'angle de visée radar, ce qui provoque un effet de repliement dans la géométrie radar. Dans ce cas, « l'ordre » des éléments dans la géométrie radar en distance est différent de l'ordre des points tels qu'ils apparaissent au sol.

4.6.2. EFFET DU LAYOVER DANS LE CAS DE SWOT

Dans le cas de SWOT, l'instrument KaRIn présente des angles d'incidence très faibles (de 0.6° à 3.9°), ce qui entraîne la présence de layover partout où l'on a du relief. Les missions SAR conventionnelles, présentant des angles d'incidences beaucoup plus importants, de l'ordre de 20 à 40°, sont moins affectées par ce phénomène, et seulement dans les zones à fortes variations topographiques.

Sur les surfaces terrestres observées par SWOT, le phénomène de layover se produit régulièrement, ce qui, combiné avec un rapport signal à bruit très défavorable, rend difficile l'exploitation de ces zones. Nous nous intéressons ici au layover terre/eau, SWOT ayant vocation à observer les étendues d'eau.

Cependant, dans le cas du mode de fonctionnement HR sur les surfaces d'eau continentales, deux aspects importants sont à considérer :

- L'effet du layover des berges
- L'impact de la présence de végétation, et en particulier les effets de décorrélation volumétrique

4.6.2.1. EFFETS DES BERGES

Dans la Figure 90, on note que le pixel 1 n'est pas affecté par le layover, il contient uniquement de l'eau. En revanche, les pixels de rivière suivants se retrouvent mêlés à des contributions venant du sol à cause du layover. Cela se traduit par une modification de la phase de l'eau qui est affecté par celle des berges. On a ainsi, d'après (6):

$$Pixel\ complexe = \int_R^{R+dR} A_k e^{-\frac{2i\pi}{\lambda} R_k} dk \quad (131)$$

Avec A_k l'amplitude élémentaire de la cible

4.6 Le layover

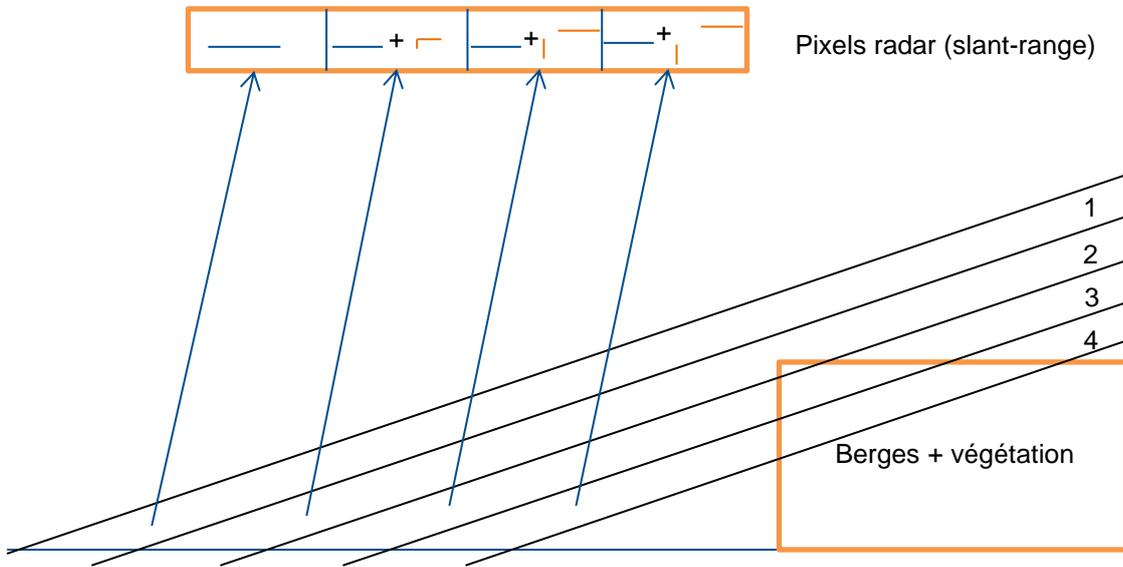


Figure 90 : Effet de la présence de berges sur l'image radar

On peut, avec l'équation précédente, estimer en première approximation la hauteur équivalente qui serait restituée à partir du pixel radar comme étant la moyenne des hauteurs contribuant au pixel, pondérées par leur amplitude.

L'amplitude est directement liée au coefficient de rétrodiffusion σ_0 (volumique ou surfacique) de la cible, ainsi qu'à sa surface ou son volume. Dans notre exemple, le pixel 2 sera moins affecté par les berges que les pixels 3 et 4. On peut définir de manière empirique une hauteur équivalente H_{eq} polluée par le layover, en fonction de la radiométrie et de la hauteur des berges :

$$H_{eq} = \frac{\int_R^{R+dR} \sigma_{0s} H_s dS + \int_R^{R+dR} \sigma_{0v} H_v dV}{\int_R^{R+dR} \sigma_{0s} dS + \int_R^{R+dR} \sigma_{0v} dV} \quad (132)$$

Cette formule donne une bonne approximation, mais n'est pas toujours valable. En effet, à l'intérieur du pixel radar affecté par le layover, les contributions de la berge peuvent devenir ambiguës vis-à-vis de celles de l'eau (berges hautes par rapport à la hauteur d'ambiguïté) et le biais induit par la berge devenir négatif. On obtient alors des profils de hauteurs de ce type (Figure 91) :

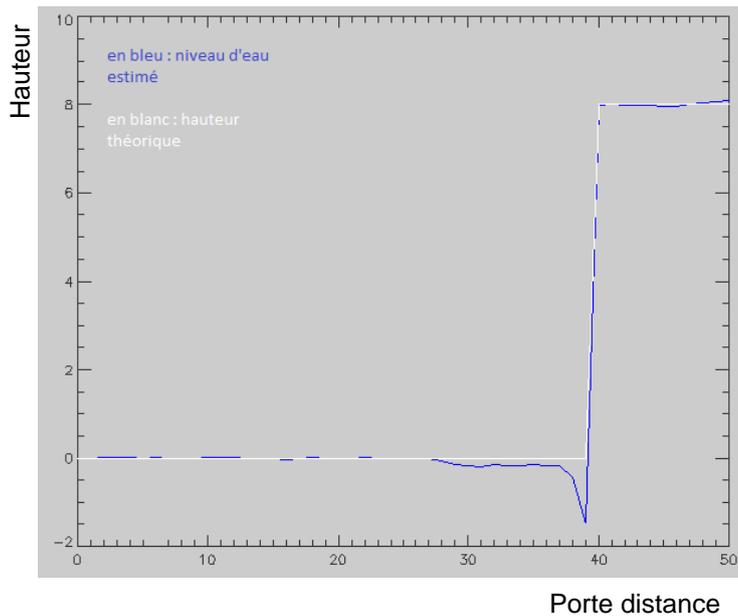


Figure 91 : Hauteurs restituées sur une rivière polluée par une berge plus haute que la hauteur d’ambiguïté : layover ambigu

Comme expliqué précédemment, dans le cas de SWOT, l’effet des berges est pondéré par la forte rétrodiffusion des surfaces d’eau vis-à-vis de celle du sol (ou de la végétation). Ainsi, la part prépondérante dans la phase des pixels soumis au layover est généralement celle des contributions venant de l’eau. Toutefois, la phase reste polluée, même faiblement, par les contributions de la berge, créant un biais non négligeable vis-à-vis de la précision de 10 cm recherchée.

Cette pollution s’accroît lorsque la différence de hauteur entre l’eau et les berges augmente : on assiste dans ce cas à la fois à une augmentation du biais de hauteur induit, mais également à un élargissement de la partie de la rivière soumise au layover.

Les exemples simulés présentés Figure 92 et Figure 93 sont réalisés dans des conditions de prise de vues SWOT à une incidence de 2° avec un simulateur et une chaîne de traitement prototypée représentative de SWOT (mode HR), mais sans bruit thermique, sur un extrait de fauchée de 5 km.

4.6 Le layover

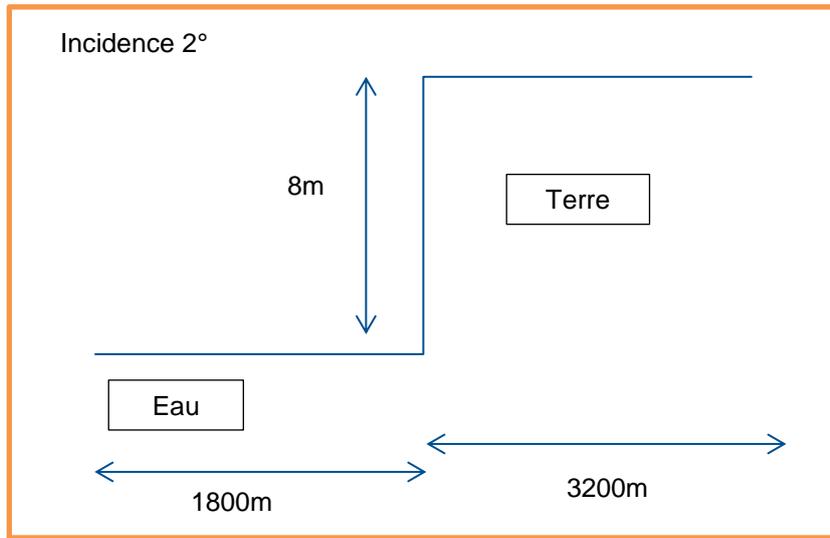
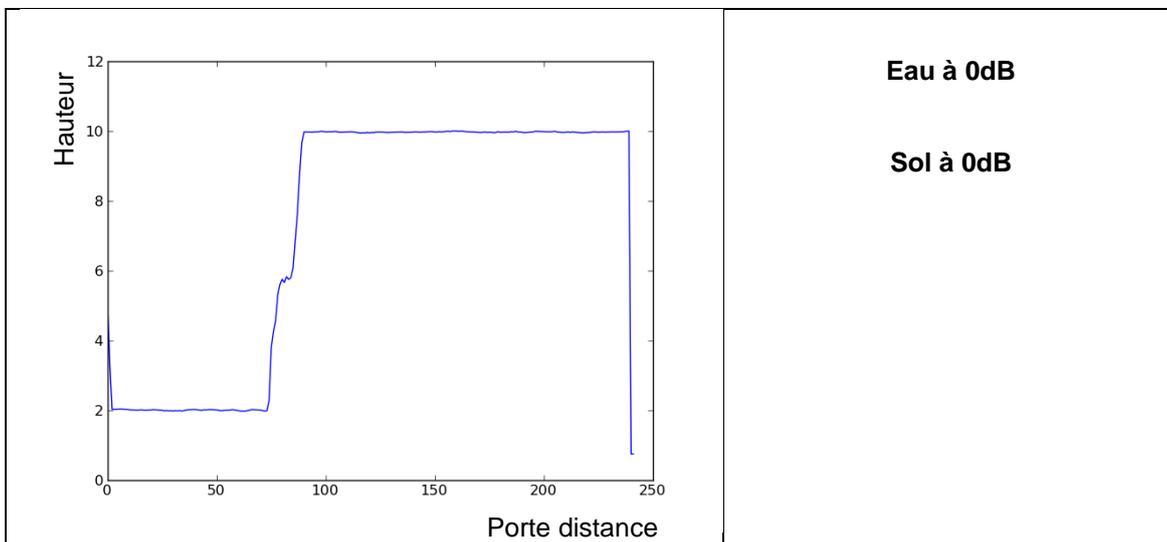


Figure 92 : Modèle de MNT artificiel utiliser pour simuler l'effet du layover sur la restitution

Les résultats présentés ensuite sont simulés avec différents contrastes radiométriques entre l'eau et le sol, sans bruit thermique pour observer les effets.



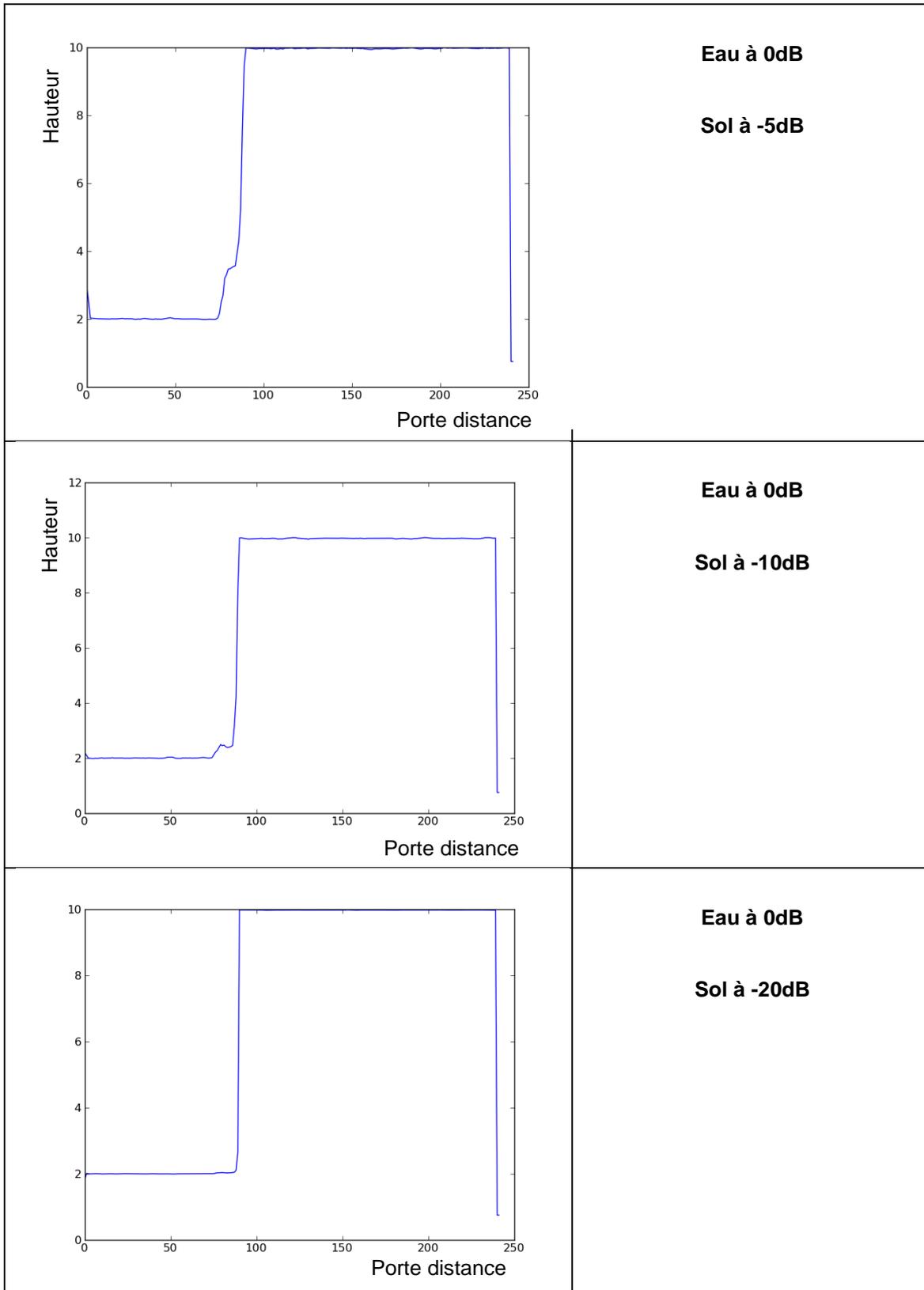


Figure 93 : Profils de hauteur issus de différentes simulations à partir du MNT Figure 92 en fonction du contraste radiométrique eau/terre

4.6 Le layover

On retrouve des résultats proches de l'approximation faite précédemment (132), et on observe un fort impact de la radiométrie sur les hauteurs obtenues. On peut aussi remarquer, que même avec un contraste très favorable (20 dB), on retrouve dans le cas d'une berge à 10 mètres au-dessus de l'eau, un biais d'environ 10 cm sur les zones affectées. Avec des contrastes radiométriques plus défavorables, les biais observés dans le cas d'une pollution par une berge élevée peuvent être de plusieurs dizaines de centimètres.

Sur la Figure 94, issue des simulations sur la Camargue, on peut observer le pourcentage d'eau à l'intérieur du pixel radar. Il s'agit d'un produit généré en même temps que la simulation, et qui est un bon indicateur de layover sur les zones d'eau. Il permet aussi d'identifier les pixels mixtes à la transition entre eau et terre, et de servir de vérité terrain dans le cadre de la validation des traitements d'extraction de masques d'eau. Cependant, il s'agit d'un produit de simulation qu'il n'est pas possible d'obtenir de manière parfaite en pratique, la connaissance du MNT et du niveau d'eau n'étant qu'approximative.

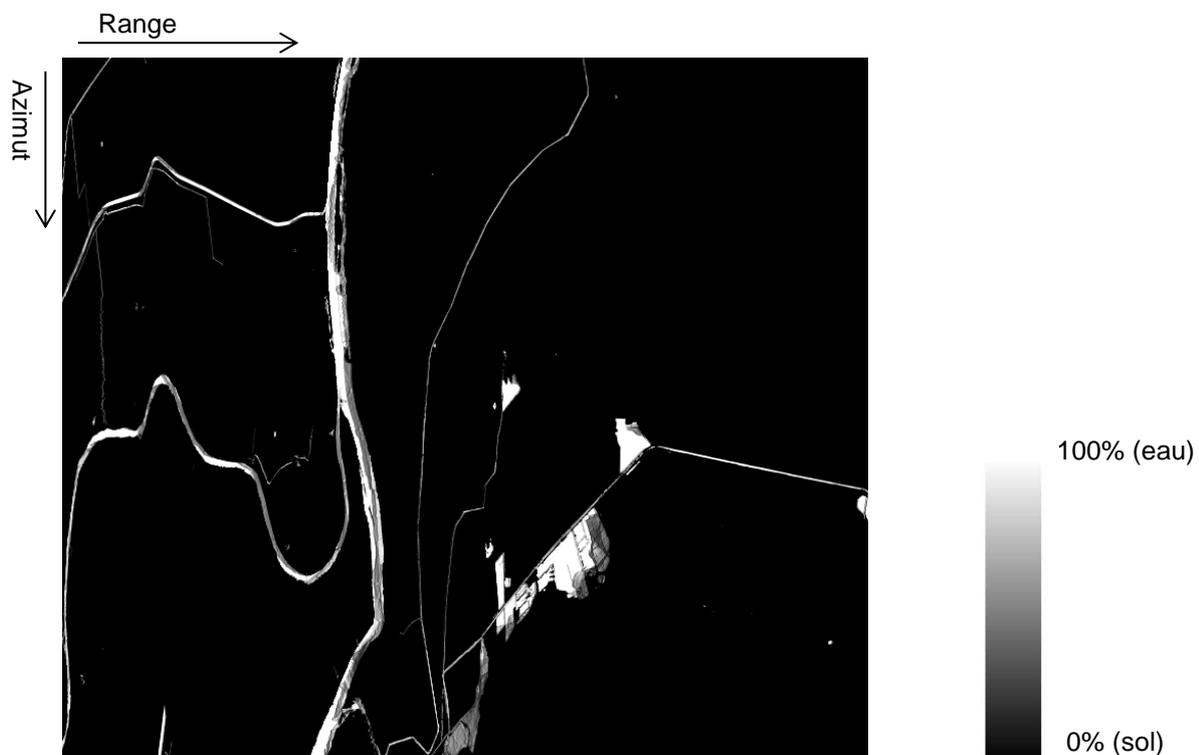


Figure 94 : Extrait du masque d'eau réalité terrain en pourcentage d'eau dans le pixel radar (multivue azimut d'un facteur 4)

On peut remarquer que la proportion de pixels pollués par le layover est importante, même dans le cas d'une région relativement plate comme la Camargue. Les zones noires sont les zones où la proportion d'eau est nulle, les zones blanches celles où elle est à 100%. Les zones grises représentent le layover (ou les pixels mixtes au niveau des rives) et ont une proportion d'eau variable.

4.6.2.2. EFFET DE LA VEGETATION

La végétation joue également un rôle important dans le cadre de SWOT pour les effets de layover. Comme présenté dans la section 3.3.2.5, on peut modéliser de différentes façons les effets de végétation sur les images radar, notamment par des effets non pas surfaciques comme pour le sol, mais volumiques.

Dans les conditions de SWOT, en général, l'impact radiométrique de la végétation est plus faible que celui du sol. De plus la faible pénétration des ondes en bande Ka laisse supposer que dans les zones de berges recouvertes de végétation, ce sera plutôt le couvert des arbres qui interagit avec l'onde radar. Cela se traduit par deux effets :

- D'une part, les arbres étant plus hauts que le sol, la pollution en hauteur sera augmentée, et l'étalement de cette pollution sur la rivière également plus large que si seules les berges étaient présentes.
- D'autre part, la radiométrie de la végétation étant souvent plus basse que celle du sol, la pollution en termes de biais de phase dû au layover eau/végétation sera également diminuée.

Des simulations avec plusieurs modélisations de la végétation ont pu mettre en évidence ces phénomènes [Lion-2013].

4.6.3. EFFET DU LAYOVER DANS LE CAS D'UNE SIMULATION SUR LA CAMARGUE

On a pu précédemment quantifier les effets que pourraient avoir le layover dans le cas d'un modèle synthétique. Des simulations représentatives de la région de la Camargue ont permis d'étudier avec précision le type d'erreur dont on peut s'attendre à avoir sur une acquisition SWOT. La scène étudiée est le grand bras du Rhône, la radiométrie utilisée suppose un σ_0 de l'eau d'environ 10 dB et un σ_0 du sol d'environ 0 dB. L'angle de visée du début de l'image a été fixé à 0.6° , ce qui correspond à une image en proche nadir, où les effets géométriques du layover sont le plus important. La végétation a été modélisée avec un σ_0 surfacique équivalent de -5 dB et une faible pénétration. Ce cas est plutôt réaliste en terme de SNR et en terme de contraste eau/terre/végétation.

4.6.3.1. CAS SANS PENTE SUR LA RIVIERE : HAUTEUR D'EAU CONSTANTE

On considère tout d'abord une hauteur d'eau constante. Dans le premier cas, le bruit thermique n'a pas été introduit. Afin d'illustrer les effets spécifiques du layover, la référence utilisée pour l'inversion phase-hauteur a été choisie parfaite (confondue avec la réalité) afin de ne pas multiplier et croiser les sources d'erreurs.

Les résultats obtenus montrent un effet important du layover, à la fois sur l'image de masque de layover théorique, mais également sur l'image des hauteurs restituées. On obtient sur le côté droit de la rivière un effet de pollution sur la hauteur assez important. La hauteur moyenne théorique du segment de

4.6 Le layover

rivière analysé est de 0.43 m (obtenue à partir du MNT précis de simulation). Lorsque l'on fixe un seuil pour moyenniser nos hauteurs, en ne prenant que les pixels dont le masque théorique présente plus de 90% d'eau, on obtient une hauteur moyenne sur le produit issu de la chaîne de traitement de 0.43 m, ce qui valide la mesure. En pratique, on ne disposera pas de ce masque de layover précis. Dans ce cas, si l'on moyenne tous les pixels d'eau de la rivière, on obtient une hauteur moyenne de 0.60 m, soit un biais directement imputable au layover de 20 cm.

Dans le cas d'une simulation avec ajout du bruit thermique, les résultats sont proches. On ne peut plus quantifier la localisation du layover sur l'image de hauteur, mais les résultats après moyennage sur toute la rivière sont similaires : on obtient un résultat non biaisé ($h_{\text{mean}} = 0.43\text{cm}$) dans le cas où l'on supprime les pixels affectés par le layover (grâce à une détection parfaite produite en même temps que la simulation). En conservant les pixels pollués, on obtient une hauteur moyenne de 0.56 cm, proche de l'acquisition sans bruit. L'effet du bruit thermique sur la phase est totalement aléatoire, augmentant son écart-type sans la biaiser au premier ordre. De même, les hauteurs restituées à partir de la phase ne doivent pas être biaisées par l'ajout du bruit thermique dans le cas où l'on a une référence parfaite et pas d'erreurs de déroulement. Différentes mesures à partir de simulations où l'angle d'incidence a été modifié présentent des résultats similaires : on retrouve la même valeur (attendue) de hauteur moyenne avec et sans bruit si on supprime les pixels en layover. En revanche, dans le cas où l'on considère tous les points, le résultat entre l'image sans bruit et celle avec présente systématiquement un léger décalage d'environ 3 cm. Ce décalage s'explique par la présence de sauts de phase locaux lors de la restitution de hauteur. Même avec un MNT de référence proche de la réalité, l'effet du bruit thermique sur la phase induit quelques sauts de phase, localement. Dans les zones sans layover, la référence est parfaitement confondue avec la réalité, on est totalement symétrique en terme de risque de sauts, et la présence de ces quelques sauts ne biaise pas la hauteur, la phase différentielle moyenne étant centrée sur 0. En revanche, sur les zones en layover, la phase réelle (polluée par le layover) est légèrement différente de la phase de référence (celle-ci supposant un contraste eau/sol infini, cf. 4.8.2) et le risque de sauts de phase n'est plus totalement symétrique. La hauteur de référence moyenne se retrouve au-dessous de la hauteur équivalente réelle avec layover, et l'on a donc une probabilité de sauts de phase négatifs un peu plus élevée, ce qui induit ce léger biais négatif lors de la moyenne. Pour corriger ceci, il faut soit retirer les pixels présentant ces sauts de phase, soit les corriger, soit lisser la phase avant le déroulement direct pour limiter l'apparition de ces sauts. Ce phénomène apparaît également quand la référence n'est pas parfaite (cf. 4.7.2).

4.6.3.2. CAS NOMINAL AVEC PENTE SUR LE RHONE

Cette simulation a été modifiée pour prendre en compte la pente dans la rivière de manière réaliste. On retrouve les résultats précédents sur les effets du layover et du bruit thermique, à une exception près. Lors du calcul d'une moyenne des hauteurs de la rivière avec prise en compte du layover (c'est-à-dire en ignorant les points trop pollués), on observe un biais de -6 cm par rapport à la hauteur moyenne théorique attendue. Ce biais s'explique par le fait que le layover n'est pas réparti uniformément le long de la rivière. Ainsi, lorsque l'on masque les pixels pollués, on biaise le résultat final de la moyenne, en favorisant

certaines zones de la rivière comparées à d'autres. Il faut donc veiller à effectuer une moyenne adaptée, prenant compte les effets de pente de la rivière et la non uniformité du layover le long de celle-ci.

La Figure 95 présente les images de hauteurs obtenues après un traitement d'inversion avec une référence parfaite, et sans bruit thermique afin de visualiser directement les effets du layover.

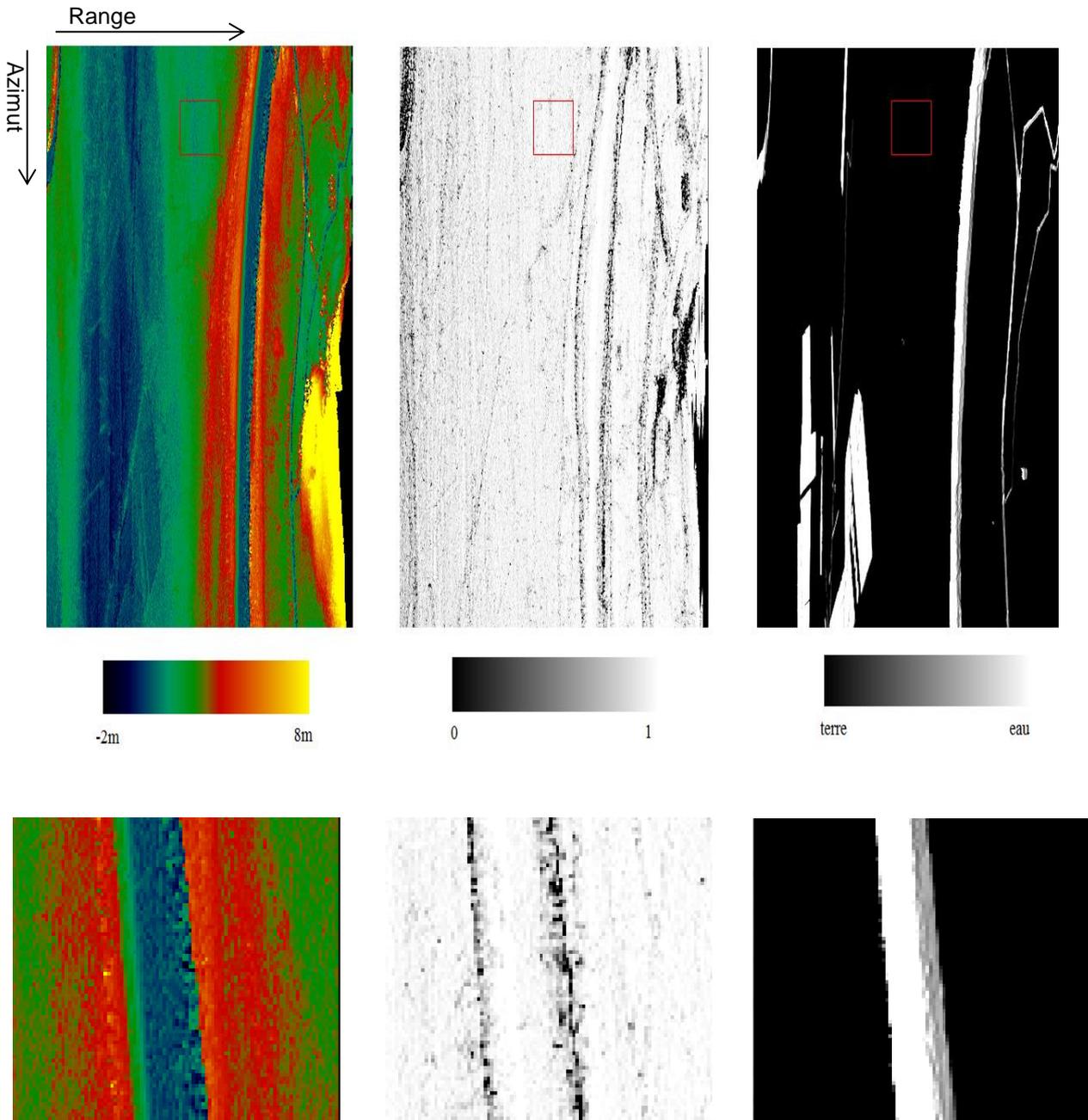


Figure 95 : A gauche : hauteurs d'eau restituées sur une partie de l'image (présomption d'un facteur 2.5, visualisation pleine résolution, pas de bruit thermique). Au centre : Image de cohérence interférométrique. A droite : masque d'eau théorique exprimé en % (représentation du layover). L'image pleine résolution est présentée en haut, un zoom est présenté en bas.

4.6 Le layover

On peut observer sur le zoom de la rivière que les pixels pollués par le layover sont sur le côté droit, opposé à la trace orbitale, et présentent une hauteur légèrement plus haute que sur le reste de la rivière. Ces zones sont celles présentant une cohérence plus faible, et sont également identifiables sur le masque de pourcentage d'eau théorique. Comme nous le verrons par la suite dans ce chapitre, en pratique l'identification des zones de layover à partir de la donnée est plus complexe, en raison des effets du bruit thermique non pris en compte ici, mais qui perturbe fortement l'analyse de l'image de cohérence.

4.6.4. DETECTION ET CORRECTION DES EFFETS DE LAYOVER

Nous avons vu que le phénomène de layover dans le cas de SWOT affecte ainsi fortement la restitution de hauteurs des zones affectées. Par conséquent, il est nécessaire d'une part d'être en mesure d'identifier les pixels affectés, afin de ne pas les prendre en compte lors des calculs moyens de hauteurs ou de débit. D'autre part, on peut s'interroger sur la possibilité de quantifier ces effets afin d'y apporter une correction, afin de corriger les effets de layover sans réduire le nombre de pixels disponibles pour atteindre la précision finale.

4.6.4.1. IDENTIFICATION DES ZONES DE LAYOVER EAU/TERRE

4.6.4.1.1. A partir des données SWOT

La présence de layover sur une image radar se traduit par une perte de cohérence géométrique sur celle-ci. Cette perte de cohérence est provoquée par l'augmentation de la taille du pixel radar projeté au sol, provoquant une variation plus importante de l'angle de visée à l'intérieur de celui-ci (cf. section 4.5.1.2). Dans le cas du layover, les contributions du sol participant à un même pixel ont une plus grande variété de phase par rapport à un pixel sans layover, induisant une augmentation de la décorrélation géométrique et une perte de cohérence interférométrique.

Cela rend ces zones identifiables directement sur l'image, sans connaissance a priori de la nature du terrain. Toutefois, d'autres phénomènes (mouvement de l'eau, radiométrie faible entraînant une diminution du SNR, etc.) peuvent se traduire par des baisses de cohérence, difficilement dissociables de celles dues au layover. En particulier, dans le cas de SWOT, le poste de décorrélation dû au rapport signal sur bruit est important, et est le principal facteur affectant la cohérence. Dans le cas des zones de layover, on a à la fois une perte de corrélation géométrique (qui nous intéresse pour détecter ces zones) mais également un niveau de signal plus important sur ces zones en raison du repliement. Ces deux effets peuvent ainsi se contrebalancer, voire même entraîner une cohérence plus importante dans les zones de layover, en particulier sur les zones terrestres. Sur l'eau, cet effet est moins important, et la perte de cohérence est en général visible sur les zones de layover, mais souvent difficilement.

De la Figure 96 à la Figure 99 , on observe la difficulté pour parvenir à une estimation correcte du layover en utilisant les images de cohérence. Sur la Figure 96, on peut voir la cohérence liée à la perte de corrélation géométrique, significative en particulier des effets de layover. Sur la rive droite, opposée au passage du radar, on observe une perte de cohérence sur la rivière, et on peut ainsi identifier la zone polluée par la layover. Sur la Figure 98, la proportion d'eau dans le pixel est obtenue à partir du modèle numérique de terrain et du masque réel ayant servi à simuler. Il s'agit donc d'un produit parfait, mais qui en pratique ne peut pas être produit par la donnée. Celui-ci confirme les zones que l'on a pu identifier comme layover sur la première image. Cependant, aucune de ces deux informations n'est directement disponible à partir des données SWOT. L'image de cohérence réellement observée sur une acquisition SWOT est représentée Figure 97. La cohérence est affectée par la perte de corrélation due au rapport signal à bruit défavorable. Dans SWOT, c'est le poste majeur affectant la cohérence, et il noie totalement l'information de décorrélation géométrique liée au layover, il est alors difficile de dissocier les deux effets.

Sur la Figure 99, on peut voir ces différentes images en profil. Sur le tracé noir, contrairement aux deux autres, il est impossible de caractériser et localiser la perte de cohérence de la moitié droite de la rivière, en raison du fort bruit thermique. Cependant, dans certains cas où le SNR est plus favorable, avec une forte rugosité et une rétrodiffusion importante, la perte de corrélation est faible et il peut être possible de caractériser plus facilement la décorrélation liée au layover. Dans le cas contraire, on peut moyenniser l'image de layover sur la rivière pour tenter d'extraire une information utilisable. Cependant, le niveau de moyennage nécessaire pour faire disparaître la composante de décorrélation liée au bruit thermique est important, et se traduit par une forte perte de résolution, rendant difficile l'identification précise des petites zones de layover.

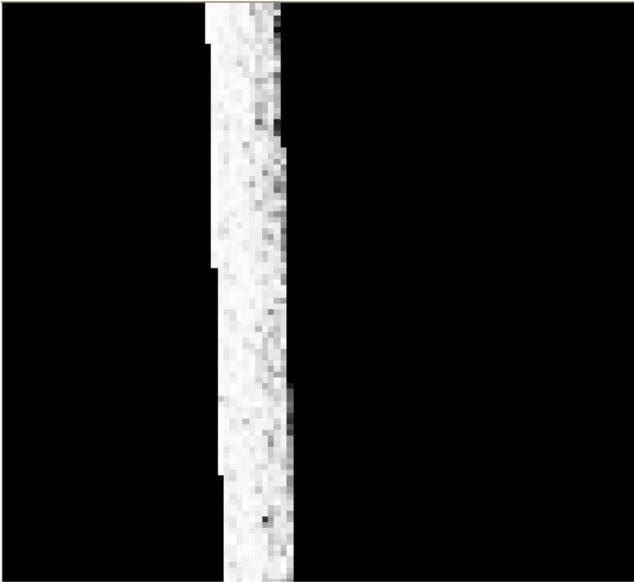


Figure 96 : Cohérence sur une simulation sans bruit thermique

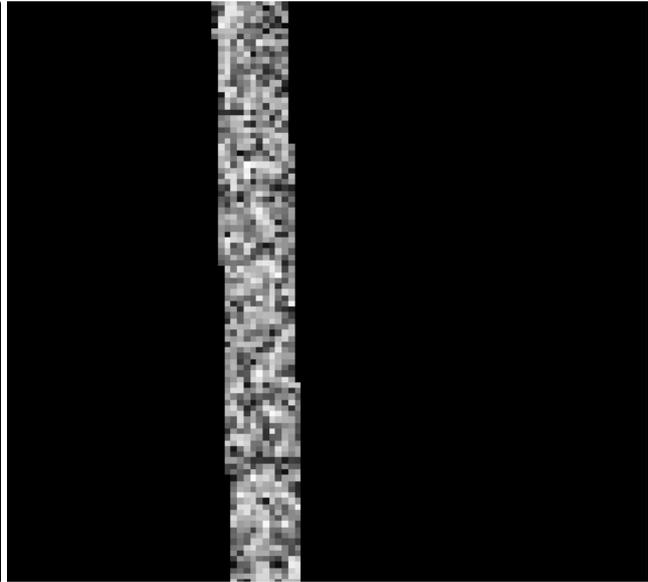


Figure 97 : Cohérence avec bruit thermique

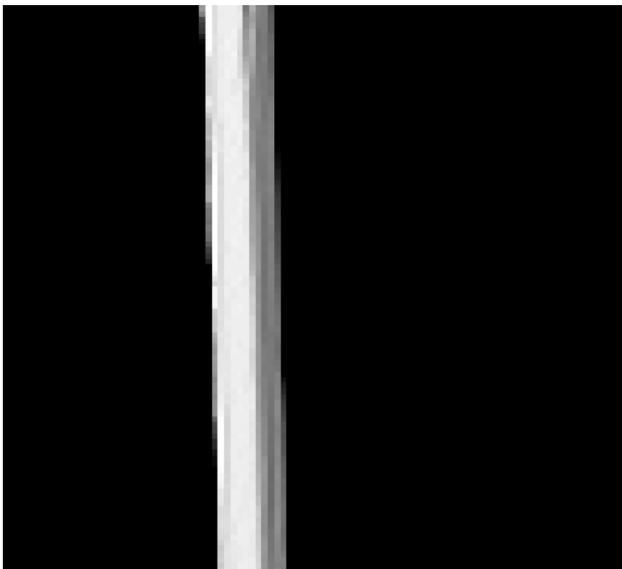


Figure 98 : Proportion eau/terre (estimation parfaite du layover à partir des MNT et masque réels)

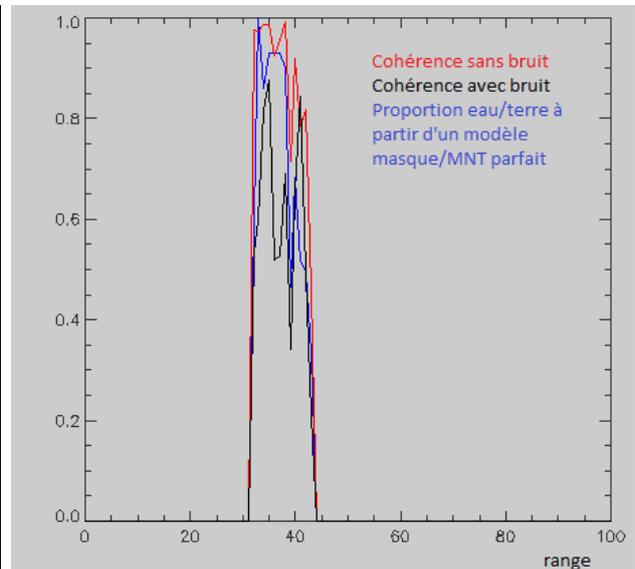


Figure 99 : Profil d'une ligne de l'image (cohérence avec et sans bruit, proportion eau/terre)

Une solution possible serait l'utilisation de séries d'interférogrammes (ou de hauteurs) afin de réduire le bruit. Il deviendrait alors plus simple de détecter des anomalies de phase ou de hauteurs afin d'identifier les zones en layover sur les acquisitions. Les difficultés qui apparaîtront dans ce cas seront liées à la variabilité des étendues et des hauteurs d'eau.

On voit donc qu'il peut parfois être difficile d'estimer quelles zones ou non conserver uniquement à partir de critères sur la qualité de phase, qui n'est pas uniquement sensibles à nos effets de layover. On peut alors étudier s'il n'est pas possible d'estimer différemment le layover, voire de le corriger.

4.6.4.1.2. A partir de données a priori

Précédemment, on a vu dans la section 4.6.1 que l'apparition de layover était un phénomène purement géométrique, même si son effet en termes de biais de phase dépend aussi de paramètres radiométriques. Une connaissance parfaite de la géométrie de notre acquisition permettrait donc d'identifier les zones affectées, tandis qu'une connaissance supplémentaire de la radiométrie permettrait d'en quantifier les effets et de les compenser. Dans le cas de SWOT, la connaissance a priori de la géométrie du terrain est apportée par un MNT de référence, dont le rôle principal est d'assurer le déroulement de la phase interférométrique.

A partir de ce MNT de référence, on peut envisager plusieurs façons de détecter les zones de layover. Des calculs purement géométriques basés sur le MNT de référence projeté en géométrie Radar permettent de déterminer la condition d'inversion traduisant la présence de layover (Figure 100).

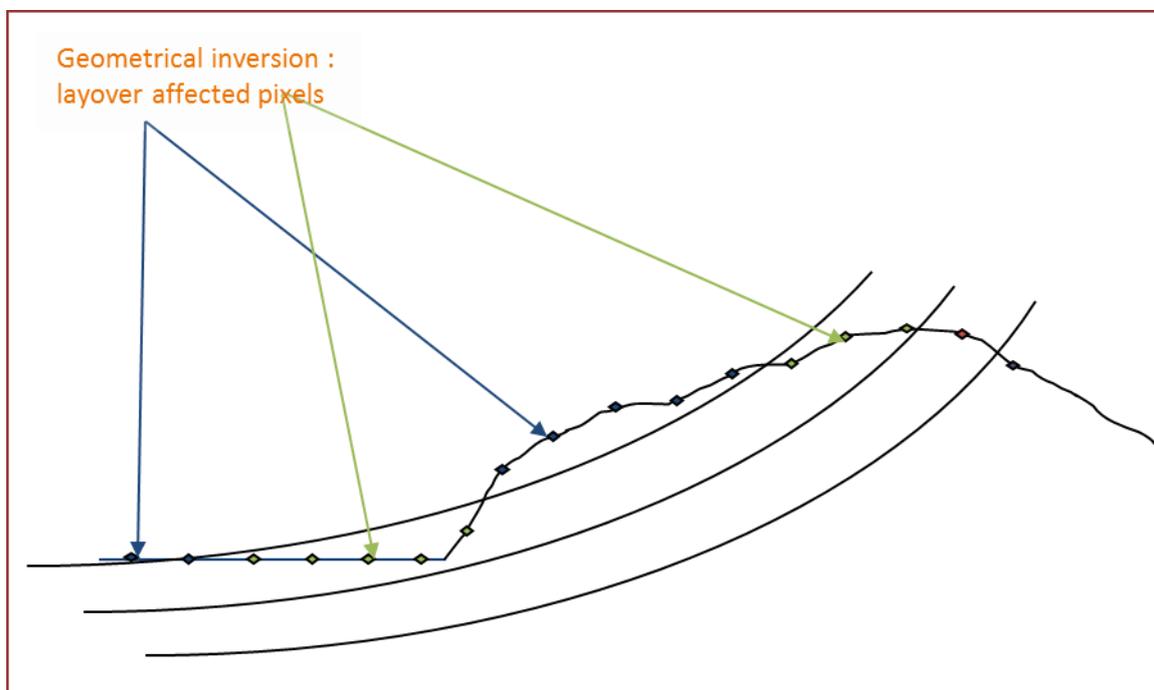


Figure 100 : Détermination géométrique du layover par le MNT de référence : détection des inversions géométriques pour identifier les pixels en layover

4.6 Le layover

A l'aide d'un masque d'eau a priori, il est également possible de détecter la nature des contributeurs appartenant à un pixel radar, et d'établir ainsi le pourcentage de terre polluant un pixel d'eau, afin de pouvoir établir une carte de détection de layover, et éventuellement d'envisager un seuillage du layover adapté à la structure d'eau étudiée.

La Figure 101 est issue d'une simulation sur la Seine, à proximité de Rouen. Les hypothèses radiométriques de σ_0 sont de 10 dB pour l'eau et 0 dB pour le sol. Les résultats montrent que sans élimination des points d'eau en layover, on obtient sur un large tronçon de rivière un biais de hauteur moyenne de 82 cm imputable au layover. Une estimation parfaite du layover, réalisable en pratique seulement en simulation, montre que l'on peut faire disparaître totalement ce biais. En revanche, si le layover est détecté à partir d'une référence légèrement erronée, il reste des résidus d'erreurs. Ainsi, dans le cas où le masque de layover est estimé à partir d'une hauteur de référence rigoureusement parfaite sur le sol, mais biaisée d'un mètre sur l'eau (par exemple issue d'un passage précédent de SWOT), on note un résidu d'erreur de 2 cm dans notre cas de simulation, provenant de la sous-estimation de certaines zones polluées (différence entre le « vrai » masque de layover et le masque estimé à partir d'une référence légèrement erronée). Dans les cas où la structure d'eau étudiée est suffisamment large, et où la pollution du layover ne concerne qu'une partie de l'image, il faudra donc prévoir des marges dans le masque de layover, afin de pouvoir compenser d'éventuelles erreurs sur la référence. Cependant, surestimer les zones de layover diminue le nombre de pixels utiles lors de l'estimation des paramètres hydrologiques (hauteur moyenne, pente, etc.) et affecte la précision de ces mesures.

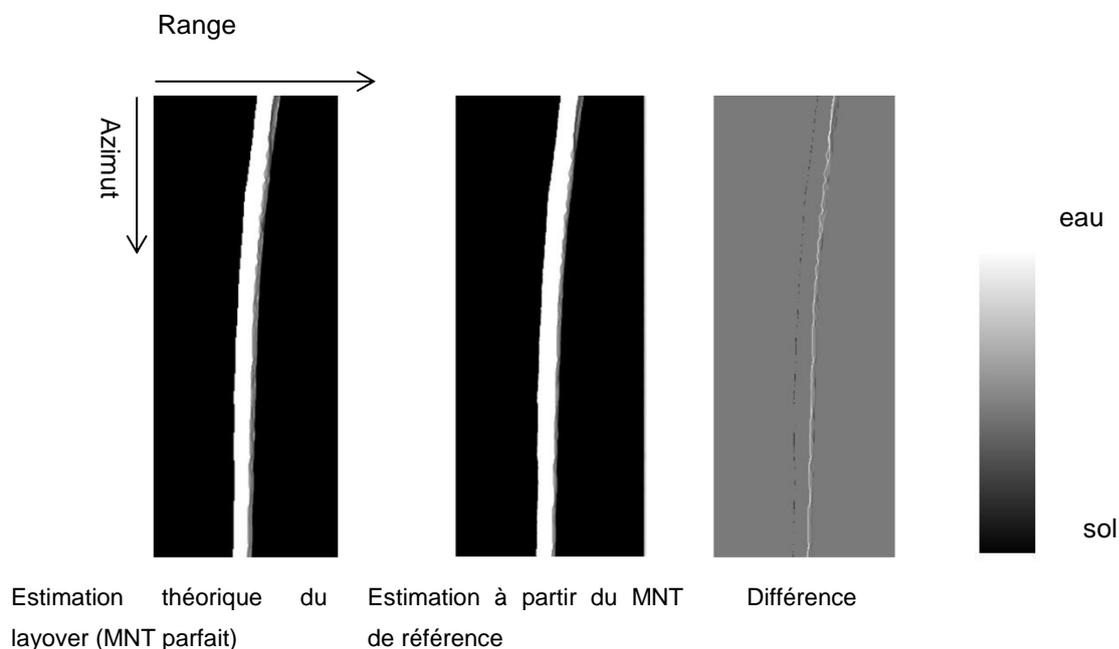


Figure 101 : Détection de layover à partir du MNT de référence : différence entre le layover réel et la prédiction obtenue à partir de la référence

4.6.4.1.3. Correction du biais de phase dû au layover

Enfin, une méthode ambitieuse consiste à utiliser à la fois les informations géométriques issues de la référence, mais également des données radiométriques a priori, afin d'évaluer directement l'impact du layover en terme de pollution de phase. En simulant deux interférogrammes de référence avec et sans layover à partir des données a priori, il est possible ainsi de détecter le layover, mais également de le corriger, en particulier dans le cas des zones où tout le plan d'eau est affecté par le layover. Dans ce cas, un masquage des zones affectées supprimerait l'ensemble des points de la rivière et empêcherait toute estimation des hauteurs d'eau.

Cependant, le MNT de référence ne traduit pas parfaitement la réalité de notre acquisition, et estimer parfaitement le layover de l'image uniquement à partir de celui-ci est très difficilement réalisable, sauf en ayant une référence parfaite, que ce soit sur la topographie des berges ou sur les niveaux d'eau. En effet, une erreur de 1 m de niveau d'eau se traduit par un ΔH d'1 m également entre les berges et l'eau, et par une extension (ou une réduction) de 15 à 100 mètres de la zone de rivière affectée (ou non) par le layover. De même, l'estimation du biais de phase associé est également biaisée par une erreur sur la référence. L'utilisation du MNT SRTM à 30m de résolution étant envisagée pour SWOT, il semble donc assez difficile de se servir de celui-ci comme un estimateur précis des zones de layover, et encore plus compliqué de s'en servir pour corriger celui-ci. L'estimation du biais de phase est également sensible à la radiométrie du milieu, et la connaissance de celle-ci est limitée, en particulier pour la végétation, et peut conduire à des corrections de mauvaise qualité. Toutefois, le MNT de référence peut servir à déterminer des zones de probabilité fortes (pixels d'eau proches des berges faisant face au radar) et être utilisé comme outil complémentaire à la cohérence pour qualifier les zones de layover.

4.6.4.1.4. Utilisation d'itérations lors du traitement pour la prédiction de layover

Outre la cohérence et le MNT de référence, il existe une troisième façon de quantifier ces effets : il s'agit des produits de hauteurs après traitement. En effet les erreurs dues au layover seront faibles. Et même si elles ne sont pas acceptables vis-à-vis des spécifications SWOT, elles sont suffisamment peu importantes pour que les hauteurs obtenues par le traitement de l'image (avec layover) soit une bonne référence pour estimer géométriquement le layover comme précédemment. Dans ce cas, une mise à jour du MNT de référence avec les niveaux d'eau estimés par un premier traitement permet d'obtenir une précision plus forte dans l'estimation du layover. On a vu plus tôt qu'un effet de layover dans le cas d'une berge haute peut se traduire par des erreurs de l'ordre de la dizaine de centimètres. Avec un nouveau modèle de référence ayant cet ordre de précision, on peut cette fois-ci envisager d'estimer les zones affectées par le layover pour les retirer lors de l'estimation des produits hydrologiques, affinant ainsi les résultats obtenus lors du premier passage.

4.6 Le layover

Les dernières erreurs présentées sont celles liées au déroulement de phase lors de l'inversion phase-hauteur pixellique.

4.7. LES ERREURS DE DEROULEMENT DE PHASE

Dans la section 4.3, comme nous l'avons expliqué, une hypothèse fondamentale doit être vérifiée lors de l'inversion phase-hauteur pixel par pixel utilisant un MNT de référence, sans laquelle celle-ci s'avère faussée. Le MNT de référence projeté en géométrie SAR doit se trouver à moins d'une demi-hauteur d'ambiguïté de la réalité. Dans le cas contraire, le déroulement de phase direct n'est pas correct, et la conversion phase-hauteur échoue, ce qui se traduit par des sauts de hauteur d'une altitude d'ambiguïté sur les pixels ne respectant pas la condition.

Dans le cas de SWOT, cette hypothèse est assez contraignante, l'altitude d'ambiguïté variant d'environ 50 m au far-range à 8 m au near-range. On a donc une condition qui est plus sensible en début de fauchée, tandis que la fin de fauchée ne présente pas de problèmes majeurs de déroulement de phase. Le MNT de référence envisagé comme support de la mission est issu de SRTM, avec les niveaux d'eau mis à jour. Sa précision n'est pas suffisante pour assurer sur la totalité du globe, à la fois en proche nadir et fin de fauchée, la condition de précision recherchée. De plus, certaines zones géographiques ne disposent pas de MNT aussi précis (hautes latitudes par exemple), rendant également le déroulement direct difficile sur ces régions. Dans cette section, nous aborderons l'impact d'une précision insuffisante du MNT, et nous verrons dans la suivante comment essayer de corriger une partie des erreurs apparaissant avec la méthode proposée.

4.7.1. EXEMPLES D'ERREURS RENCONTREES

Les cas présentés dans cette section sont illustrés sans bruit thermique, afin de pouvoir constater visuellement plus facilement les erreurs de déroulement rencontrées. Ces tests ont également été menés avec bruit thermique pour valider les traitements.

Dans un cas très favorable, présenté sur la Figure 102, où la référence est suffisamment précise, on obtient une bonne restitution de la hauteur. On observe un profil sur une des lignes de l'image de hauteur issue de la simulation et du traitement en utilisant une référence peu biaisée (3 m). Les résultats montrent que les hauteurs (en vert) sont correctement restituées sur la majeure partie de l'image. Quelques phénomènes peuvent cependant être observés. Sur le côté gauche de la rivière, autour des colonnes 260-270, on peut voir des erreurs de restitution de hauteurs. Elles ne sont pas dues à une mauvaise inversion de la phase provoquée par une imprécision de la référence, mais à la mauvaise qualité de la phase sur ces pixels. En effet, de par leur pente locale perpendiculaire à l'angle de visée radar, ces pixels présentent une radiométrie faible, et donc un mauvais rapport signal à bruit, d'où les erreurs d'estimation de hauteurs. Il ne

s'agit donc pas d'une erreur de déroulement. En revanche, sur le côté droit de la rivière, les erreurs que l'on peut observer autour de la colonne 290 sont dues à un mauvais déroulement de la phase.

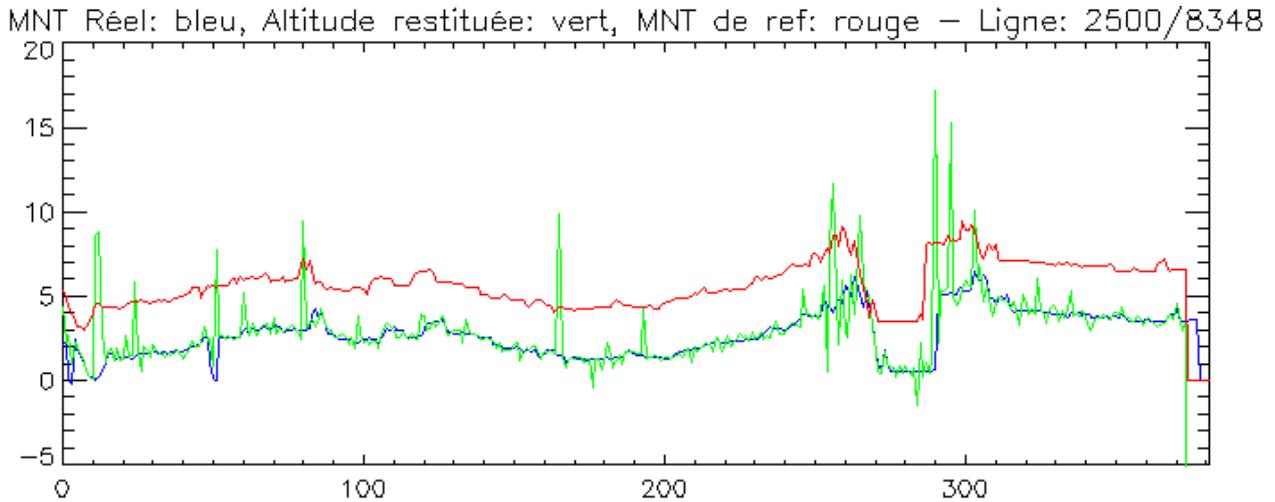


Figure 102 : Hauteurs obtenues à partir d'un MNT de référence lissé et biaisé de 3m

Le premier cas d'erreur rencontré sur la Figure 103 est celui où le MNT présente un fort biais avec la réalité (25 m). Dans ce cas, toute l'image est biaisée d'une ou plusieurs altitudes d'ambiguïté (la phase peut faire plusieurs tours). Cela se traduit par différents biais de phase en fonction de la position dans la fauchée. Au near-range, on peut observer un biais valant trois fois la hauteur d'ambiguïté, en raison du fort écart entre référence et réalité, provoquant un mauvais déroulement de la phase. Le biais observé n'est pas constant, en raison de la variation importante de l'altitude d'ambiguïté le long de la fauchée. A partir de la ligne 40, la condition n'est toujours pas respectée, et on observe un biais de deux fois la hauteur d'ambiguïté. Enfin, à partir de la colonne 230, on observe un biais de phase d'une fois la hauteur d'ambiguïté.

4.7 Les erreurs de déroulement de phase

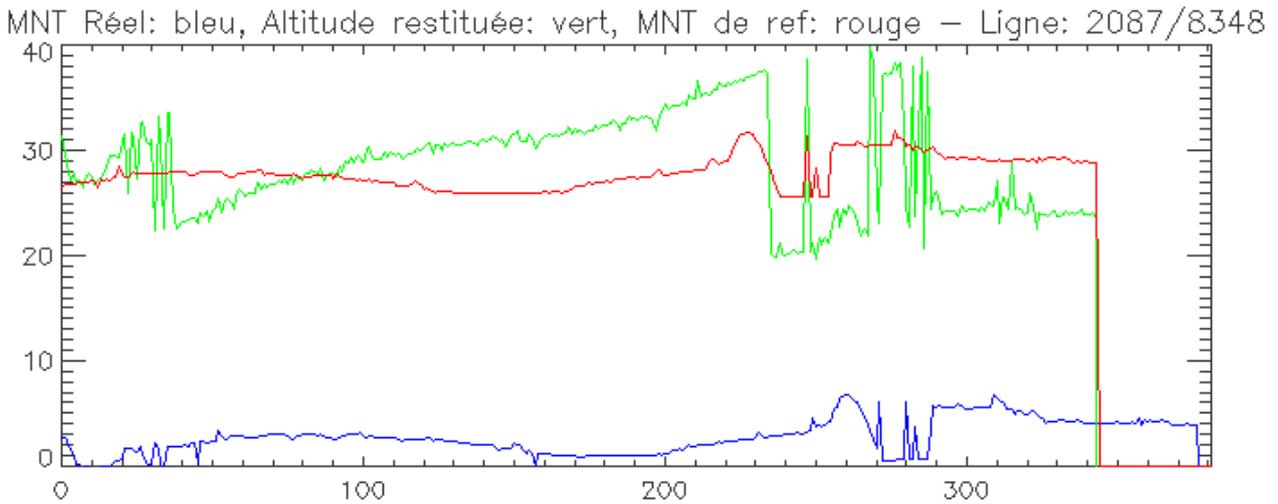


Figure 103 : Hauteurs obtenues à partir d'un MNT de référence biaisé de 25 m : plusieurs sauts d'ambiguïté

Le cas suivant présenté sur la Figure 104 est simulé avec une référence biaisée de 7 m. Il montre deux effets :

Tout d'abord, la hauteur restituée est biaisée au near-range, puis converge à nouveau avec la réalité. En effet, malgré un biais constant, la hauteur d'ambiguïté varie. Ainsi, elle est suffisamment élevée au far-range pour que la phase différentielle soit correctement déroulée, mais devient trop faible en début de fauchée, où la condition n'est plus respectée et la restitution directe échoue. On retrouve ici le caractère point à point de la restitution : il n'y a pas de propagation d'erreurs comme lors des déroulements classiques par gradient. Une partie de l'image peut être bien restituée, tandis que l'autre présente des erreurs.

Le second effet vient des effets de topographie lors de la projection du MNT de référence, particulièrement sur les transitions berges/rivières, autour notamment de la rivière (colonne 280 à 290 de la Figure 104).

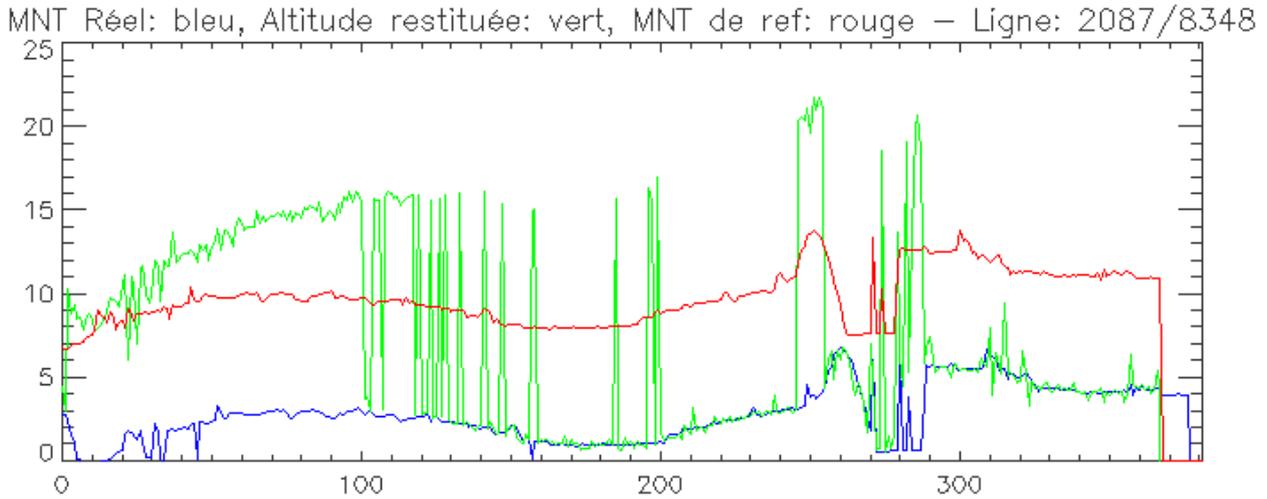


Figure 104 : Hauteurs obtenues à partir d'un MNT de référence biaisé de 7m (effet au near-range + décalage)

Dans l'illustration suivante (Figure 105), le MNT en trait plein représente la réalité de l'acquisition, le pointillé la référence (superposée). On se concentre sur 3 pixels formés à partir de ce MNT, à la fois sur le MNT réel et sur la référence. Le pixel 1 est uniquement composé de contributeurs d'eau, de même que sa référence, il n'y aura donc pas de problème lors de la projection de la référence en géométrie radar. Les pixels 2 et 3 en revanche, présentent du layover. Comme vu précédemment, on peut considérer qu'avec la différence de radiométrie sol/eau, la réponse prédominante de phase (et donc de hauteur associée), sera celle de l'eau. En revanche, lorsque l'on projette le MNT de référence, les « pixels » de référence associés à ces pixels radar sont formés en moyennant les coordonnées de toutes les facettes présentes dans la case radar, sol et eau compris. On peut ainsi se retrouver avec une hauteur de référence projetée surestimée (moyenne non pondérée des hauteurs rivière + berges) qui peut dans certains cas provoquer la rupture du critère d'ambiguïté. S'il n'est pas correctement géré, ce phénomène apparaît même lors d'une référence parfaite.

4.7 Les erreurs de déroulement de phase

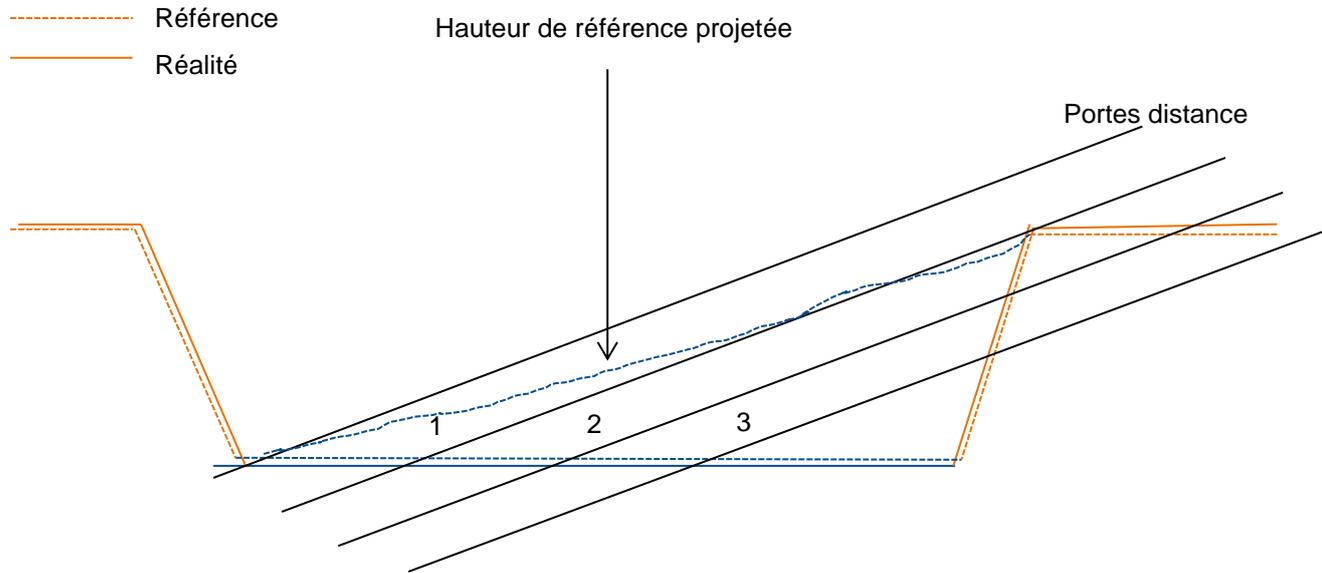


Figure 105 : Cas d'une référence confondue avec la réalité

Dans l'exemple suivant de la Figure 106, seule la hauteur de référence de l'eau a été surestimée (les berges sont constantes), ce qui est un cas assez classique pouvant se produire, car même avec une référence de bathymétrie précise, les niveaux d'eau peuvent varier. On observe que les pixels 1 et 2 « eau seule » sont associés à une référence « eau seule biaisée », qui dans le cas d'un biais faible que l'on suppose inférieur à la demi-hauteur d'ambiguïté ne pénalise pas la restitution.

Les pixels 3 et 4 sont dans un cas similaire : ils présentent du layover, que l'on suppose ne pas affecter fortement la phase en comparaison avec H_{amb} . Leurs pixels de référence associés présentent à la fois de l'eau (biaisée) plus du sol (encore plus haut) ce qui, si on considère une moyenne directe, aura pour effet d'accroître le biais réalité/référence.

Enfin, le pixel 5 (eau + layover) est associé uniquement à la berge sur la référence, augmentant de manière significative le risque de rupture, malgré le fait que seul le niveau d'eau de la référence a varié dans la géométrie sol. Ce phénomène est visible dans l'exemple de restitution de la Figure 102 et de la Figure 104, notamment près des berges des rivières, et se traduit par des erreurs de restitution sur les zones d'eau dont les berges présentent un fort écart topographique.

Ainsi, la condition à respecter sur l'altitude d'ambiguïté est plus contraignante qu'un simple biais de hauteur en géométrie sol. Il s'agit d'une condition en géométrie radar, après projection en géométrie SWOT. Elle est donc plus sensible, et fortement affectée par les variations topographiques.

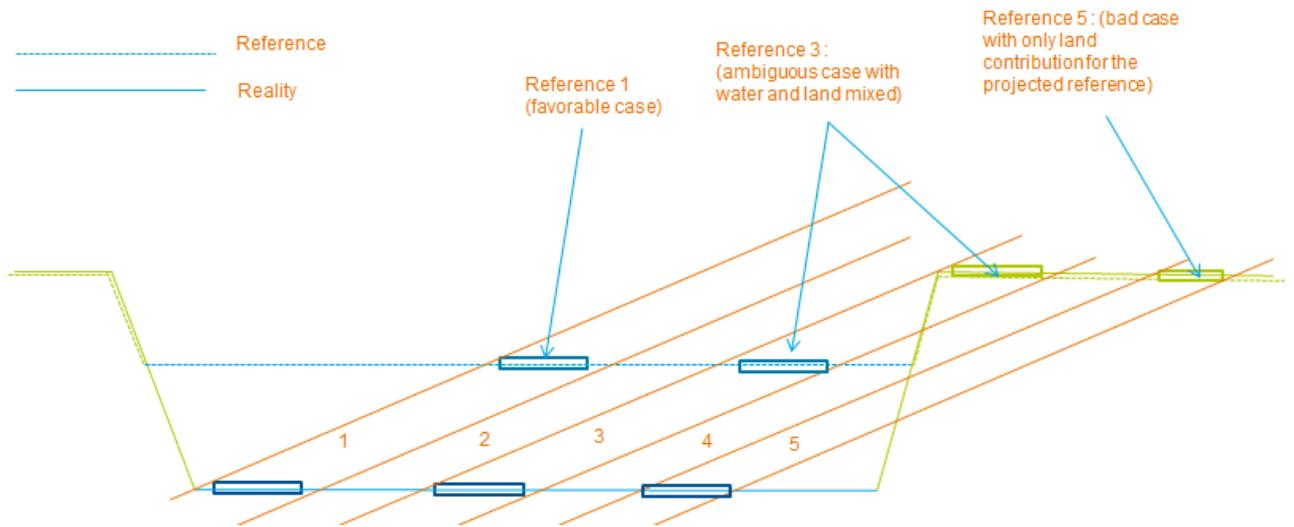


Figure 106 : Cas présentant un biais (faible) uniquement sur l'eau

4.7.2. EFFET COMBINÉ DU BRUIT THERMIQUE ET DES ERREURS DE MNT DE RÉFÉRENCE

Précédemment, on a pu voir que la condition de succès de la restitution était conditionnée par la qualité de la référence, celle-ci devant respecter le critère d'ambiguïté. Cependant, ce critère doit également tenir compte du bruit thermique, qui induit une erreur de phase qui n'est pas prise en compte dans le calcul de l'interférogramme de référence.

Dans un cas idéal, si la référence est parfaite, la phase différentielle est centrée en 0, avec un bruit aléatoire qui s'y ajoute. Ce bruit de phase crée alors un bruit de hauteur non biaisé (Figure 107). Cependant, si la référence n'est pas parfaite, le bruit de phase s'ajoute à une phase non centrée en 0, et peut éventuellement, sur les zones à faible radiométrie où l'erreur de phase est forte, entraîner une erreur ambiguë à moyenne non nulle. Cet effet est particulièrement dominant en fin de fauchée, là où la décorrélation due au bruit thermique affecte le plus la restitution de hauteur. Là où la taille des pixels (plus faible) permettait dans un cas non biaisé de compenser cet effet par le moyennage, on a une erreur importante dans le cas où le biais n'est pas centré en 0, le moyennage ne pouvant pas en réduire l'effet.

Pour diminuer les risques d'erreurs, il faut, en plus d'une bonne référence, réduire avant le traitement le bruit de phase, en effectuant par exemple une multivue de la phase interférométrique. Une autre possibilité pour réduire ces erreurs locales dues au bruit thermique est d'itérer les étapes d'inversion phase-hauteur après une première estimation réaliste de la hauteur établie. A partir de celle-ci, on inverse à nouveau la phase afin de réduire les erreurs de sauts de phase qui provoquaient ce biais de hauteur.

4.7 Les erreurs de déroulement de phase

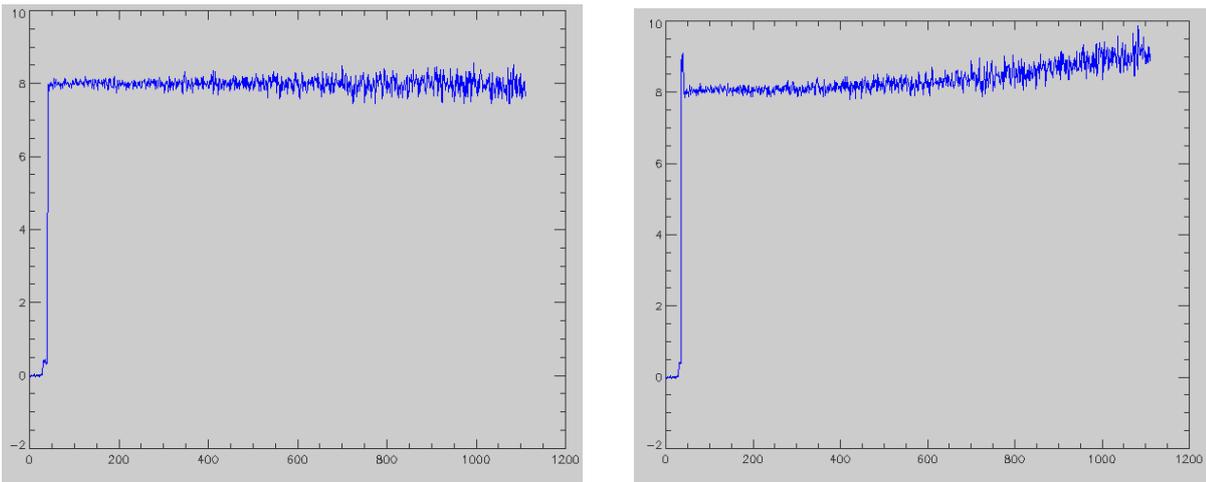


Figure 107 : Restitution de hauteur en fin de fauchée (moyennées en azimuth) avec une référence parfaite, puis une référence biaisée de 5m

4.8. AMELIORATION DES ALGORITHMES D'INVERSION

Dans cette section, nous allons étudier quelques méthodes à mettre en œuvre pour limiter et corriger une partie des erreurs de restitution observées lors de l'inversion phase-hauteur, en utilisant en particulier des données auxiliaires disponibles telles que les masques d'eau. Plusieurs options, le plus souvent complémentaires, sont présentées ici, par ordre de complexité.

4.8.1. PRISE EN COMPTE DU MASQUE D'EAU DETECTE

Une première approche consiste à utiliser le masque d'eau issu de la détection des surfaces d'eau lors du déroulement. En identifiant des structures d'eau bien définies où les pixels d'eau sont identifiés comme étant conjoints, on peut utiliser une hypothèse de planéité de la surface d'eau pour éviter de dérouler des pixels d'eau avec une hauteur polluée par des effets topographiques liés aux berges. Cela revient à artificiellement élargir l'étendue d'eau de référence. Cette méthode ne permet pas de corriger une estimation de hauteur d'eau de référence trop peu précise, mais limite l'impact des berges lors de la projection. Elle présente différentes limitations. D'une part les hypothèses utilisées peuvent être contraignantes à mettre en œuvre efficacement à cette étape du traitement, et peuvent éventuellement s'avérer fausses (erreurs sur le masque, cas de plusieurs surfaces d'eau à des hauteurs différentes, etc.). D'autre part, elles ne corrigent pas toutes les erreurs, en particulier si la référence utilisée est de mauvaise qualité.

4.8.2. PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE LA RADIOMETRIE DANS LA PROJECTION

Dans la section 4.7.1, nous avons vu que la non-prise en compte des contrastes radiométriques lors de la projection de la référence en géométrie radar et de la moyenne des points à considérer pour créer le pixel de référence, pouvait induire des erreurs importantes. Un des moyens pour corriger cet effet consiste à effectuer une projection adaptative. Celle-ci peut s'effectuer de différentes façons :

Lors de la projection du MNT de référence en géométrie SAR, il est possible de n'utiliser que les points les plus bas tombant dans la case radar, en supposant que ceux-ci représentent les pixels d'eau, tandis que les berges plus hautes, ne sont pas prises en compte dans le calcul. Pour cela, il faut soit définir un critère (par exemple une variation de hauteur maximum à l'intérieur du pixel radar de référence) pouvant être difficile à paramétrer automatiquement, soit considérer uniquement le point le plus bas ce qui peut être source d'erreurs si le MNT de référence présente des points anormaux.

Une autre façon de procéder consiste à se servir d'un masque de référence en entrée, qui serait associé au MNT de référence, afin de déterminer la nature des pixels que l'on moyenne, en conservant ainsi uniquement les facettes d'eau dans le cas de pixels « mélangés ». De cette façon, on simule en partie l'effet physique de la donnée où les contributions des berges sont fortement pondérées par leur faible radiométrie. La qualité du résultat de la méthode dépend de celle de la référence, en particulier de celle du masque. Un masque de référence de mauvaise qualité apporte une correction moins importante. Dans ce cas, l'utilisation des hauteurs des facettes les plus basses peut être plus favorable.

Toutes nos simulations de traitements présentées par la suite sont effectuées avec une projection de cette sorte, qui améliore notablement les effets de sauts de hauteurs sur les berges où les pixels mixtes sont très présents. Sur la Figure 108, on peut noter que le pixel de la colonne 300, initialement mal déroulé à cause d'un pixel de référence où les contributions eau et terre étaient prises en compte à parts égales, est restitué correctement après la modification consistant à prioriser les facettes d'eau.

Dans le cas de la Figure 106, cette méthode permettrait d'améliorer la qualité de restitution pour les pixels 2 et 3, dans lesquels, malgré le décalage, les pixels de référence contiennent en partie de l'eau. En revanche, le pixel 4, de par le décalage géométrique, ne contient dans sa référence que du sol, et n'est donc pas corrigé par cette méthode.

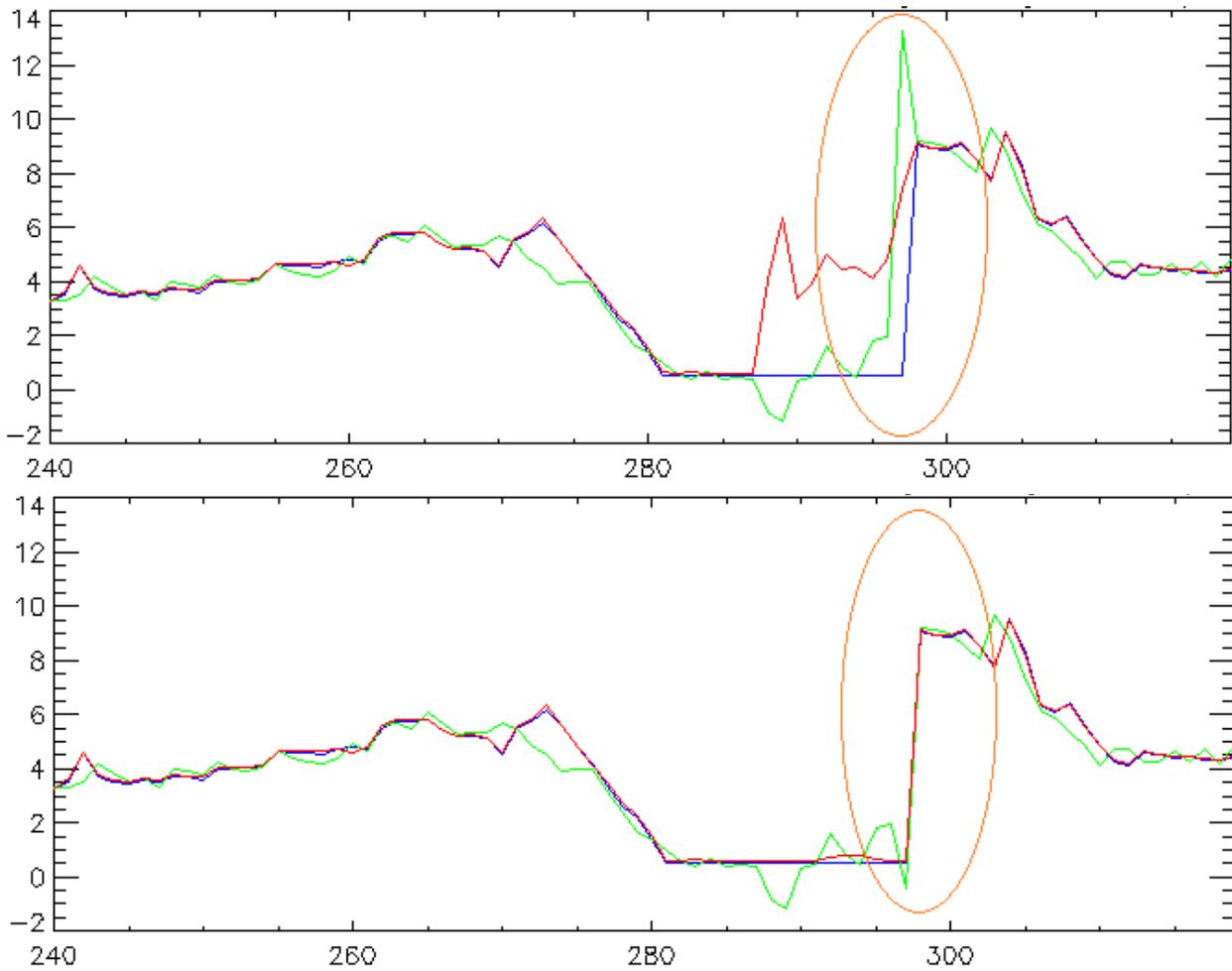


Figure 108 : Effet de la correction des pixels mélangés eau/terre

4.8.3. RECALAGE DE LA PROJECTION PAR CORRELATION DE MASQUES

Cette section présente une façon de corriger les biais de projection induit par les erreurs de hauteurs du MNT en utilisant les masques de référence et les masques d'eau extraits de l'image radar. Le principe est de projeter en géométrie radar le masque de référence associé au MNT de référence, puis de comparer ce masque avec le masque réel extrait de l'intensité de l'interférogramme (cf. 3.4.6). Ce traitement est appliqué par bloc, en divisant l'image de départ en plusieurs morceaux.

En corrélant les deux masques, on peut extraire un décalage dans la direction distance, qui est la source de plusieurs effets : l'erreur de géolocalisation de la référence, les différences de forme entre la référence et la réalité (étendues d'eau ayant variées, inondation, surfaces d'eau non présentes dans le masque de référence etc.), et surtout le décalage de géométrie induit par le biais de hauteur du MNT de référence. C'est ce dernier qui nous intéresse, par son effet sur le décalage, puisque comme vu dans le cas du layover, un décalage de 1 m peut induire un biais en distance de 100 m en proche nadir.

On obtient donc par cette méthode un décalage Δ_{tot} tel que :

$$\Delta_{tot} = \Delta_{x,y} + \Delta_{def} + \Delta_{proj(z)} \quad (133)$$

Avec $\Delta_{x,y}$ le décalage en géométrie sol entre le masque de référence et la réalité, Δ_{def} le décalage dû à une déformation de la scène entre la référence et l'acquisition (exemple : inondation) et Δ_{proj} le décalage lors de la projection liés à l'erreur de hauteur que l'on cherche à mesurer.

En supposant que le terme de projection est majoritaire, on peut quantifier le décalage issu de la projection (erreurs de hauteur se traduisant par un décalage distance) et corriger les produits projetés de cet effet, entraînant une meilleure superposition entre la référence et la réalité, et diminuer ainsi les risques de sauts de phase. Des tests sur différents cas simplifiés où seule la composante de biais de projection influe sur ce décalage, puis en ajoutant diverses perturbations, ont donné des résultats positifs. Pour poursuivre cette étude, il faut améliorer les outils de simulation, en particulier en étudiant une large variété de scènes avec des MNT réalistes et les références associées, et y associer des chaînes de traitement robustes permettant de prendre en compte tous ces effets. En particulier, le découpage adapté de la scène en blocs (Figure 109) permet d'assurer une correction de bonne qualité sur toute l'image. Ces blocs doivent être adaptés à la taille des structures d'eau, et surtout segmenter individuellement chacune d'elle de manière individuelle, sans mélanger deux étendues ne présentant pas la même hauteur.

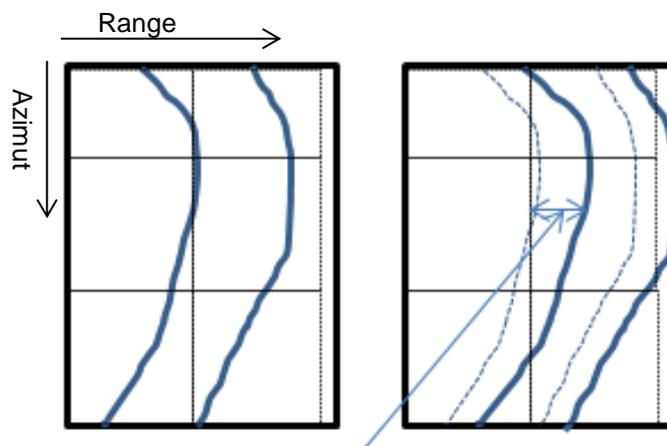


Figure 109 : Détermination par bloc du décalage entre masque d'eau détecté et masque d'eau de référence

Sur l'exemple de la Figure 110, on remarque que sur le profil, la restitution de hauteur est incorrecte, le MNT de référence utilisé étant trop éloigné de la réalité. Sur la Figure 111, après l'application de l'algorithme de correction, les différentes erreurs de déroulement sont corrigées et les hauteurs estimées correctes.

4.8 Amélioration des algorithmes d'inversion

MNT Réel: bleu, Altitude restituée: vert, MNT de ref: rouge – Ligne: 2087/8348

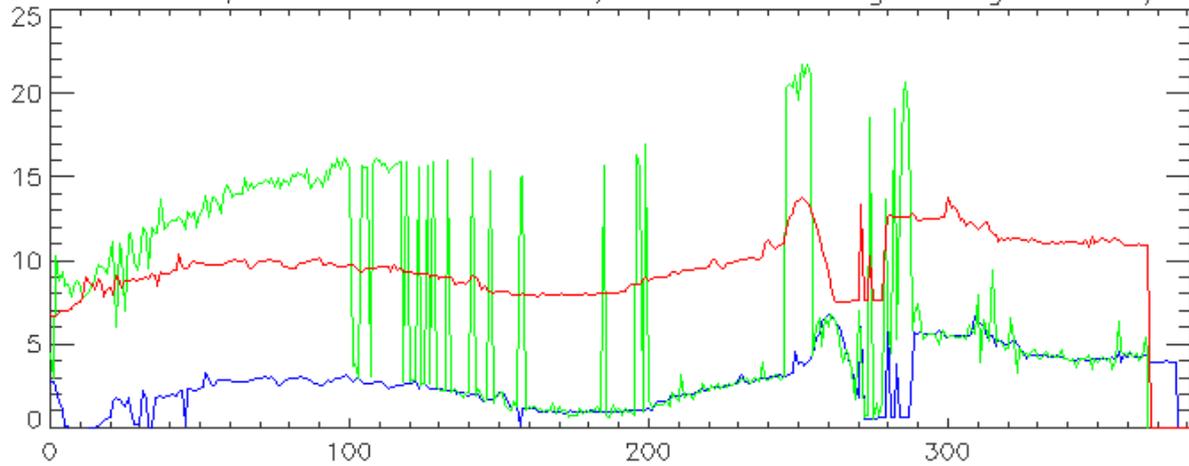


Figure 110 : Restitution des hauteurs avec un biais de 7m sur la référence

MNT Réel: bleu, Altitude restituée: vert, MNT de ref: rouge – Ligne: 2087/8348

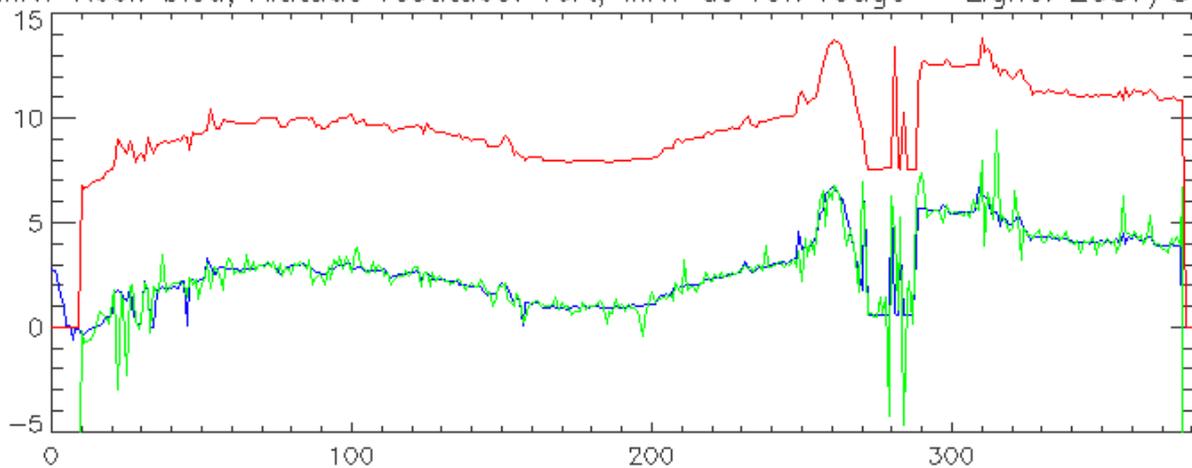


Figure 111 : Hauteurs restituées après correction par recalage des masques (cas simplifié : pas de bruit, MNT et masque bien géoréférencés, biais de hauteur de 7 m sur la référence)

De même, la Figure 112 montre sur une image de hauteur l'effet de la correction appliquée.

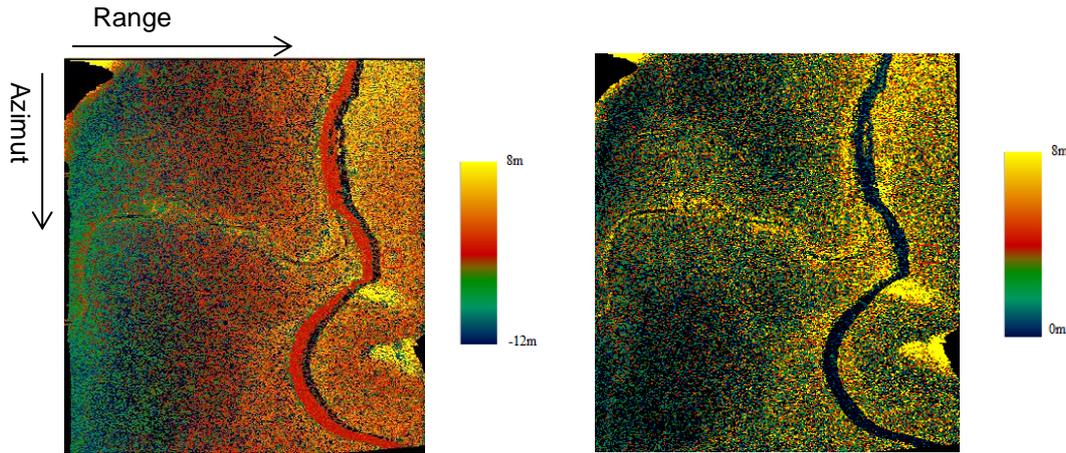


Figure 112 : Image des hauteurs restituées, avant et après recalibration, issue d'une simulation avec un MNT biaisé de 7m, à gauche l'image avant correction, à droite l'image après utilisation de la méthode des masques

Cette méthode présente des résultats prometteurs, permettant d'effectuer un déroulement de phase précis, dès lors que l'on dispose d'un masque de référence suffisamment réaliste de la zone traitée. Même si celui-ci est un peu décalé ou élargi, généralement la méthode fonctionne et améliore la qualité du déroulement. Toutefois, dans le cas d'importantes variations de niveaux d'eau, avec des cours d'eau qui sortent de leur lit, ou d'autres variations d'étendues d'eau importantes par rapport à la référence utilisée, il sera difficile de mettre en œuvre cette méthode. Un autre point positif est que l'amélioration du déroulement permet d'obtenir une phase différentielle plus proche de 0, y compris dans les cas qui ne présentaient pas d'erreur de sauts de phase. Cela se traduit par une réduction des erreurs liées au moyennage de phase, en particulier pour le traitement de multi-vue adaptatif.

Sur la Figure 113, un schéma présente la description des simulations mises en œuvre pour tester et valider les différentes méthodes décrites dans cette partie, en particulier l'inversion directe de la phase en hauteur et les différentes corrections utilisées pour améliorer les résultats obtenus.

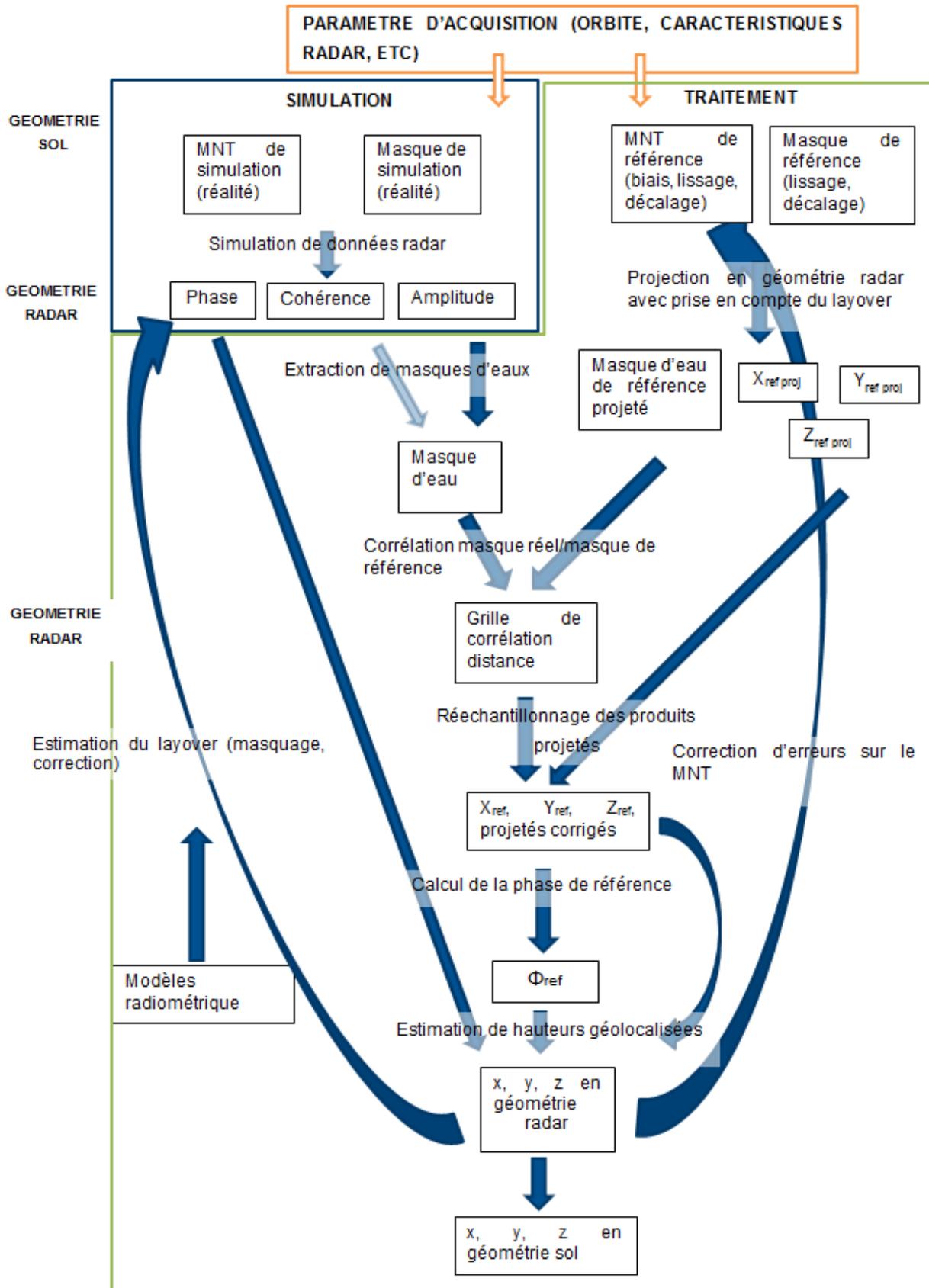


Figure 113 : Schéma récapitulatif de la méthode d'inversion directe et des corrections associées

4.8.4. UTILISATION DU GRADIENT DE HAUTEUR SUR LES ZONES PLATES

Dans le cadre d'une détection et correction automatique, on peut envisager de se servir de la variation de hauteur d'ambiguïté pour détecter les zones présentant des sauts de hauteurs, directement après l'inversion phase-hauteur. Avec un moyennage suffisamment fort pour diminuer fortement les effets de bruit, il est possible de calculer le gradient de hauteur le long de l'axe distance sur les zones étudiées. Dans le cas des zones recouvertes d'eau, on peut les supposer relativement planes, ou bien prendre en compte la pente suivant l'axe distance, à partir de données a priori sur le courant et de l'axe de la rivière. Avec une calibration correcte, on peut alors supposer que le gradient observé G est dû au saut d'altitude lors de la restitution. On a d'après (48):

$$H_{amb} = \frac{\lambda H \sin(\theta)}{B} = \frac{\lambda Y}{B} \quad (134)$$

Où Y est la distance au sol dans la directement range.

On a donc un gradient de hauteur d'ambiguïté le long de la fauchée qui vaut $\frac{\lambda}{B}$ soit environ 1 m/km. Ce gradient est supérieur d'environ un facteur 10 aux ordres de grandeur des pentes de rivières généralement observées, ce qui peut permettre de discriminer les deux effets. En estimant le nombre k tel que $G = k \frac{\lambda}{B}$, on peut corriger le MNT de référence ou sa projection en géométrie SAR, éventuellement localement suivant la résolution obtenue avec la méthode, puis refaire un cycle de restitution de hauteurs avec une référence ajustée. Cependant, cette méthode est envisageable de manière automatique seulement sur de grandes surfaces d'eau (dans la direction de la fauchée), tel des lacs, car elle est fortement sensible au bruit thermique.

Toutes les méthodes de correction vues précédemment peuvent être complétées par une correction directe du MNT. En effet, celui-ci peut être très éloigné de la réalité, avec la phase qui ne serait jamais déroulée correctement. Dans ce cas, afin de limiter les traitements systématiques, il est possible de corriger le MNT de référence. D'une part, après chaque passage, il est possible de mettre à jour la référence de manière à ce que celle-ci corresponde à la réalité du dernier passage, ce qui facilitera le déroulement des futures acquisitions. D'autre part, on peut aussi apporter des corrections à l'intérieur même du cycle de restitution, une fois que les hauteurs estimées se sont avérées fausses, dès lors que l'on arrive à identifier des pixels ou des zones aberrantes. Cependant, la correction directe et automatique des MNT de référence peut s'avérer extrêmement complexe en raison du large volume de données qui sera traité par SWOT.

5. GEOLOCALISATION AMELIOREE DES PRODUITS HYDROLOGIQUES KARIN/SWOT

Les produits obtenus après l'inversion phase-hauteur sont les hauteurs géolocalisées des différents pixels qui ont été identifiés comme étant de l'eau lors de la détection des surfaces d'eau. Très bruités, ces produits doivent être améliorés pour pouvoir en extraire les informations hydrologiques caractéristiques. Ce chapitre présente une approche de traitement visant à moyennner de manière réaliste les hauteurs pour fabriquer un produit exploitable.

5.1. PRODUITS HYDROLOGIQUES

Dans le cadre de la mission SWOT, plusieurs produits de niveau 2 sont prévus pour le mode HR. La liste des produits, extrait de [Cruz-2015] est présentée dans le Tableau 4. Le pixel cloud (Figure 114) est la représentation directe des hauteurs géolocalisées des points issus du masque d'eau détecté. La géolocalisation initialement très bruitée, il est difficilement exploitable par les scientifiques. A partir de celui-ci, des produits rivières (éventuellement vectorisés) ou des produits lacs sera dérivé selon les différentes natures des étendues d'eau détectées et segmentées (Figure 115). Ces produits présentent les caractéristiques hydrologiques des zones étudiées. Dans le cas d'une rivière, il s'agit des hauteurs, de la pente, du débit, de l'étendue, etc. Pour un lac, il s'agit de la hauteur moyenne et de son étendue. Un produit raster/image est également envisagé (Figure 116), en particulier dans le cas d'étendues d'eau difficiles à représenter de manière classique (zones humides, inondations, rivières, estuaires, etc.). Ce produit serait disponible selon les demandes des scientifiques étudiant une zone géographique particulière. D'autres produits haut niveau seront produits en synthétisant les acquisitions SWOT par cycle ou par mois, à la fois pour les rivières ou les lacs. En fin de mission, un MNT des zones inondées et une bathymétrie est également envisagée si les données le permettent.

Pour les rivières, on définit la notion de « tronçons », qui sont des portions de rivières, typiquement de l'ordre de la dizaine de kilomètres, sur lesquelles on peut calculer une pente linéaire réaliste.

Tableau 4: Liste des principaux produits finaux HR de SWOT

Data Product Short Name	Data Product Long Name (Up to 80 characters long)
LOA_HR_RAW	KaRIn high rate packets in downlink unit
LOB_HR_RAW	KaRIn high rate frames in half-swath scene
L1B_HR_SLC	KaRIn high rate single look complex data, in radar coordinates
L2_PIXC	KaRIn hydrology pixel cloud
L2_SP_RIVER	KaRIn single-pass river product
L2_SP_LAKE	KaRIn single-pass lake product
L2_CYC_RIVER	KaRIn cycle-averaged river product
L2_CYC_LAKE	KaRIn cycle-averaged lake product
N/A	Raster Image (in particular over Wetland) - on-demand product serviced by PO.DAAC & CNES

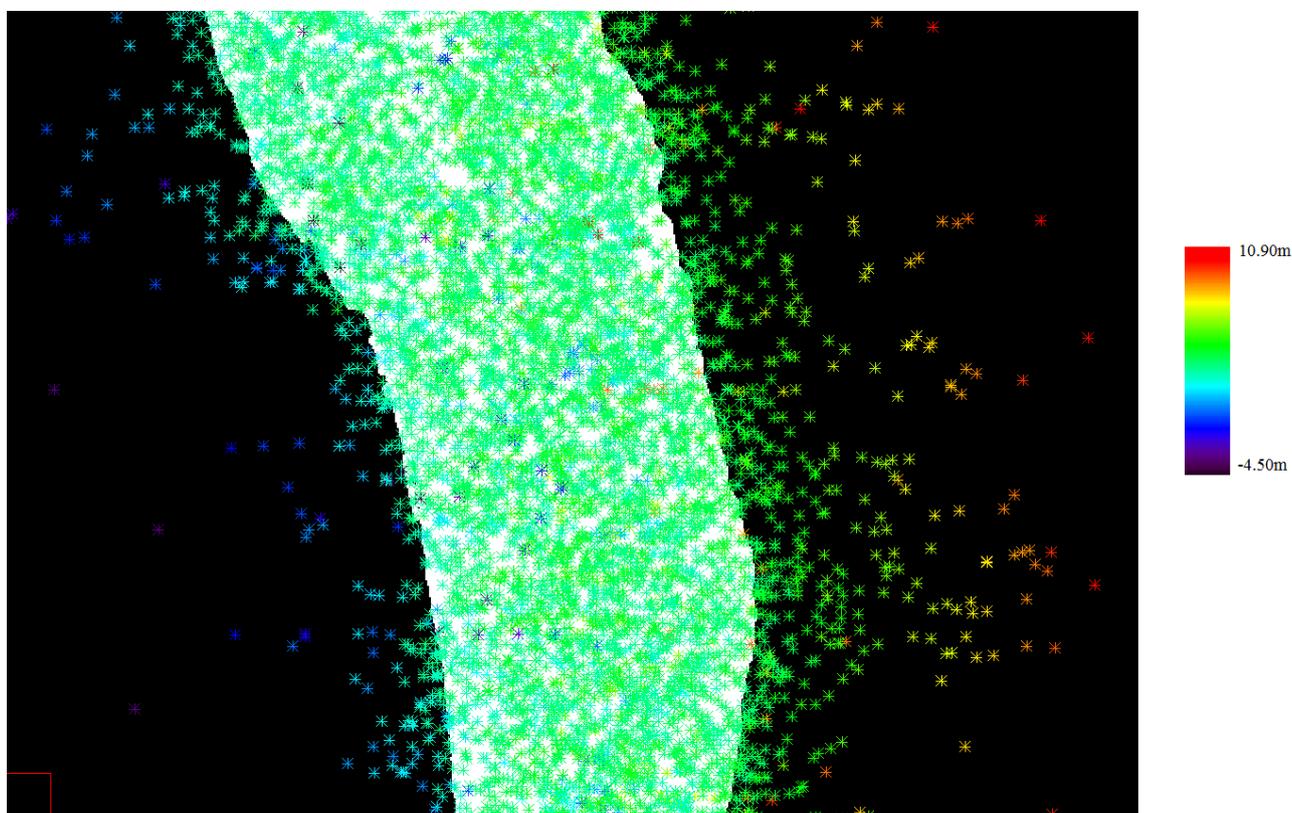


Figure 114 : Pixel cloud bruité issu d'une simulation sur la Camargue. La couleur correspond à la hauteur d'eau (bruitée en raison du fort bruit thermique)

5.1 Produits hydrologiques

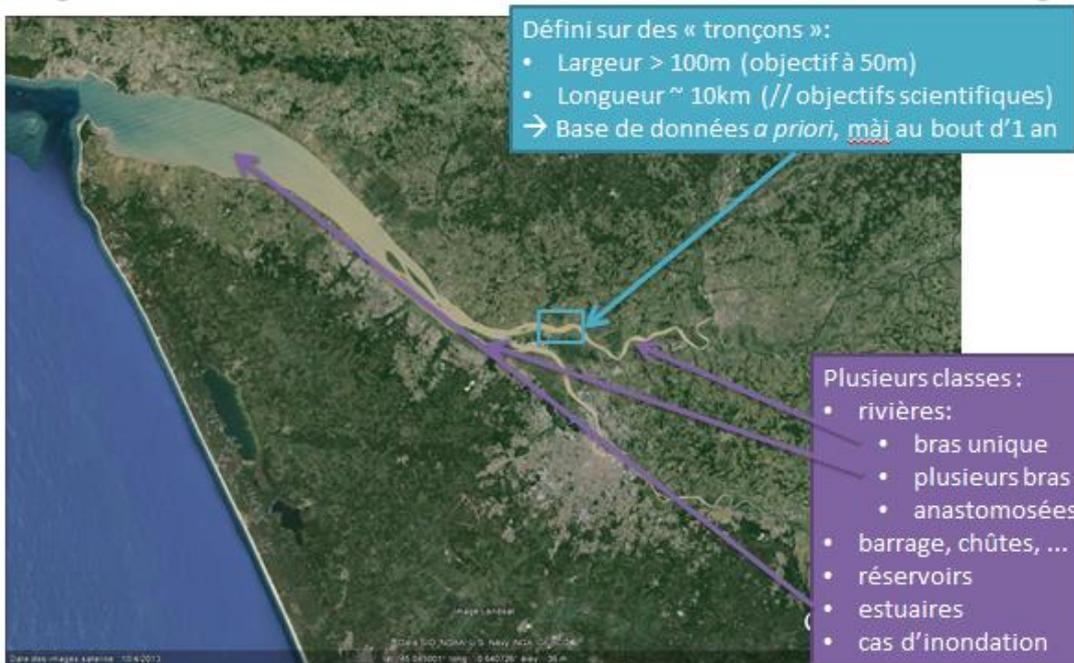


Figure 115 : Exemple de classes de produits rivière



Figure 116 : Cas d'une surface inondée : utilité de la représentation en fichier raster

5.2. LE PRODUIT PIXEL CLOUD

Le produit altimétrique appelé pixel cloud est une carte de hauteurs géolocalisées, en géométrie radar, des points préalablement identifiés comme étant de l'eau. Il s'agit du résultat de la détection des surfaces d'eau, de la conversion phase-hauteur, et des corrections géophysiques. En chaque point de cette carte, on dispose également d'informations auxiliaires, telles que les estimations d'erreurs, les flags de layover, les proportions statistiques d'eau dans le pixel, etc. Ce produit est très dense et contient une très large variété d'informations. Le pixel cloud peut être à différents niveaux :

- Brut (monovue)
- 4 vues (après un traitement multi-vue azimut)
- ~ 50 vues (après le traitement multi-vue et le moyennage adaptatif de la phase) → baseline actuelle
- Géolocalisation améliorée (étudiée dans ce chapitre)

Avant de pouvoir générer les produits finaux vectoriels, on peut utiliser une représentation dite en nuage de points qui consiste à positionner sur une carte en latitude/longitude chacun des points contenant nos informations. On obtient alors une représentation graphique de la localisation de nos points d'eau, auxquels on peut associer à chacun l'information souhaitée (Figure 117). Comme chaque point représente un pixel de l'image radar, on utilise dans le cadre de SWOT le terme « pixel-cloud ».

5.2 Le produit pixel cloud

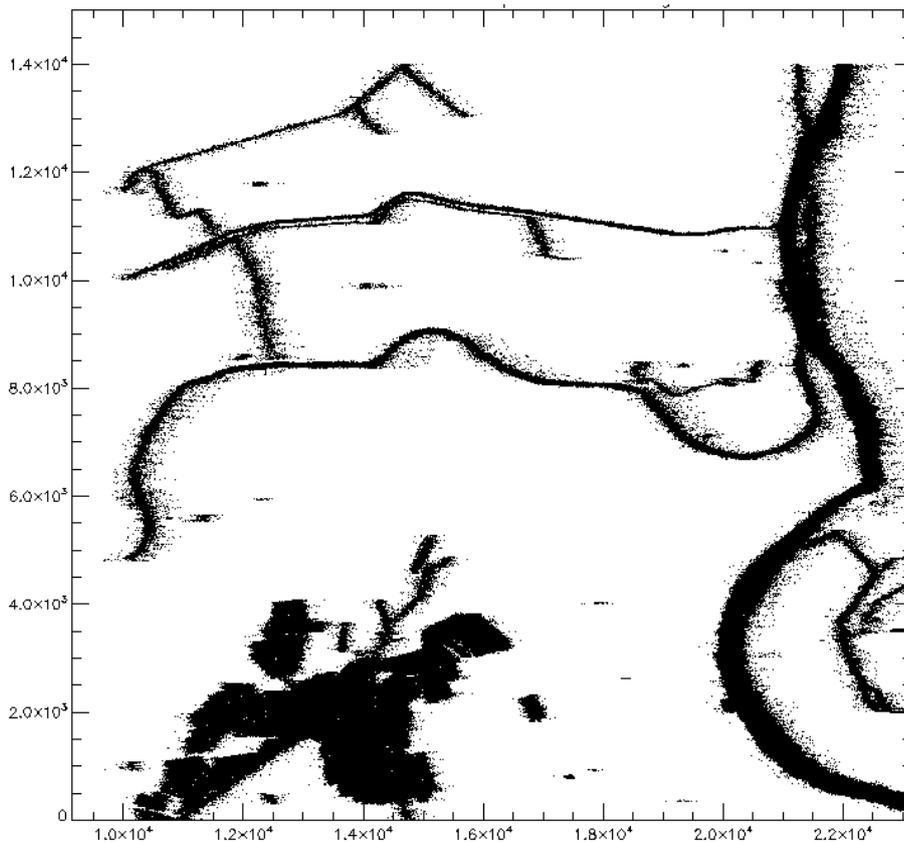


Figure 117 : Pixel cloud brut sur la région de la Camargue (monovue)

La principale difficulté réside ici dans le caractère très bruité de la géolocalisation obtenue par l'inversion phase-hauteur, en particulier à cause du bruit de phase lié au bruit thermique. Ainsi, dans le cas d'une erreur de hauteur métrique au near-range, on peut avoir des erreurs de géolocalisation d'une centaine de mètres. Le produit « pixel cloud » directement issu de la conversion phase-hauteur suffisamment moyenné pour atteindre les performances spécifiées de SWOT, à la fois en précision altimétrique et en géolocalisation. Avant la détection de surfaces d'eau, on a pu procéder à un traitement multi-vue azimuth (facteur 4) des images. Une fois la détection effectuée, on peut procéder à un moyennage supplémentaire de la phase avec une fenêtre adaptative (typiquement 3x3 ou 5x5) afin d'en réduire le bruit avant la conversion phase-hauteur. Mais c'est seulement après agrégation massive des hauteurs géolocalisées des pixels d'eau qu'on peut atteindre les performances souhaitées pour SWOT.

Il faut ainsi être capable de générer des produits rivières ou lacs à partir de cette représentation « pixel cloud », afin de pouvoir effectuer une moyenne réaliste des différentes caractéristiques que l'on souhaite mesurer. Les difficultés principales résident alors dans les petits réseaux, difficilement identifiables, ainsi que dans les zones d'eau séparées mais proches les unes des autres, et qui auront tendance à se mélanger dans le nuage de points, en raison des erreurs de géolocalisation.

Dans cette représentation, les points identifiés en layover sont conservés, mais leur hauteur n'est pas utilisée lors des estimations de hauteur moyenne ou de pente.

La représentation suivante sur la Figure 118 est issue d'une simulation sur la Camargue avec un σ_0 de 10dB sur la rivière. L'étendue en bleu foncé représente le masque eau initial utilisé lors de la simulation. Les points sont les différents pixels d'eau restitués après le traitement radar et l'estimation de hauteurs géolocalisées.

La localisation des pixels dépend directement de leur hauteur. Les pixels ayant une hauteur restituée trop haute sont localisés à droite de l'image : ces points sont ceux dont le bruit de phase biaise la hauteur vers le haut, ainsi que ceux dont la pollution par le layover entraîne un biais de hauteur positif. A gauche, on a au contraire les points de hauteurs trop faibles, essentiellement dues au bruit thermique dans notre simulation. On remarque également dans cet exemple la difficulté à produire des hauteurs moyennes, une pente, et une détermination précise de l'étendue, à partir des données aussi bruitées.

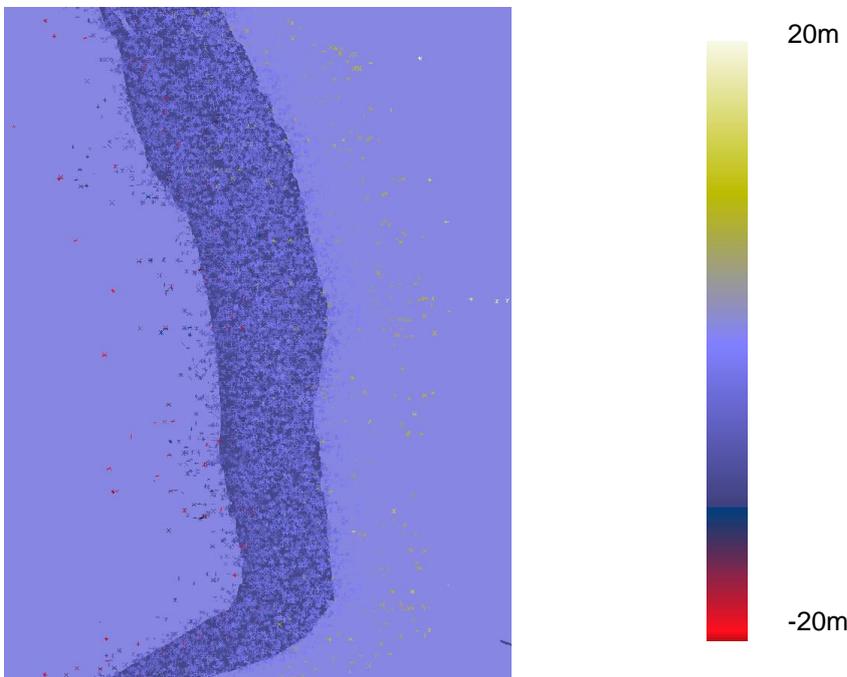


Figure 118 : Pixel cloud sur un extrait d'une simulation sur la Camargue

5.3. MOYENNE DES PHASES – MOYENNE DES HAUTEURS

Un simple moyennage azimut, typiquement d'un facteur 4, avant la détection des surfaces d'eau, n'est pas suffisant pour atteindre les performances voulues en termes de géolocalisation. Pour atteindre les performances souhaitées en hauteur, il faut également moyenner sur une large surface pour atteindre les spécifications scientifiques. La question qui se pose est à quel moment effectuer ce moyennage. Une fois l'étape de détection des surfaces d'eau réalisée, il est possible de moyenner la phase différentielle, ou bien les produits de hauteurs finaux, après l'inversion phase-hauteur. La relation non linéaire issues de (110) et (111) liant la phase aux hauteurs peut être approximée par :

5.3 Moyenne des phases – moyenne des hauteurs

$$h = H - R\left(1 - \left(\frac{\varphi}{kB}\right)^2\right) \quad (135)$$

Où h est la hauteur d'eau, H la hauteur du satellite, R la distance radar, φ la phase interférométrique, B la base et k le nombre d'onde

Cette relation non linéaire crée une performance légèrement meilleure d'un moyennage de phase vis-à-vis d'un moyennage de hauteurs a posteriori [Will-2015]. Il est donc préférable d'effectuer un moyennage de phase adaptatif sur les interférogrammes différentiels. Cependant, plusieurs contraintes apparaissent. D'une part, ce moyennage de phase provoque un risque de biais, dès que la phase différentielle moyennée n'est pas plate (cf. 4.5.3.2). Ceci peut être en partie corrigé avec des algorithmes de filtrage adaptés comme NL-SAR [Dela-2013]. D'autre part, les erreurs de détection des surfaces d'eau induisent également des erreurs de phase pouvant affecter fortement cette moyenne adaptative. Enfin, la structure même des rivières, pouvant être très fines, peut rendre cette moyenne des phases difficile. Au niveau de la géolocalisation, la relation phase-géolocalisation peut être approximée comme étant linéaire :

$$X = \frac{R}{kB} \varphi \quad (136)$$

avec X géolocalisation suivant l'axe distance

Cependant, une bonne géolocalisation, de l'ordre de la fraction de la taille du pixel radar (par exemple 10%), nécessite une moyenne de phase excessivement importante. Celle-ci crée une erreur sur les hauteurs et introduit un biais dans l'estimation de ces dernières et risque d'effacer de la topographie que les hydrologues souhaitent étudier. Pour la communauté scientifique, la priorité est d'assurer la meilleure précision possible sur les hauteurs d'eau et les pentes, la précision en termes de géolocalisation étant moins prioritaire.

5.4. METHODES DE GENERATION DE PRODUITS GEOLOCALISES MOYENNES

Une approche consiste à découpler géolocalisation et hauteur permet de concilier une géolocalisation correcte avec une bonne précision des hauteurs, sans pollution liée à une forte moyenne de phase. Avec cette approche, on effectue une certaine moyenne de phase pour la hauteur, relativement limitée pour éviter les biais de hauteur, et on effectue une seconde moyenne de phase, cette fois dans le but de géolocaliser correctement les points, certes avec un biais, mais qui est beaucoup moins pénalisant que dans le cas des hauteurs. Ceci revient à découpler pour chaque pixel radar la hauteur de sa géolocalisation, afin d'avoir le

produit le plus propre possible en terme de hauteur, tout en ayant une géolocalisation permettant d'estimer correctement l'étendue. Différentes méthodes sont proposées afin de résoudre ce problème de géolocalisation.

Dans la méthode présentée ici, la hauteur de chaque pixel est laissée à son état le plus « brut » possible, avec une moyenne la plus limitée possible. En revanche, la géolocalisation est fortement contrainte, à partir d'hypothèses sur la nature des surfaces observées.

L'hypothèse utilisée est que les étendues d'eau observée sont relativement plates (cas d'un lac) ou présentent une pente relativement régulière (tronçons de rivières). L'idée présentée ici est d'utiliser ces caractéristiques pour obtenir une géolocalisation améliorée, qui s'affranchit fortement des erreurs dues au bruit thermique, en utilisant directement l'image du masque en géométrie radar. L'objectif est de forcer la connexité des pixels issus du masque d'eau, en utilisant les caractéristiques de l'image radar et l'hypothèse de surface plate ou à pente régulière. De cette façon, on s'affranchit en grande partie des effets du bruit thermique sur la géolocalisation finale du produit, au prix de plusieurs approximations à considérer qui seront décrites par la suite. A partir d'une hauteur moyennée obtenue pour l'élément du masque d'eau considéré, on peut géolocaliser les pixels radar à partir de ces 3 équations, en supposant un Doppler Centroïde de restitution nul :

$$R^2 = (x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2 \quad (137)$$

$$V_{sx}(x_s - x) + V_{sy}(y_s - y) + V_{sz}(z_s - z) = 0 \quad (138)$$

$$\frac{(x^2 + y^2)}{(R_e + h)^2} + \frac{z^2}{R_p^2} = 1 \quad (139)$$

Où h est la hauteur d'eau moyenne obtenue par moyennage massif.

Plus généralement, la méthode consiste en différentes étapes :

- Division du masque d'eau en différentes zones partageant des caractéristiques de hauteurs communes
- Moyenne massive des hauteurs (avec ou non prise en compte des pentes)
- Géolocalisation directe des points du masque à partir du couple hauteur moyenne / position sur la grille radar

La première étape est de parvenir à discriminer dans le masque d'eau les différentes structures d'eau à traiter. En effet, chaque étendue d'eau dispose de ces caractéristiques propres de hauteurs (hauteur moyenne et pente), et il convient de les considérer séparément. Pour cela, une base de données hydrologiques des lacs et des rivières est en cours de réalisation, afin de servir de guide à l'identification des

5.4 Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés

différentes surfaces d'eau. Une fois les éléments discriminés, plusieurs approches sont possibles, fortement dépendantes de la nature de la surface étudiée. On peut diviser ces dernières en 3 catégories :

- Les petits lacs
- Les rivières
- Les grands lacs

Dans le cas de l'identification de ces structures d'eau, des erreurs peuvent se produire lors de la séparation des étendues d'eau. Cette image étant une image en distance, il est possible parfois de confondre deux cours d'eau proches d'altitude différentes comme constituant une seule surface d'eau. Dans ce cas, on produit une erreur globale lors de l'estimation des moyennes, puis de la géolocalisation.

5.4.1. UTILISATION POUR DES PETITS LACS

Nous allons maintenant décrire un cas simplifié où l'on peut voir certains de ces effets. Il s'agit d'une zone de marais composée de plusieurs surfaces d'eau disjointes. Dans ce cas, la surface totale a été considérée pour obtenir une hauteur moyenne à partir de laquelle la géolocalisation est estimée. Cette méthode est adaptée aux petits lacs, dans le cas où ceux-ci sont clairement discriminés.

Sur la Figure 119, les « vraies » zones d'eau sont en rouge (masque de simulation utilisé) et les points blancs sont ceux issus du pixel cloud. L'image est très bruitée et à la fois le moyennage des hauteurs et l'estimation des étendues s'avèrent difficiles dans cette représentation. Sur la Figure 120, on observe en blanc, la géolocalisation des pixels du masque détecté par la méthode de moyenne directe. Ces derniers sont alignés en colonnes en raison des hypothèses de calcul sur la grille radar, qui regroupe tous les pixels appartenant à une même cellule de résolution distance. Les points cyans sont ceux qui ne sont pas correctement géolocalisés. La moyenne effectuée ne discriminant pas correctement les lacs entre eux à partir du masque, on note des erreurs de géolocalisation sur certains marais. Les hauteurs des différentes surfaces étant différentes, on observe des erreurs de géolocalisation sur celles d'entre elles dont la véritable hauteur moyenne diffère trop de la hauteur moyenne estimée. Dans ce cas, il faut discriminer les zones d'eau et les attribuer aux différents objets de la base de données, pour pouvoir les traiter séparément.

On voit donc ici la nécessité d'une bonne discrimination de chaque élément d'eau pour parvenir à une estimation correcte à la fois des hauteurs d'eau et de la géolocalisation associée.

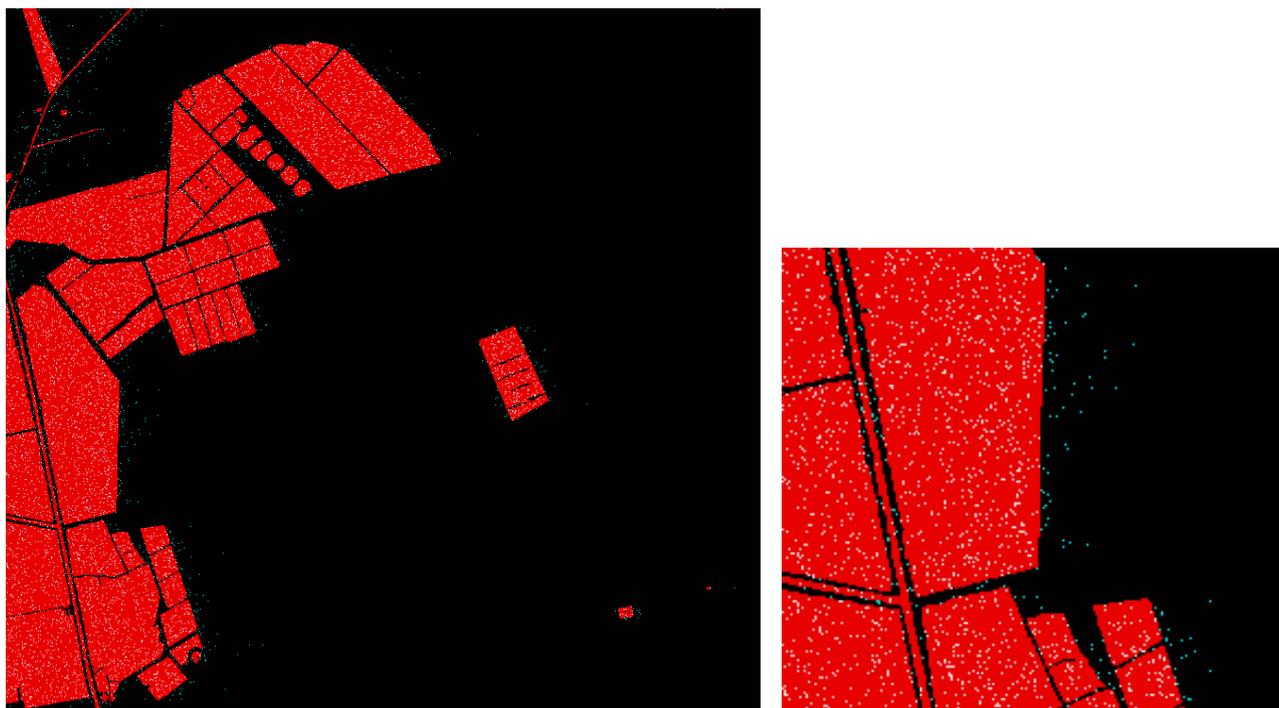


Figure 119 : Extrait d'un "pixel cloud" brut. En rouge : masque de simulation en entrée, en blanc : pixels d'eau géolocalisés après traitement complet. A gauche, la zone de marais étudiée et à droite un zoom.

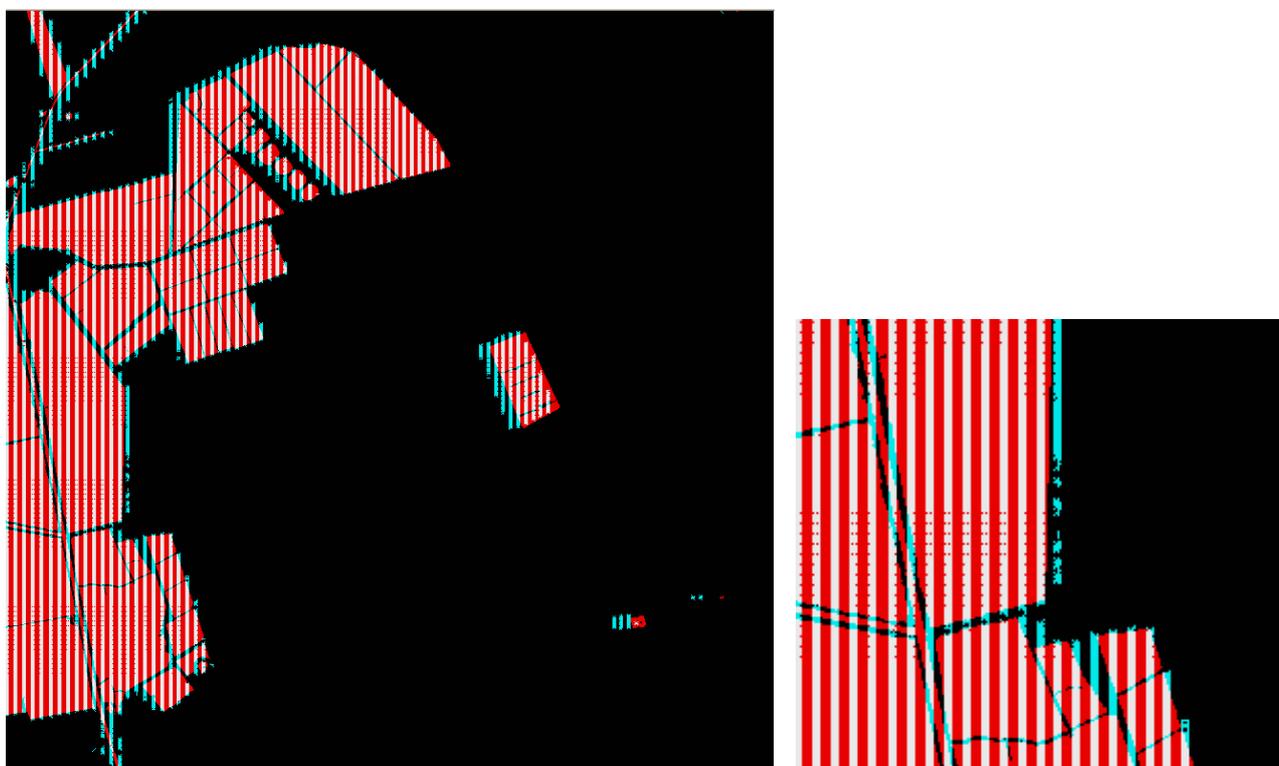


Figure 120 : Image de géolocalisation obtenue à partir de la méthode proposée simplifiée. En rouge : masque de simulation en entrée, en blanc : pixels d'eau géolocalisés après traitement complet. A gauche, la zone de marais étudiée et à droite un zoom.

5.4 Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés

Dans l'exemple suivant, nous allons étudier plus précisément la méthode dans le cas d'une rivière. La zone sélectionnée est le Rhône, près d'Arles, et le masque d'eau est supposé ici parfaitement connu. Attention toutefois, le masque d'eau considère ici tous les « pixels mixtes eau/terre » comme des pixels d'eau, ce qui a tendance à provoquer une légère surestimation de l'étendue d'eau.

Dans un premier temps, nous pouvons observer sur la Figure 121 ce qui se passe si l'algorithme utilisé ne prend pas en compte la pente :

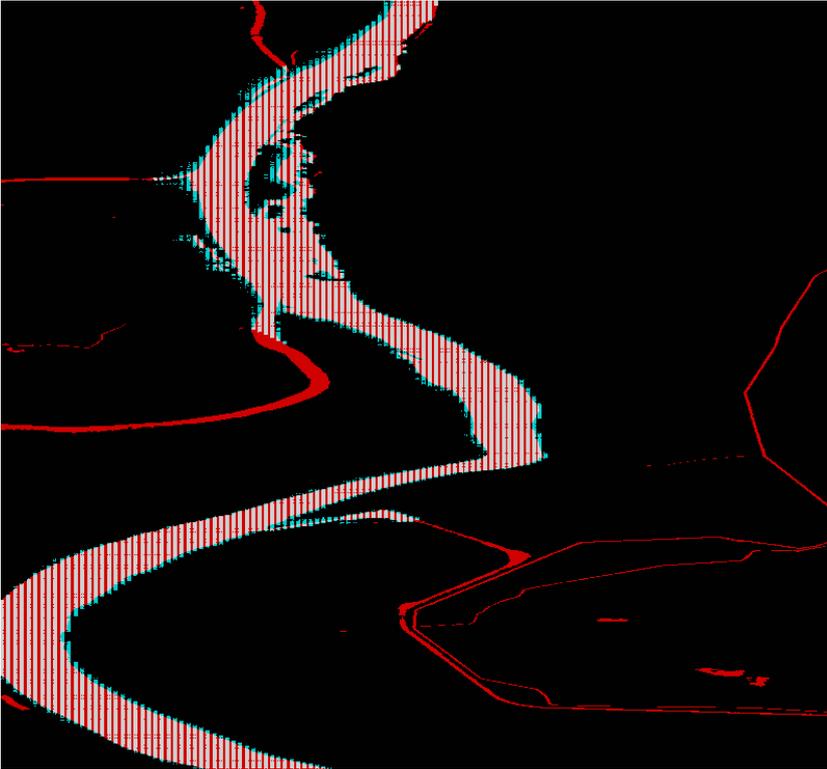


Figure 121 : Image de géolocalisation obtenue à partir de la méthode de géolocalisation simplifiée. En rouge : masque de simulation en entrée, en blanc : pixels d'eau géolocalisés après traitement complet. En cyan : pixels d'eau avec une géolocalisation erronée (hors du masque d'eau de simulation)

La rivière sélectionnée est principalement orientée dans l'axe azimut de l'acquisition, et fait approximativement 15 km de long. Seule une partie du masque d'eau a été sélectionnée, ce qui correspondrait à une segmentation de la rivière en plusieurs tronçons traités séparément. La valeur moyenne des hauteurs d'eau estimée à partir des hauteurs restituées par interférométrie est de 0.56 m. La hauteur moyenne d'eau donnée par la réalité terrain en entrée de la simulation est de 0.49 m.

L'erreur est principalement due à la pollution du layover, qui provoque une surestimation de la hauteur d'eau. L'effet du layover dans le calcul de la hauteur d'eau moyenne est réduit en utilisant un filtre de seuillage basé sur la cohérence, afin de ne pas sélectionner les points trop pollués. En appliquant un seuil de 0.7, on atteint une estimation de hauteur de 0.54 m. Cependant, la composante principale affectant la cohérence est le bruit thermique. L'effet du layover est donc fortement noyé dans le bruit induit par celui-ci,

et donc difficile à retirer correctement. De plus, lors du filtrage des points pollués, la réduction du nombre de points pris en compte dans la moyenne entraîne une diminution de la précision de la mesure après moyennage. Il faut donc avoir un compromis entre pollution du layover et nombre de points à utiliser lors de la moyenne, sous peine d'augmenter l'incertitude de la mesure finale. En utilisant un masque de layover parfait estimé à partir du MNT (cf. section 4.6.4.1.2), on arrive à une hauteur moyenne de 0.56 m, tout en minimisant le nombre de points retirés pour le moyennage.

Un autre effet important vient de la non prise en compte de la pente de la rivière. Si l'on observe plus précisément celle-ci, on remarque que les niveaux d'eau varient de 1.20 m à 0.20 m le long de l'image (de haut en bas). Ainsi, pour une valeur moyenne globale de 0.56m sur toute la rivière, on commet une erreur de plusieurs dizaines de centimètres sur la hauteur moyenne. Ceci entraîne alors des erreurs sur la géolocalisation, de la même façon que pour les marais présentés auparavant. Cet effet est visible sur nos résultats. En haut de l'image, là où notre estimation sous-estime la hauteur, on observe un décalage en direction du near-range (à gauche), tandis qu'en bas de l'image, là où l'on surestime la hauteur, c'est l'effet contraire. Le phénomène de couplage hauteur/géolocalisation est le même ici que celui présenté dans la section 4.5.3.

Dans le paragraphe suivant, une autre méthode, plus robuste, prenant en compte les pentes, et capable de généralisation est proposée.

5.4.2. METHODE DE GEOLOCALISATION AMELIOREE DES COURS D'EAU

Cette méthode s'inspire des tests réalisés précédemment. Le masque d'eau donne la position en géométrie SAR des pixels d'eau à géolocaliser, le traitement de restitution de hauteurs donne des hauteurs d'eau très bruitées. A noter que l'estimation de hauteurs est ici supposée correcte, les erreurs de déroulement ayant été corrigées précédemment. En associant directement hauteur et géométrie SAR, on obtient la géolocalisation « brute », bruitée, sous forme d'un pixel cloud. On souhaite réduire fortement l'écart type de la hauteur, afin d'obtenir un profil de hauteur débruité le long de la rivière, qui servira ensuite à géolocaliser le masque d'eau. L'image SAR n'est pas en géométrie sol, ce qui rend l'estimation des pentes et le moyennage des hauteurs le long de la rivière plus difficile. L'hypothèse faite ici est que le calcul de profil de hauteur moyenné le long de la rivière est peu sensible aux erreurs de géolocalisation, ce qui a été vérifié sur les tests. Ainsi, une pré-géolocalisation grossière de la rivière va suffire comme base pour agréger les hauteurs d'eau de manière réaliste, permettant la réalisation du profil de hauteur le long de la rivière et l'estimation de la pente.

- a) A partir du masque d'eau extrait des données SWOT (cf. 3.4.6), on segmente le masque d'eau en différents éléments à traiter. Ces éléments peuvent être divisés en trois catégories : lacs, rivières, et autres. Pour cela, on peut employer la géolocalisation imprécise en sortie du traitement de conversion phase-hauteur, couplée à la base de données hydrologique nous renseignant sur la

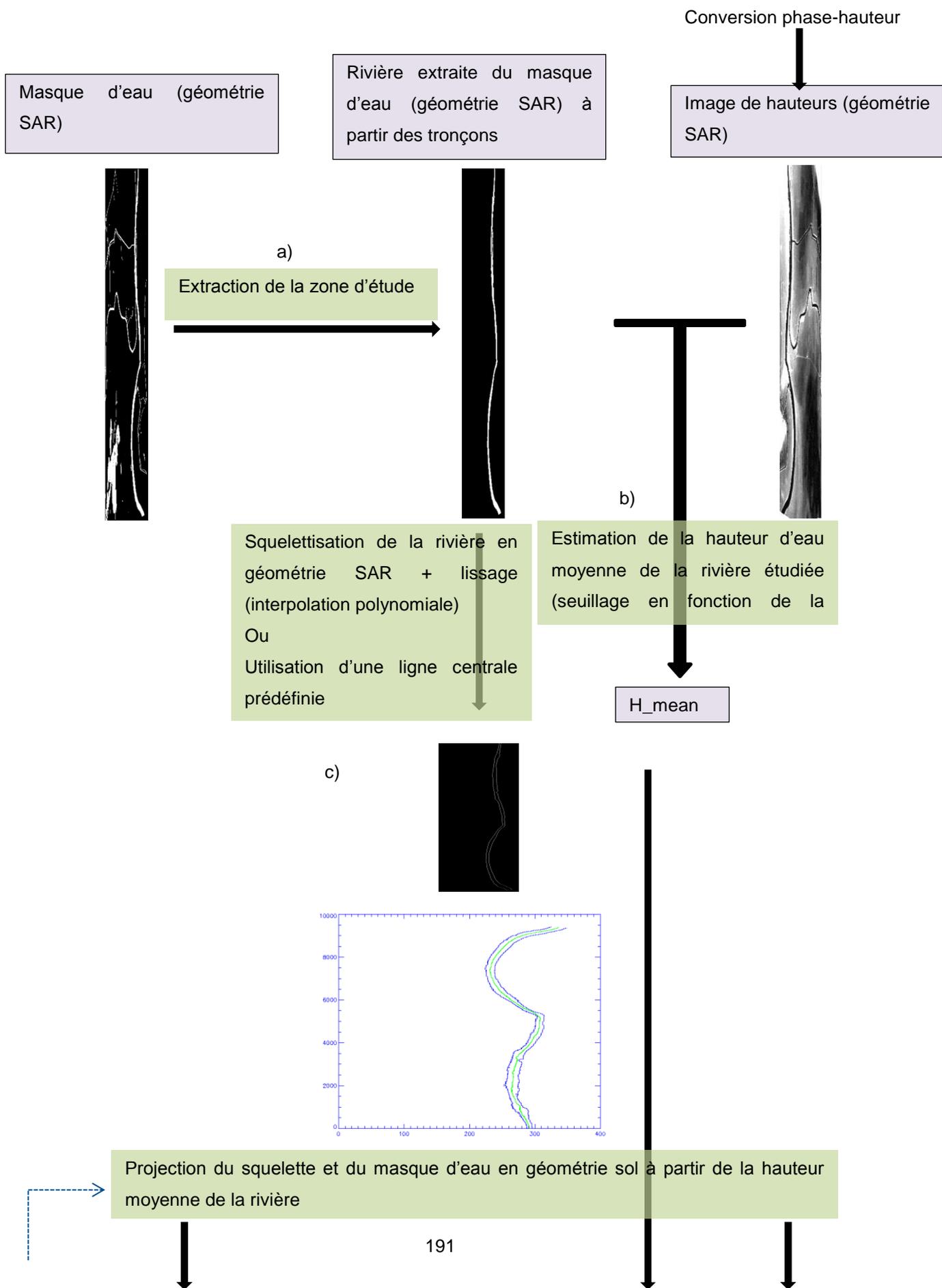
5.4 Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés

présence et les types de structures d'eau présentes. Dans le cas des rivières, les tronçons doivent être des segments continus de la rivière, sur lesquels les calculs de pente ont du sens. Les éléments « autres » sont ceux qui ne sont pas présents dans la base de données, et qu'il faut donc traiter sans connaissance a priori, et qui pourront ensuite enrichir la base de données. La suite des étapes décrit le traitement spécifique dans le cas des rivières, qui sont les éléments les plus complexes à géolocaliser. Dans le cadre de la mission SWOT, une base de données mondiale comprenant les lacs connus à ce jour et les rivières découpées en tronçons est en cours de réalisation, afin de servir de support à la mission.

- b) Une fois la zone sélectionnée sur le masque, on calcule une hauteur d'eau moyenne à partir des points masqués, en utilisant l'image de hauteurs produite par l'inversion de la phase. Lors de cette étape, il peut être intéressant de prendre en compte seulement les hauteurs les plus pertinentes, c'est-à-dire celles ne présentant pas de layover par exemple. En première approximation, un seuillage sur la cohérence est effectué pour déterminer les points participant au moyennage. La meilleure option est d'utiliser le masque de layover calculé précédemment à partir d'une prédiction géométrique (cf. 4.6.4).
- c) L'étape suivante consiste à obtenir un segment central de la rivière, qui servira de base pour agréger les hauteurs le long de la rivière et y estimer un profil de hauteur et une pente. Cette étape peut se dérouler de différentes façons, avec ou sans l'intervention de données auxiliaires. Si la ligne centrale de la rivière est disponible dans la base de données, il est possible de s'en servir comme segment central de la rivière. Dans notre cas, la méthode se base sur le calcul d'un squelette central de la rivière projeté dans la géométrie SAR. Différentes méthodes de squelettisation ont été développées [Loho-2001]. Dans notre cas, une méthode a été mise en œuvre à partir des contours du masque d'eau. On sépare selon les tronçons les contours des deux rives de rivière et on moyenne ensemble celles-ci pour obtenir le fil central (squelettisation). Ce profil est ensuite projeté en géométrie sol à partir de la hauteur moyenne estimée, ce qui va induire des erreurs et des déformations, en raison des effets de pente négligés (cf. Equations (137) à (139)). Toutefois, ces erreurs ont un effet faible sur la suite du traitement, ce squelette ne servant que de profil de base pour agréger de manière réaliste nos hauteurs. On projette également les points du masque d'eau dans la géométrie sol en utilisant la même hauteur moyenne.
- d) Le profil de la ligne centrale en géométrie sol ainsi obtenu est divisé en nœuds de coordonnées lat/long. L'espacement utilisé dépend de la complexité de la forme de la rivière. Pour les tests effectués, un pas de 20 m a été défini entre chaque nœud. On calcule ensuite pour chaque point du masque, également projeté dans une géométrie sol approximative, à quel nœud de la rivière celui-ci appartient. Pour cela, on calcule la distance de chaque point au nœud, et on sélectionne le nœud le plus proche. Chaque point du masque sera alors associé à un des nœuds du profil central de la rivière.

- e) On procède ensuite à un nouveau moyennage des hauteurs, mais cette fois suivant leur appartenance aux nœuds, ce qui va créer non pas une hauteur moyenne, mais un profil de hauteur le long du lit de la rivière. Ce profil est ensuite linéarisé pour donner la pente et la hauteur moyenne le long de la rivière. Suivant la connaissance des caractéristiques du tronçon, la linéarisation peut être modifiée pour prendre en compte des formes de pentes plus complexes. Durant cette étape, on ne moyenne que les hauteurs au-dessus d'un certain niveau de cohérence, ou si un masque réaliste de layover est disponible, on exclue les zones identifiées comme trop contaminées.
- f) Finalement, on recalcule la géolocalisation de chaque point du masque d'eau (y compris ceux exclus lors du moyennage des hauteurs), non pas en fonction d'une hauteur moyenne, mais en fonction du profil de hauteur le long de la ligne centrale (nœud).
- g) On peut éventuellement réitérer ensuite à partir de l'étape c, en projetant à nouveau le profil central de la rivière et les points du masque avec la hauteur dépendant de la pente, afin de recalculer plus finement l'appartenance aux nœuds de chaque point et le profil de hauteur.

5.4 Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés



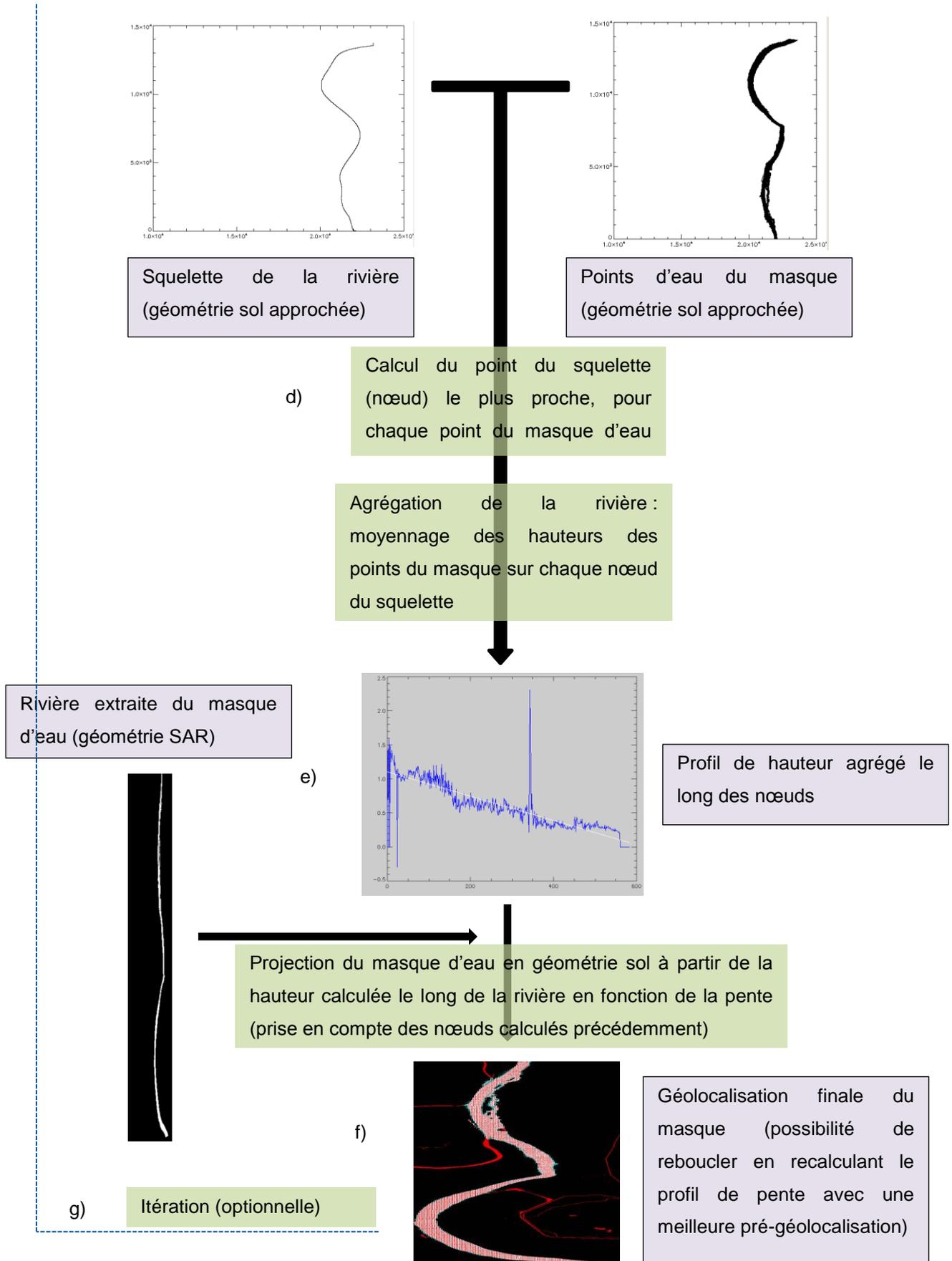


Figure 122 : Schéma algorithmique de la méthode de géolocalisation améliorée avec prise en compte de la pente

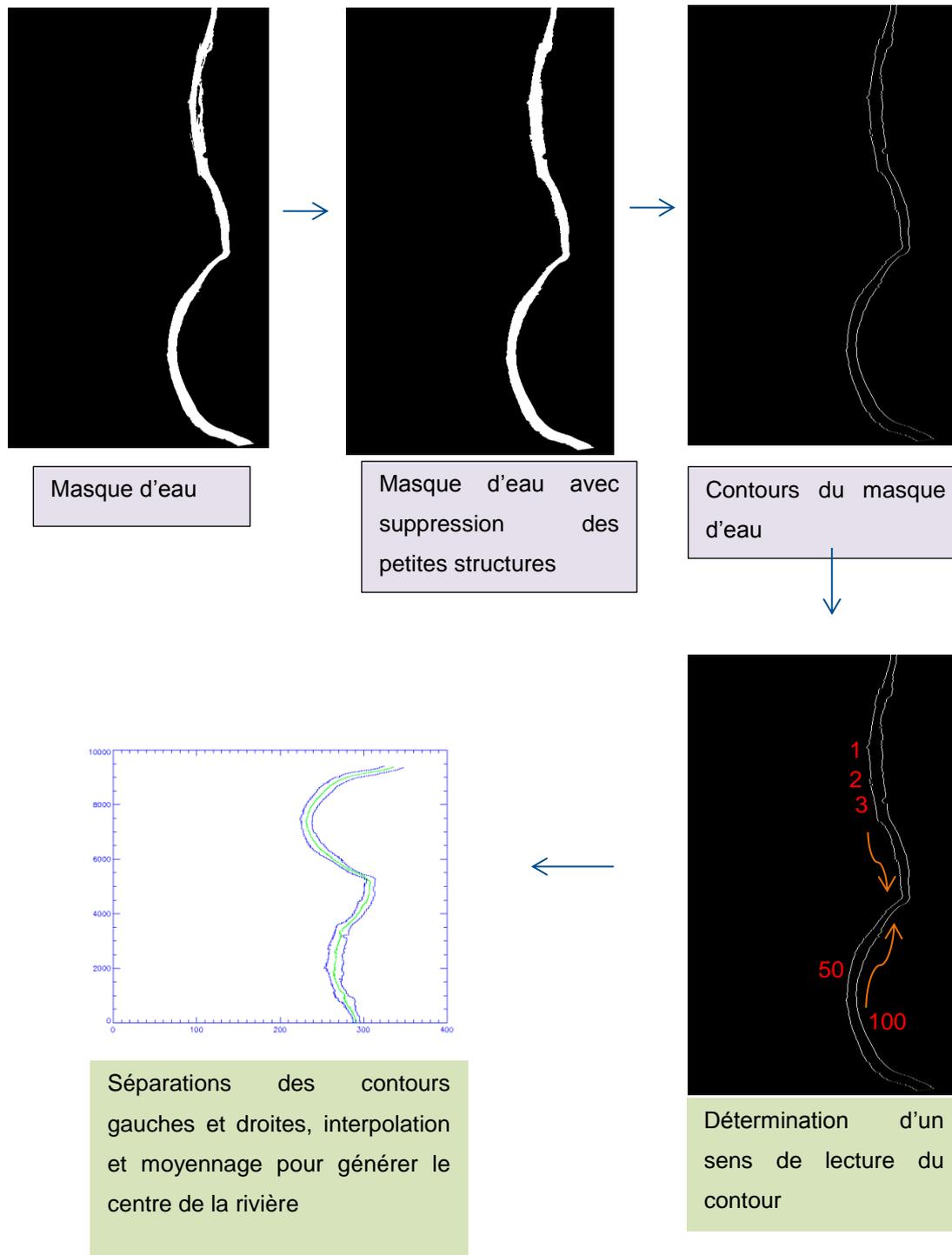


Figure 123 : Squelettisation de la rivière : exemple de l'algorithme utilisé

La Figure 124 présente les résultats obtenus avec la méthode complète, en prenant en compte les pentes et les pixels identifiés en layover. L'étendue est restituée précisément sous forme d'un nuage de point bien localisé. Ceci permet d'envisager la génération de produits vectoriels pour chaque segment de rivière.

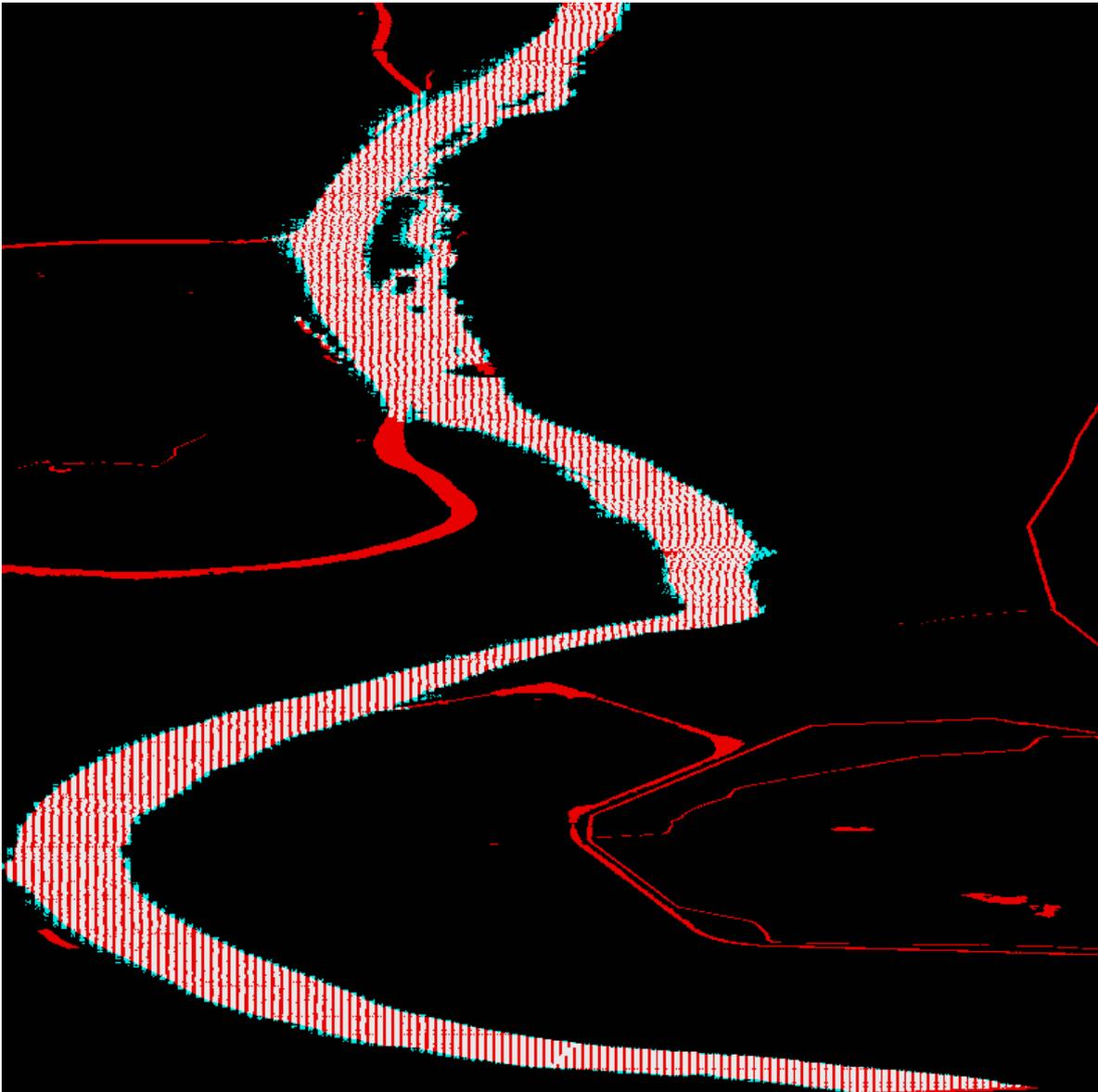


Figure 124 : Image de géolocalisation obtenue à partir de la méthode complète. En rouge : masque de simulation en entrée, en blanc : pixels d'eau géolocalisés après traitement complet. En cyan : pixels d'eau avec une géolocalisation erronée (hors du masque d'eau de simulation)

5.4.3. AVANTAGES ET LIMITATIONS DE LA METHODE

L'intérêt principal de la méthode présentée ici est qu'elle exploite l'information donnée par le masque d'eau, c'est-à-dire les coordonnées radar des points du masque sur lesquels on effectue la conversion phase-hauteur. Contrairement à la méthode où la géolocalisation est obtenue directement par la phase, peu moyennée et donc très bruitée, la phase n'est ici exploitée que par le biais de la hauteur, celle-ci étant ensuite fortement moyennée avant d'être utilisée pour la géolocalisation. De cette façon, on réduit fortement l'effet du bruit thermique pour l'estimation de la géolocalisation des surfaces d'eau. En particulier, dans le cas de petites structures identifiables sur le masque d'eau mais non sur le pixel cloud brut, on retrouve ces structures avec la méthode proposée. Sur la Figure 125, on voit que les îlots au milieu de la rivière sont totalement masqués sur le pixel cloud brut à gauche, mais que ces structures réapparaissent après le traitement de géolocalisation améliorée.

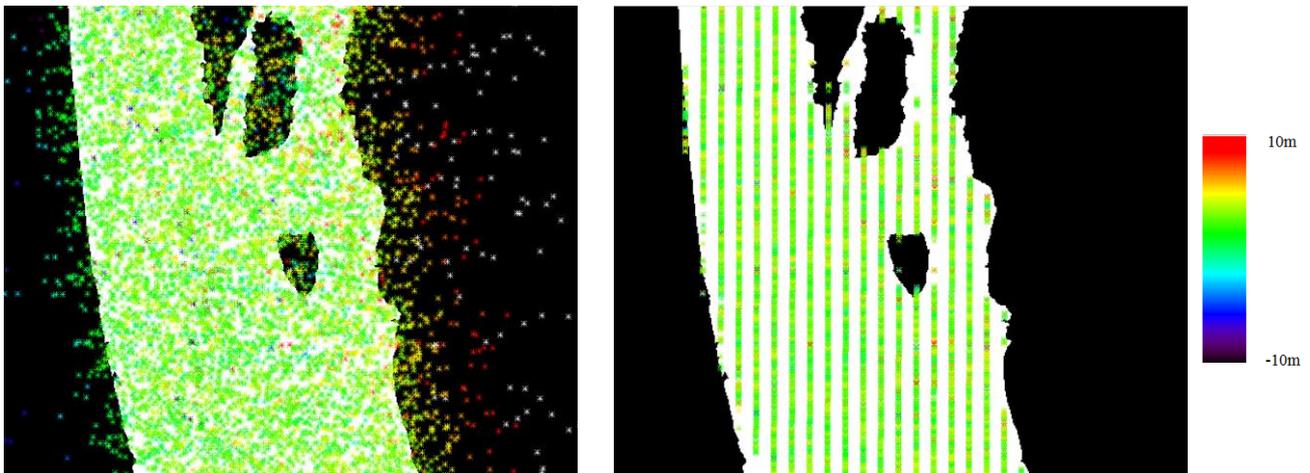


Figure 125 : Exemple de l'intérêt de la méthode de géolocalisation pour l'identification de structures dans la rivière (à gauche, pixel cloud brut, à droite géolocalisation améliorée)

Cette méthode est automatique et n'exploite que des données SWOT, les données auxiliaires n'étant utilisables qu'en option, ce qui peut être un avantage au niveau de la robustesse et de la sensibilité aux erreurs induites par l'apport de données externes. Le processus est itératif, et peut être affiné une fois la connaissance des hauteurs et des pentes plus précises. Cependant, la première étape, consistant à identifier les différentes zones d'eau sur le masque, n'a pas été automatisée pour le moment.

Au niveau de la gestion du layover, les points pollués, sont exclus à la fois du calcul des hauteurs, et leur erreur n'a également pas d'impact dans l'estimation de l'étendue, les points pollués ayant une géolocalisation moyenne obtenue en utilisant une hauteur sans erreur de layover. Dans notre méthode, hauteurs et géolocalisation étant découplés, l'hypothèse principale permet d'étendre l'information de hauteur moyennée à tous les points du masque, tout en n'utilisant pas les points trop pollués pour calculer les profils de hauteur.

Dans les limitations, on retrouve le découplage hauteur/géolocalisation lié à nos hypothèses de calcul. Ainsi, un point donné, contrairement au pixel cloud, n'a plus la géolocalisation qui correspond à sa « hauteur » brute peu moyennée. Cela atténue les effets de bruit de phase, mais certaines variations locales de hauteur, présentes dans l'information de phase, peuvent être perdues ensuite lors de la moyenne des hauteurs. Cependant, ces informations sont en général sous le niveau de bruit.

Une source d'erreur possible provient de l'identification d'une zone d'eau considérée comme un bras unique de rivière, dans la géométrie radar. On risque ainsi d'identifier deux rivières proches (ou une rivière et un canal proches mais de hauteur différente) comme une seule étendue d'eau, et de mélanger ainsi des informations de hauteurs provenant de bras d'eau de hauteurs différentes. Ce cas peut provenir d'un effet géométrique lors de la projection en géométrie radar (sorte de layover eau/eau) ou bien d'une résolution insuffisante pour distinguer les deux éléments dans cette géométrie. Dans le cas d'une méthode classique basée sur l'utilisation directe de la géolocalisation bruitée du pixel cloud, les variations de phase entre les deux cours d'eau pourraient distinguer ces deux derniers une fois les points projetés au sol à partir de la phase. Cependant, le caractère très bruité de la phase rend ce cas peu probable. De même, la non-détection de certaines zones d'eau dans le masque pourrait entraîner des erreurs.

Précédemment, dans les différents cas tests, on remarque une surestimation de la largeur de la rivière due à la prise en compte des pixels mixtes eau/terre dans le masque. Plusieurs possibilités sont à considérer pour la gestion de ces pixels, dépendant de la qualité de la détection des surfaces d'eau. Dans la Figure 126, on peut remarquer que si l'on choisit de considérer les pixels mixtes du masque d'eau comme étant « eau », on surestime l'étendue, et que dans le cas contraire, on la sous-estime. En pratique, le masque d'eau présentera des pixels mixtes, dont la fraction eau/terre nécessaire pour aboutir à l'étendue la plus précise possible, est très difficile à estimer en raison du speckle et du bruit thermique.

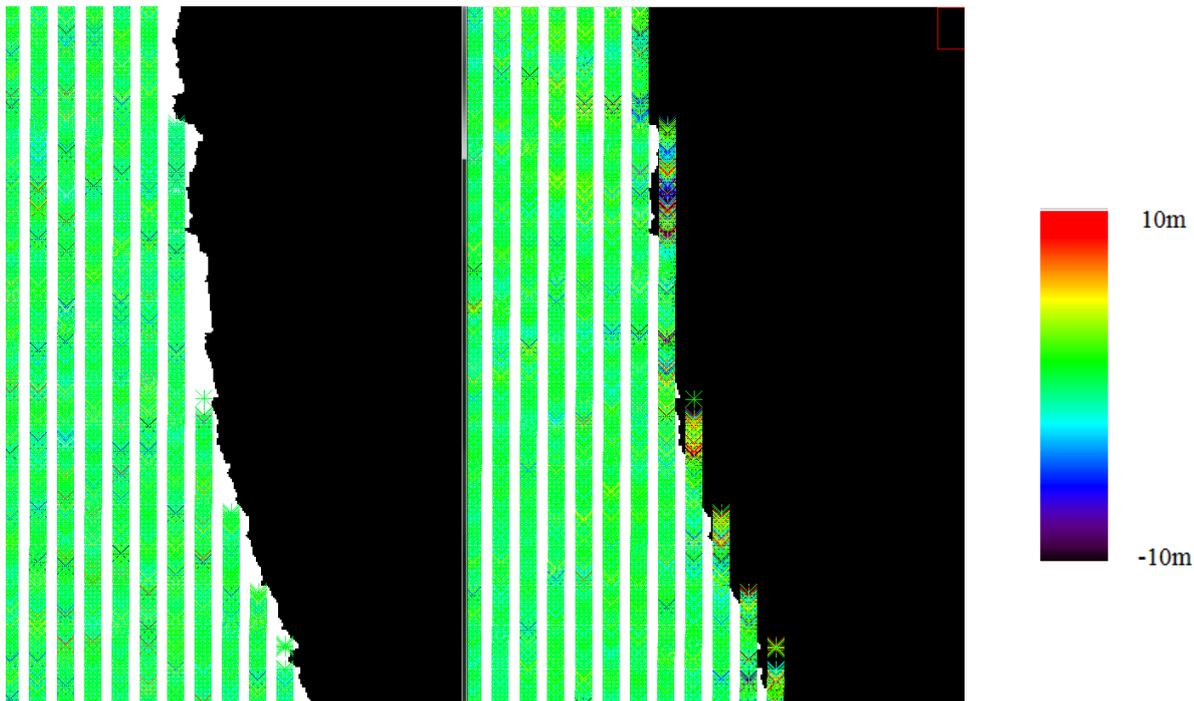


Figure 126 : Effet de la prise en compte (à droite) ou non (à gauche) des pixels mixtes lors de la représentation géolocalisée des pixels d'eau. En couleur, les hauteurs des pixels, en noir le masque terre initial, en bleu le masque d'eau initial.

Dans la Figure 127, on peut observer une autre limitation de la méthode. Il s'agit d'un endroit où la rivière se sépare en deux bras parallèles. Les deux segments de la rivière n'ont pas été attribués séparément à la base de données. Or, ces deux segments sont de hauteurs différentes, notamment en raison d'un petit barrage (ou d'une écluse), sur le bras droit. Par conséquent, le bras gauche a une hauteur moyenne d'environ 60 cm, tandis que le bras droit a une hauteur de 90 cm. Lors de l'étape d'agrégation des hauteurs, les deux bras sont mélangés, donnant une hauteur moyenne autour de 70 cm. Cela se traduit ensuite dans la géolocalisation, par une erreur sur ces deux segments de rivières. C'est particulièrement visible sur le bras à 90 cm de hauteur (bras droit sur nos images) qui se retrouve décalé vers le Near-range à gauche (Figure 127 et Figure 128). Cet effet est relativement difficile à prévoir et à compenser sans connaissance préalable du terrain, les zones concernées étant de trop faible taille pour pouvoir envisager un moyennage suffisant pour mettre en évidence la discontinuité. Dans tous les cas, c'est en fonction de la précision et de la résolution du masque que peuvent être gérés ces phénomènes.

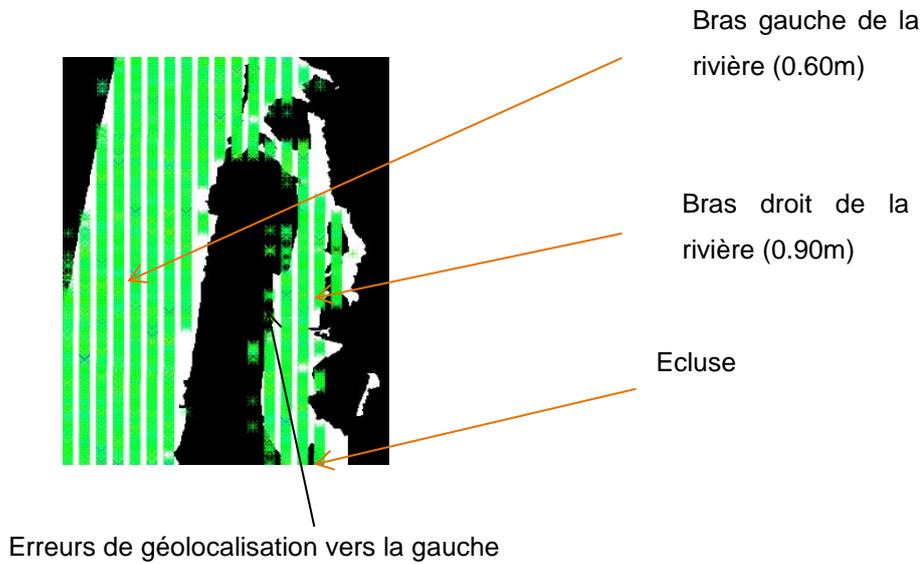


Figure 127 : Effets de discontinuités de hauteurs entre deux bras de la rivière (cas sans pixels mixtes)

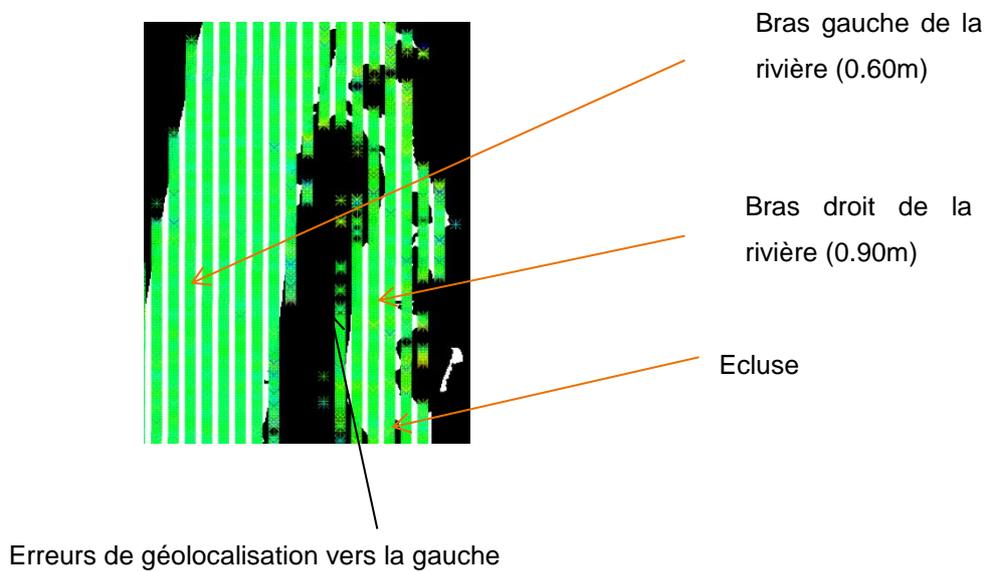


Figure 128 : Effets de discontinuités de hauteurs entre deux bras de la rivière (cas avec pixels mixtes inclus)

5.4 Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés

Un autre élément intéressant pouvant être pris en compte pour améliorer l'algorithme est le caractère bidimensionnel des pentes de la rivière, c'est-à-dire une composante transversale à la direction principale du courant. Dans ce cas, il faut un algorithme plus complexe, en particulier dans le cas de larges rivières.

5.4.4. ADAPTATION DE L'ALGORITHME AUX GRANDS LACS

Rappelons que dans le cas des petits lacs, le traitement étudié précédemment peut être simplifié. Seule la première estimation de hauteur moyenne (avec ou sans prise en compte du layover) est utilisée pour obtenir une hauteur d'eau moyenne, qui est ensuite employée pour géolocaliser précisément les pixels d'eau. Dans ce cas, il n'y a pas besoin d'agréger les points pour affiner l'estimation de géolocalisation. Dans le cas de grands lacs, on peut également introduire une notion de pente dans le lac, et adapter l'algorithme proposé pour les rivières pour tenir compte de ces effets de hauteur non uniforme sur la surface du lac. Dans ce cas, la pente est généralement bidimensionnelle. Une option est de calculer des moyennes en différents points du lac, après moyennage suffisant pour obtenir la précision nécessaire (sur 1x1 km² par exemple). On peut ensuite calculer par interpolation 2D la hauteur régularisée sur tout le lac, et projeter la géolocalisation à partir de celle-ci.

5.4.5. EXEMPLE D'UTILISATION SUR LA SEINE

Une simulation a été réalisée à partir d'un MNT de la Seine (Figure 129), autour de Rouen, résolu à 3 m. Les valeurs des niveaux d'eau ont été modélisées de manière linéaire conformément aux amplitudes relevées sur les modèles hydrologiques fournis par I. Turki et B. Laignel et F. Lyard. La modélisation hydrologique T-UGOm qui a servi d'entrées pour les simulations sur l'estuaire a été réalisée par Laetitia Chevalier [Chev-2014]. Les hauteurs d'eau ont ici été établies de 0m en aval (à gauche) à 3 m en amont (à droite). La simulation a été réalisée avec une hypothèse de σ_0 à environ 10 dB pour l'eau et à environ 0 dB pour le sol.

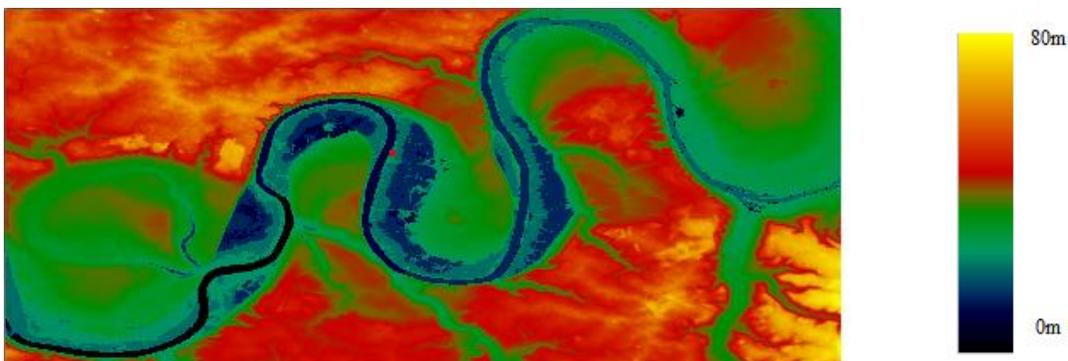


Figure 129 : MNT de l'estuaire de la Seine utilisé pour la simulation dans le cadre de la validation de la méthode de géolocalisation améliorée

Le masque d'eau de réalité terrain en géométrie radar est estimé pendant le traitement, après la génération des interférogrammes (Figure 130).

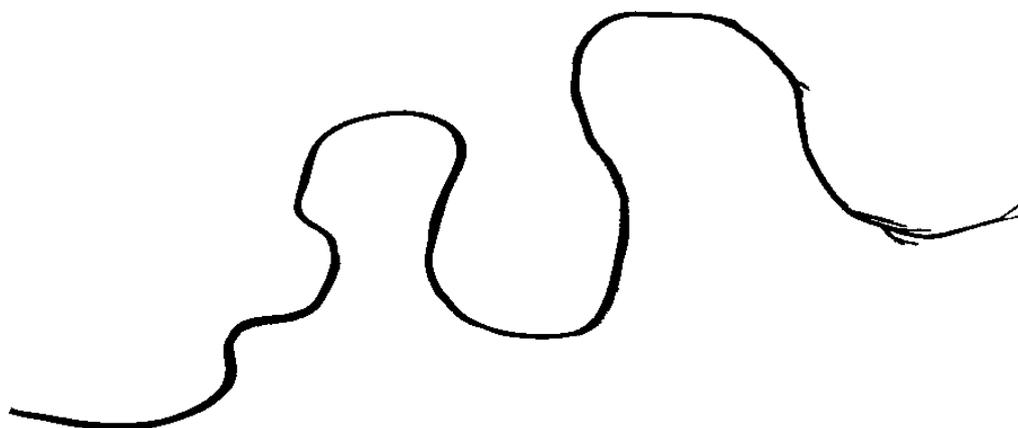


Figure 130 : Masque d'eau en géométrie radar (multivue 10 en azimuth pour la visualisation) issue de la simulation

Le seuil de cohérence (fenêtre 3x3) pour sélectionner les points à moyenner pour la première géolocalisation a été fixé à 0.9. On vérifie d'abord que ce seuil sélectionne suffisamment de points pour que la moyenne soit représentative. La hauteur d'eau moyenne est estimée à 1.88 m, ce qui est cohérent vis-à-vis des hauteurs en entrée de simulation.

A partir du masque d'eau complet, la ligne centrale de la rivière est déterminée en géométrie radar, puis projetée en géométrie sol à partir de la hauteur moyenne. Pour cela, les contours de la rivière sont estimés à partir du masque qui a été préalablement traité pour supprimer un maximum de structures hors du lit principal. Conformément à la méthode décrite en 5.4.2, le contour est ensuite divisé en deux lignes représentant les rives de la rivière, qui sont ensuite interpolées à la même taille puis moyennées deux à deux pour générer le profil central (Figure 131). Cette méthode permet d'approximer de manière assez réaliste la ligne centrale en l'absence de données auxiliaires. Dans le cas où celles-ci seraient disponibles, une ligne centrale extérieure peut être utilisée (base de données SWOT).

5.4 Méthodes de génération de produits géolocalisés moyennés

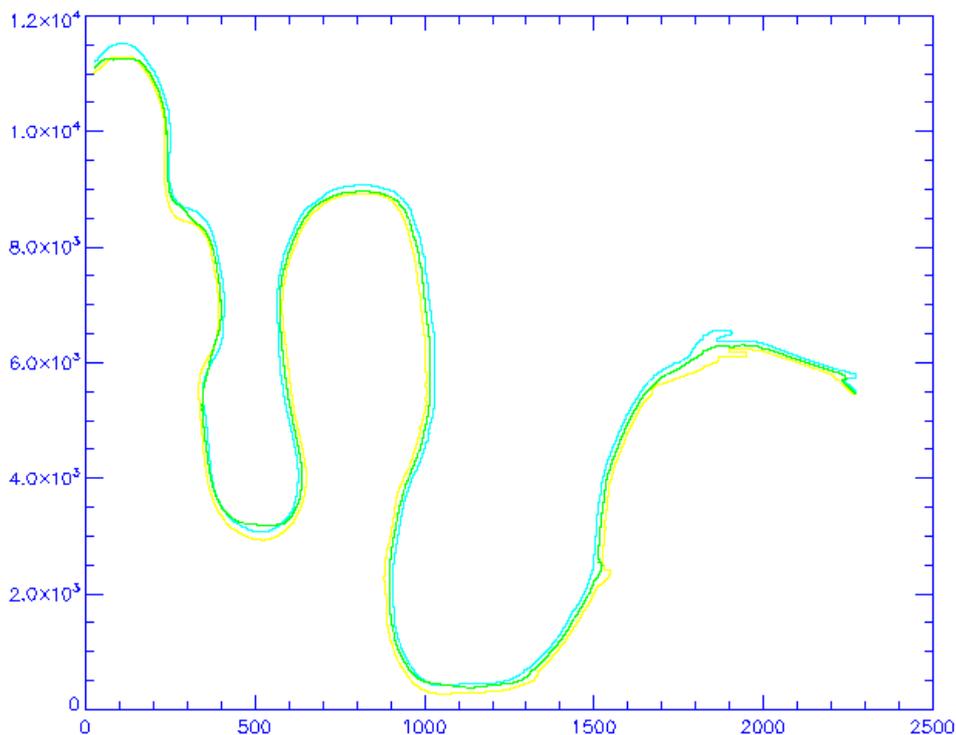


Figure 131 : Géolocalisation des rives et de la ligne centrale de l'estuaire de la Seine. En jaune : rive gauche de la Seine, en bleu : rive droite de la Seine, en vert : ligne centrale de la Seine

L'étape suivante consiste à projeter les points du masque en géométrie sol, afin de déterminer leur distance vis-à-vis du centre de la rivière. On associe ensuite à chaque point du masque d'eau un point du profil de la rivière. On moyenne alors les hauteurs de ces pixels d'eau le long de la ligne centrale, en sélectionnant les points de cohérence supérieure à 0.9 (ou bien en excluant les pixels identifiées auparavant dans le masque de layover).

Le profil ci-dessous représente les hauteurs issues de la moyenne des points le long de la rivière (Figure 132). En raison de son caractère bruité, notamment dû au fait que certaines zones à fort layover présentent peu de points utilisables pour la moyenne, on effectue une linéarisation du profil. Dans le cas de rivière au profil plus complexe, et si la donnée SWOT est suffisamment riche pour pouvoir le faire, il est possible d'utiliser un profil plus complexe qu'une linéarisation. En pratique, il faut avoir suffisamment de pixels pour réduire le bruit.

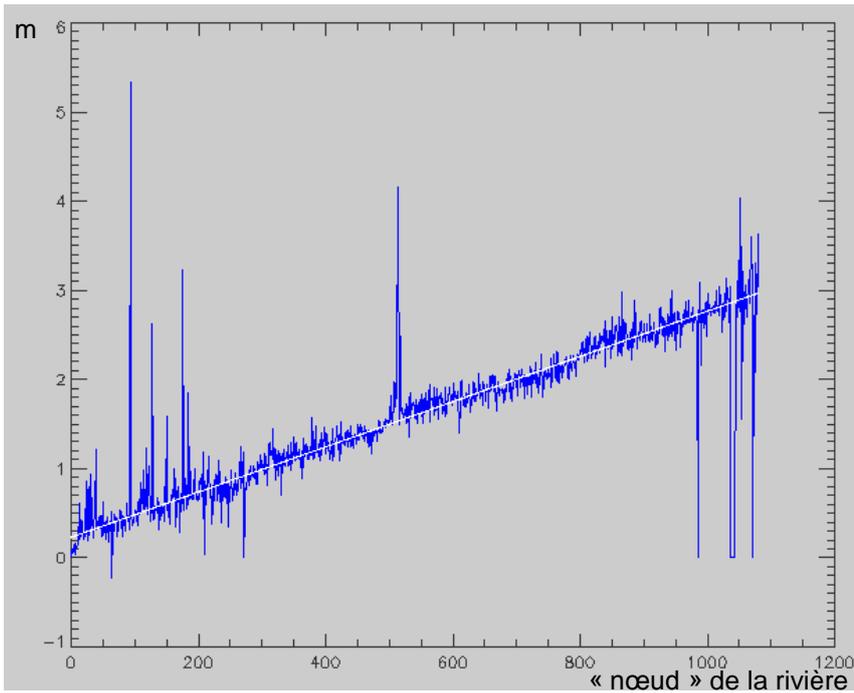


Figure 132: Profil de hauteur le long de la rivière issue de l'agrégation des points le long de la ligne centrale de la Seine, avec un pas de moyennage tous les 20m

Les images de hauteurs obtenues sont présentées Figure 133 et Figure 134. La hauteur d'eau évolue le long de la rivière de l'amont vers l'aval. La géolocalisation est très précise, et permet d'envisager une vectorisation fine du tronçon et un calcul réaliste de l'étendue.

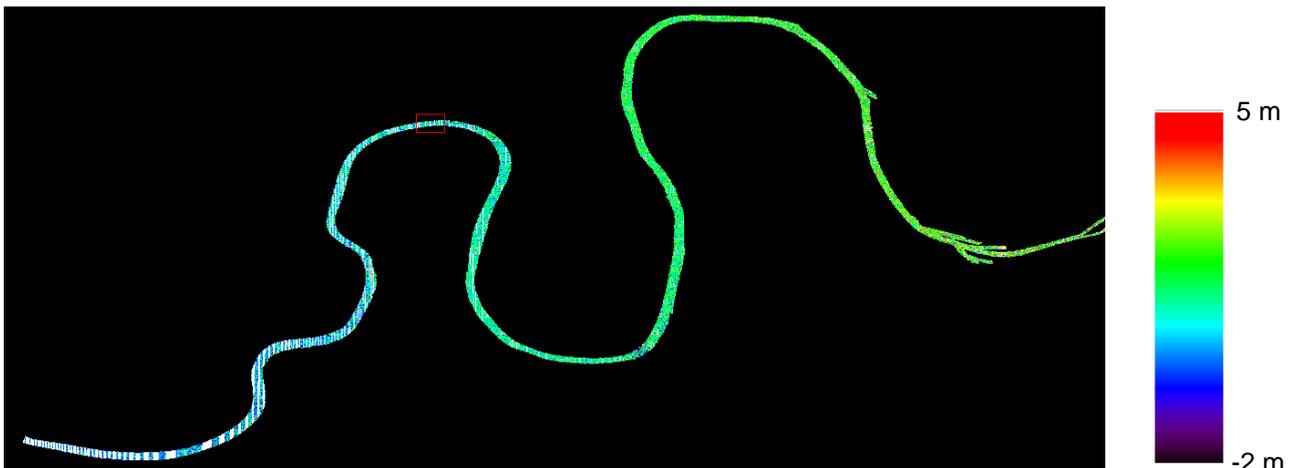


Figure 133 : Hauteurs géolocalisées sur l'estuaire de la Seine à partir de la méthode de géolocalisation améliorée. Seules les hauteurs d'eaux sont représentées.

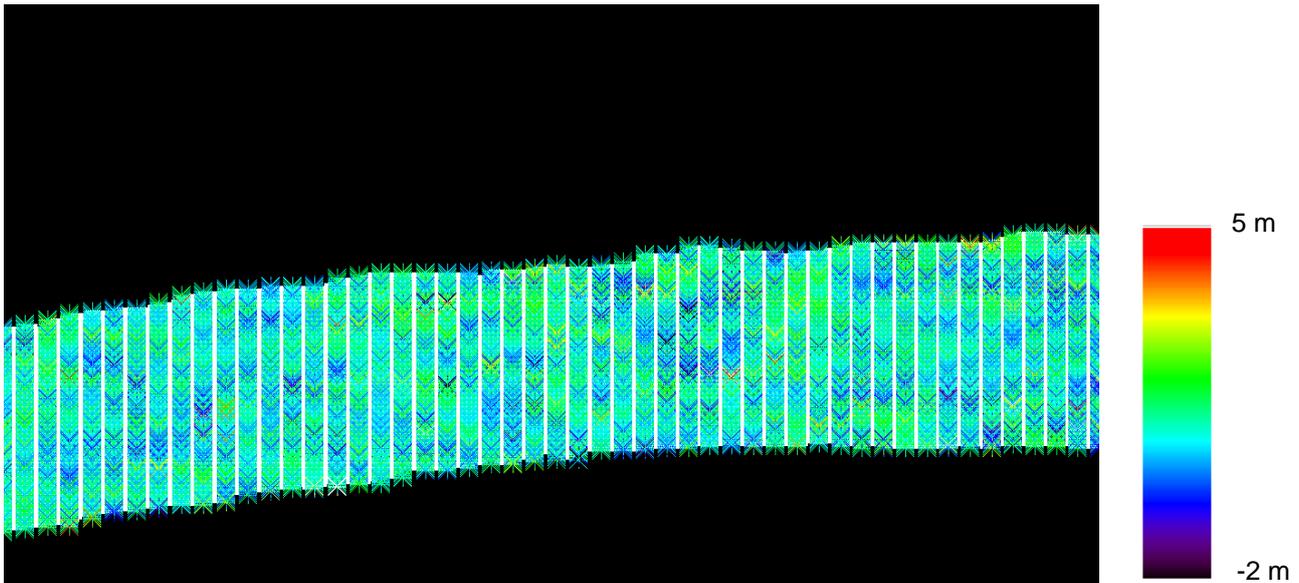


Figure 134 : Hauteurs géolocalisées sur la Seine à partir de la méthode de géolocalisation (zoom sur une portion de la rivière)

5.4.6. METHODE DE GEOLOCALISATION PAR MAXIMUM A POSTERIORI

Une autre méthode de géolocalisation utilisant ce découplage entre hauteur et géolocalisation a été présentée à l'Algorithm Definition Team (ADT) en juin 2015 par E. Rodriguez. Elle utilise le maximum de vraisemblance et le maximum a posteriori afin de guider le moyennage adaptatif, tout en découplant également les moyennes de hauteurs et celles de géolocalisation.

On a vu précédemment dans la section 3.5.1 que l'on pouvait déterminer l'expression de l'erreur de géolocalisation comme :

$$\sigma_y = \frac{\sigma\phi\lambda H}{2\pi B} \quad (140)$$

Et l'écart type de phase associé comme :

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (141)$$

On définit le facteur α comme étant la fraction de la taille du pixel telle que l'erreur de géolocalisation est inférieure à α taille_{pixel}:

$$\sigma_y < \alpha \Delta R / \sin(\theta)$$

On obtient alors la relation suivante sur le nombre de vues N à moyenner pour atteindre la condition d'une géolocalisation correcte (de l'ordre de 0.1 à 0.2) :

$$\frac{\lambda H}{2\pi B \sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} < \alpha \cdot \Delta R / \sin(\theta)$$

$$N > \left(\frac{\lambda H \sin(\theta)}{\alpha \Delta R 2\pi B} \right)^2 \frac{(1-\gamma^2)}{2\gamma^2}$$

Qui peut s'exprimer en fonction de la position dans la fauchée ρ :

$$N > \left(\frac{\lambda \rho}{\alpha \cdot \Delta R 2\pi B} \right)^2 \frac{(1-\gamma^2)}{2\gamma^2} \tag{142}$$

On considère ensuite que la contribution majeure à la décorrélation est celle du SNR :

$$\gamma = \frac{1}{1 + 1/SNR} \tag{143}$$

Pour atteindre une précision en géolocalisation tel que $\alpha=0.1$ et $\alpha=0.2$, on obtient pour des SNR de 10 dB et de 15 dB les profils suivants (Figure 135 et Figure 136) :

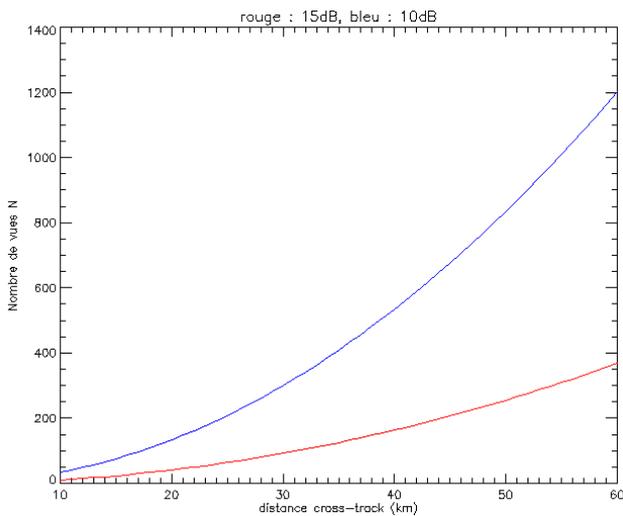


Figure 135 : Nombre de vues nécessaires pour une géolocalisation avec $\alpha=0.1$

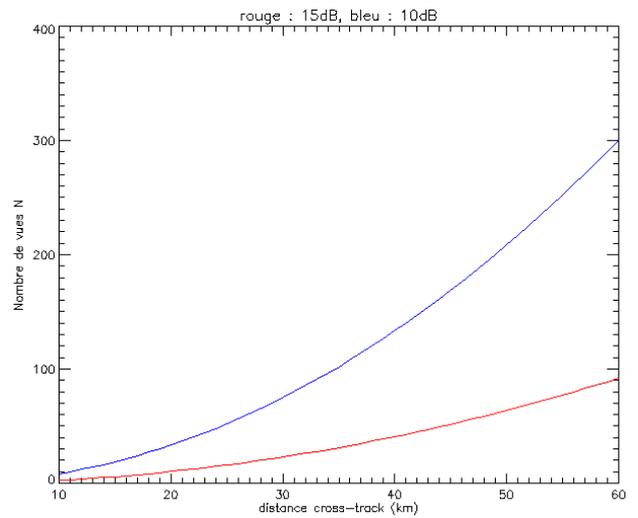


Figure 136 : Nombre de vues nécessaires pour une géolocalisation avec $\alpha=0.2$

Un moyennage important est nécessaire pour atteindre la performance requise. Celui-ci n'est pas compatible avec une erreur de hauteur correcte, la moyenne des phases entrainant des biais (4.5.3.2) et

6.2 Etude du mode LR

leurs répercussions sur la hauteur. En effet, les erreurs de détection eau/terre et les variations de phase en across-track liées à l'aplatissement de phase altèrent directement la phase moyennée.

Le principe est d'utiliser une phase moyennée par maximum de vraisemblance en utilisant un interférogramme de référence corrigé au mieux des erreurs de déroulement, en particulier près des berges. Ceci se faisant au prix d'un biais sur la phase estimée, une première estimation de phase, peu débruitée et faiblement affectée par le biais de moyenne, servira pour le calcul des hauteurs, qui seront ensuite moyennées afin d'atteindre les performances altimétriques. Dans un second temps, une phase fortement lissée, mais polluée d'un biais de moyennage, sera utilisée pour déterminer la géolocalisation, pour laquelle les erreurs introduites par le lissage sont moins pénalisantes. Ce découplage permet d'atteindre une géolocalisation correcte, sans dégrader la précision altimétrique des niveaux d'eau.

6. EXEMPLE DE PRODUITS KARIN/SWOT HR ET LR SUR UN SITE COTIER

L'objectif de ce chapitre est d'observer les résultats des traitements développés à la fois pour le mode LR et HR sur une même scène. La zone étudiée correspond à l'estuaire de la Seine, près de Rouen. La scène fait 26 km de longueur en azimut, et une fauchée complète SWOT, c'est-à-dire 50 km en distance. La modélisation a pris en compte une surface de mer calme sans houle.

La simulation présentée sert de cas test pour de la chaîne de traitement dans son ensemble, afin d'étudier quelques particularités des zones côtières observées par SWOT selon le mode de fonctionnement LR ou HR. Rappelons que le mode LR est activé en permanence, et le mode HR essentiellement sur les surfaces continentales, y compris les zones côtières. La zone étudiée est donc couverte par les deux modes. L'orbite employée est une orbite simplifiée nord/sud proche de la future orbite SWOT. La simulation a été réalisée avec une hypothèse de σ_0 à environ 10 dB pour l'eau et à environ 0 dB pour le sol, avec un bruit thermique représentatif.

6.1. ETUDE DU MODE HR

Le mode de fonctionnement HR va permettre ici de restituer à haute résolution les hauteurs d'eau côtières. Les données sont présommées d'un facteur 2.5 et les différents produits obtenus sont présentés ici avec une multivue d'un facteur 4 (uniquement pour la visualisation).

Les différentes étapes du traitement HR sont effectuées : traitement SAR, génération des produits interférométriques et traitement d'inversion phase-hauteur. La Figure 137 présente la donnée brute comprimée en distance, avant la focalisation azimut. La Figure 138 montre les produits interférométriques générés avec une fenêtre de moyennage 3x3. Le nombre de vues est d'environ 9. Sur l'image d'amplitude, on remarque les surfaces d'eau, ainsi que des structures claires sur les surfaces terrestres dues au fort layover. L'image de phase et de cohérence montre un bruit important sur les surfaces terrestres, lié principalement au bruit thermique et à la décorrélation induite par le layover. Ces surfaces sont fortement polluées par le layover, rendant l'extraction d'un MNT terrestre difficile.

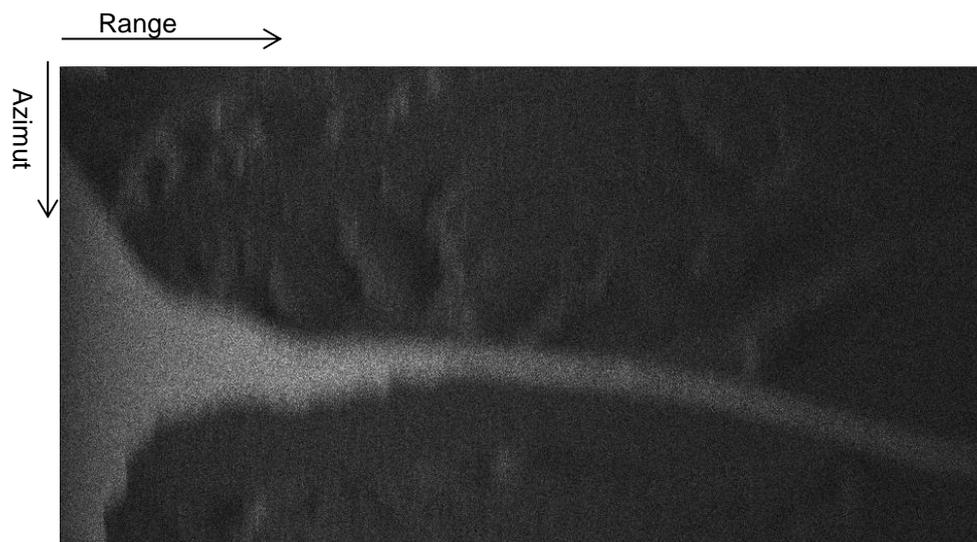


Figure 137 : Données brutes focalisées en distance

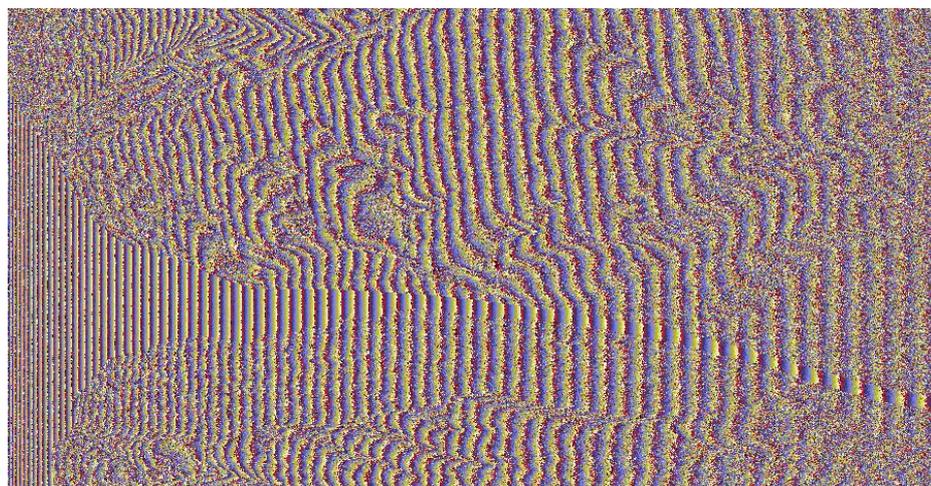
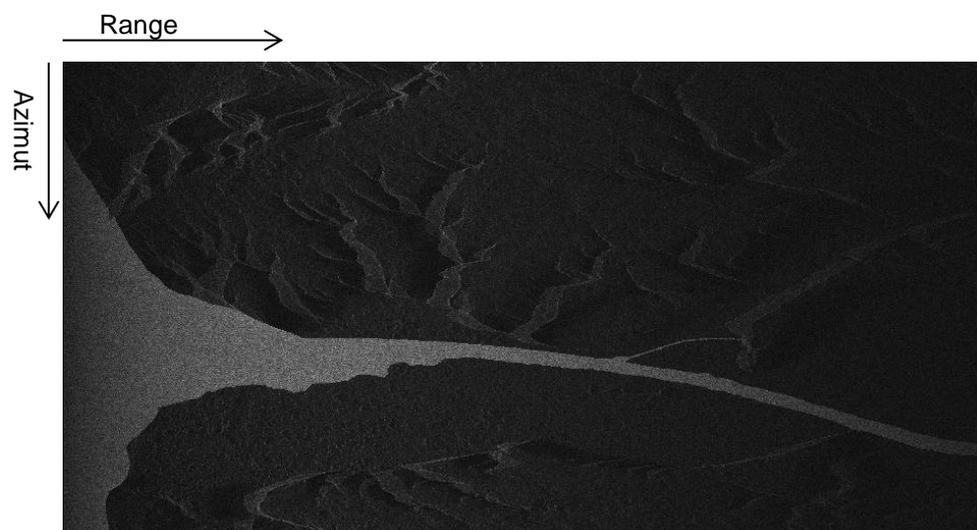




Figure 138 : De haut en bas, amplitude, phase et cohérence interférométrique issue du mode HR sur l'estuaire de la Seine

La Figure 139 représente les hauteurs restituées à partir de la phase de la Figure 138. Conversion de la phase en hauteurs géolocalisées a été effectuée d'une part avec une référence dégradée et l'utilisation des méthodes précédentes pour valider la bonne qualité du déroulement, et d'autre part, avec une référence « parfaite », c'est-à-dire le MNT de simulation (sans les vagues). Les deux méthodes ont montré des résultats équivalents. Les hauteurs restituées sont très précises sur l'eau. Afin de comparer avec le traitement équivalent en mode LR, un produit moyenné au kilomètre a été généré sur les pixels d'eau dans l'estuaire). Après un moyennage kilométrique, la précision obtenue est de 21 mm sur les surfaces d'eau non polluées par le layover, et un biais de 4 mm vis-à-vis de la hauteur moyenne attendue obtenue par le MNT utilisé dans la simulation.

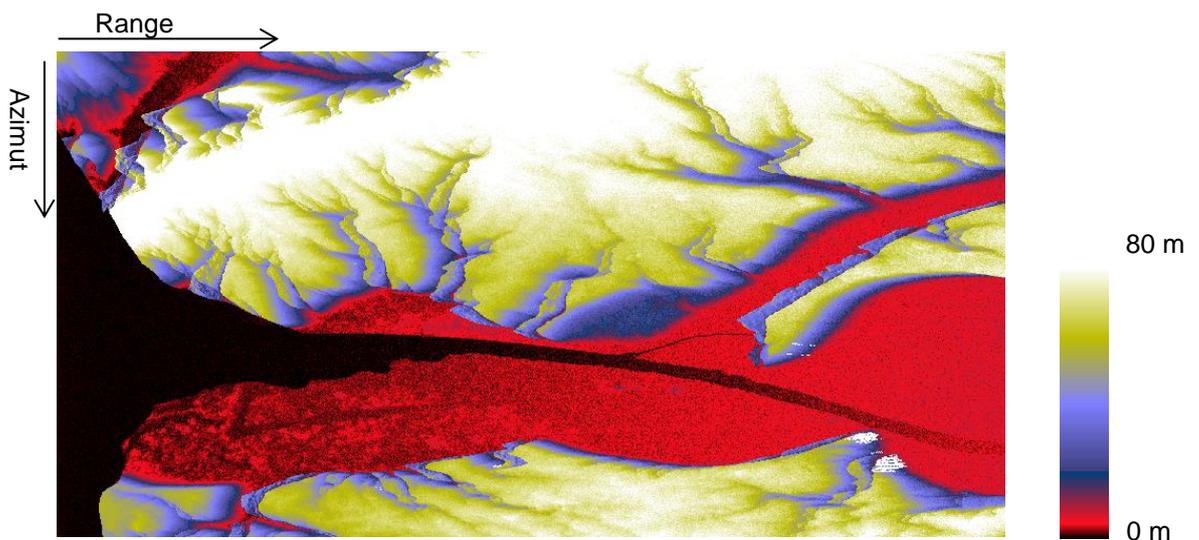


Figure 139 : Hauteurs restituées sur l'estuaire de la Seine en mode HR



Figure 140 : Masque de layover sur l'estuaire de la Seine en mode HR

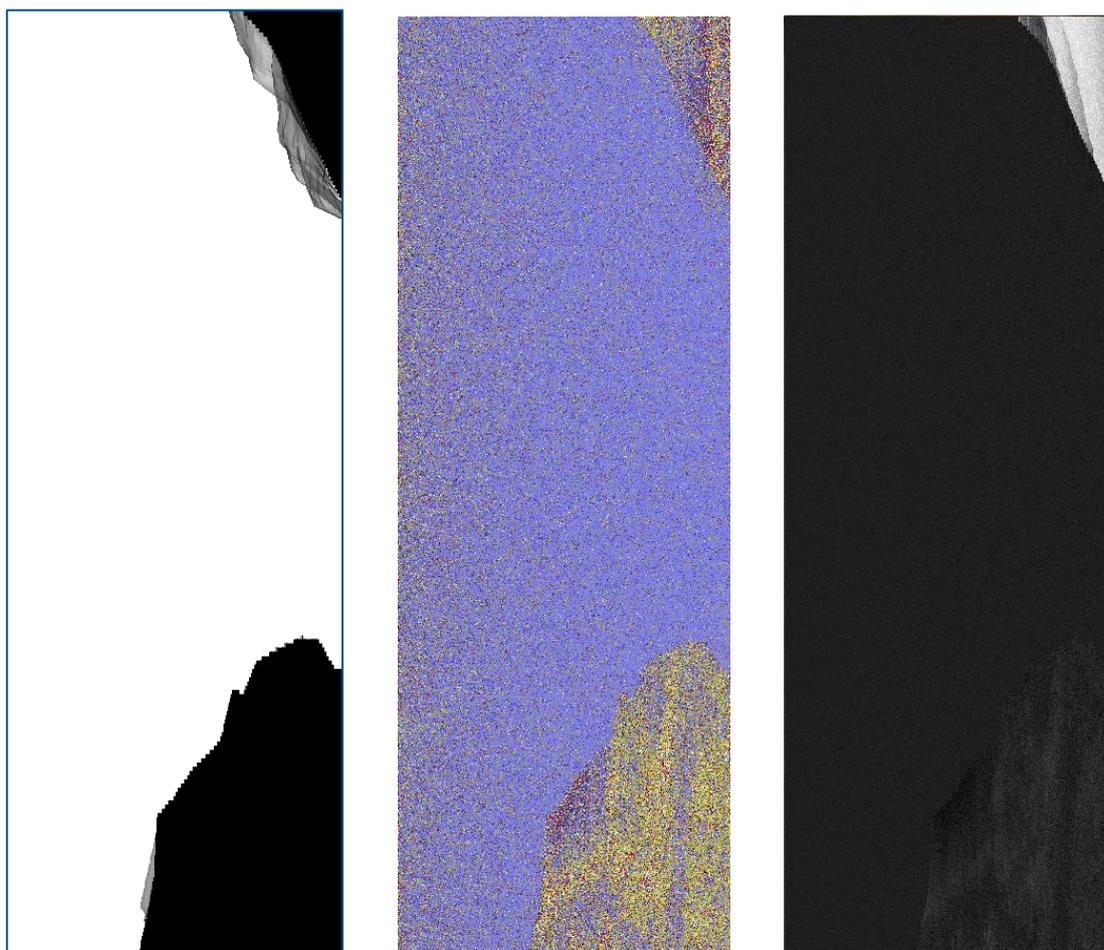


Figure 141 : Masque de layover, phase interférométrique et hauteurs restituées sur un extrait de la Seine

6.1 Etude du mode HR

Sur l'extrait de la Figure 141 situé au niveau de l'estuaire, entre les lignes 3000 et 5000 de l'image, et les colonnes 0 à 700, une étude des différentes zones : eau, terre, et layover donne les résultats suivants :

	Terre	Eau	Layover
Hauteur moyenne théorique (m) sur l'extrait	15.96	-0.0013	-0.013
Hauteur moyenne restituée (m) sur l'extrait	16.01	-0.009	-0.055
Ecart type (m) calculé à partir d'une surface de 1 km ²	0.34	0.021	0.064

On remarque que les zones contaminées par le layover présentent un biais de hauteur induit par la contamination des berges hautes. Dans le calcul des produits finaux, il faut retirer ces pixels pour éviter qu'ils biaisent les hauteurs.

6.2. ETUDE DU MODE LR

Le point de départ est une simulation d'image KaRIn de niveau 0 SWOT, sur laquelle les différentes étapes de traitement ont été réalisées (3.5). La compression en distance et la coregistration, le traitement SAR non focalisé (Doppler Beam Sharpening), la génération des produits interférométriques, l'aplatissement de la phase à partir d'une hauteur de référence, la moyenne kilométrique des pixels radar et la restitution phase hauteur sont les principales étapes de traitement prises en compte.

Plusieurs éléments sont à considérer. Pour des facilités dans la gestion du biais inter-vues, certaines précautions ont été prises au niveau de la scène et de l'orbite. Le biais inter-beam est un biais qui est dû au non parallélisme entre les lignes iso-range et iso-phase, et qui apparaît lors du traitement bord. Plusieurs facteurs influent ce dernier : l'excentricité de l'orbite, la topographie de la scène, les dépointages antennes, etc... et sont de plus pondérés par la puissance du signal rétrodiffusé. Les effets liés à ce phénomène de traitement ont été observés et étudiés en partie pendant la thèse, mais les corrections sol liées à ces biais n'ont pas été implémentées. Afin de pouvoir étudier les autres phénomènes sans ces perturbations, les caractéristiques orbitales ont été simulées pour se trouver dans une configuration sans ce biais (orbite parallèle à la surface d'eau).

Au niveau de la gestion des différentes vues, plusieurs approches ont été étudiées. Il est nécessaire de combiner les vues entre elles pour améliorer significativement la précision altimétrique finale, en réduisant le bruit gaussien thermique, non corrélé entre les vues. Pour cela, on peut envisager de recombinaison les interférogrammes, ou bien de combiner les produits finaux. L'approche retenue dans SWOT a été de combiner les hauteurs géolocalisées, au sol, afin de pouvoir corriger séparément les perturbations

sur chaque vue (biais de phase, géométrie, etc.), ainsi que tous les biais liés à des méconnaissances de paramètres lors du traitement bord.

Les Figure 142 et Figure 143 sont des vues issues du traitement non focalisé, l'une étant la vue centrale, ayant la meilleure qualité après le traitement, l'autre étant une des vues latérales, de qualité de phase moindre. Le bruit des 9 vues obtenues est non corrélé, et permet donc de gagner théoriquement un facteur 9 en variance de phase (et $\sqrt{9}$ en écart-type) et d'améliorer ainsi le rapport signal à bruit des images et la précision altimétrique finale. En raison de la qualité variable des vues, il faut pondérer chaque vue d'un facteur dépendant de sa qualité lors de la production des produits combinés finaux.

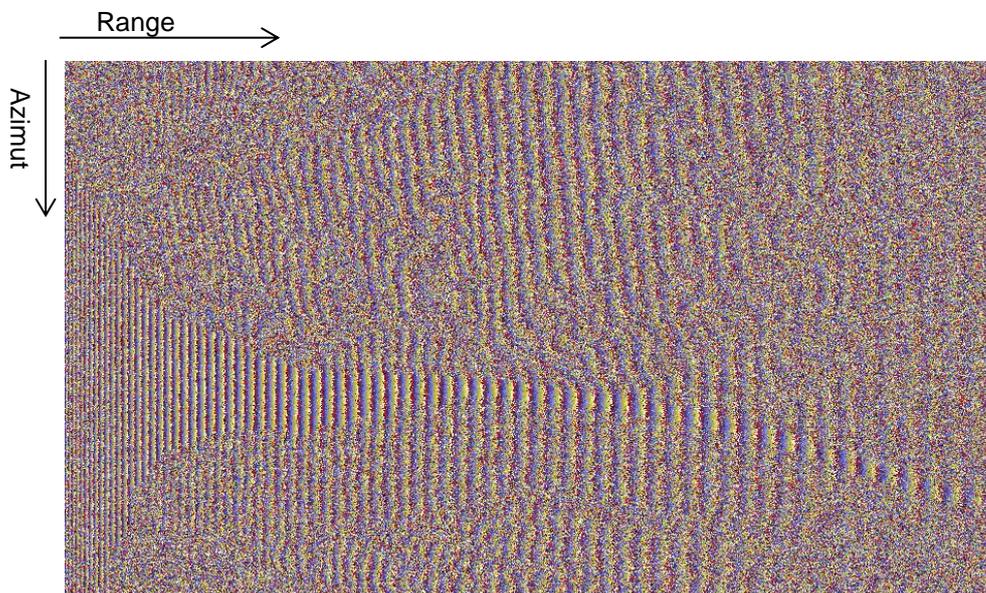


Figure 142 : Phase interférométrique de la vue 4 (vue centrale) du traitement DBS

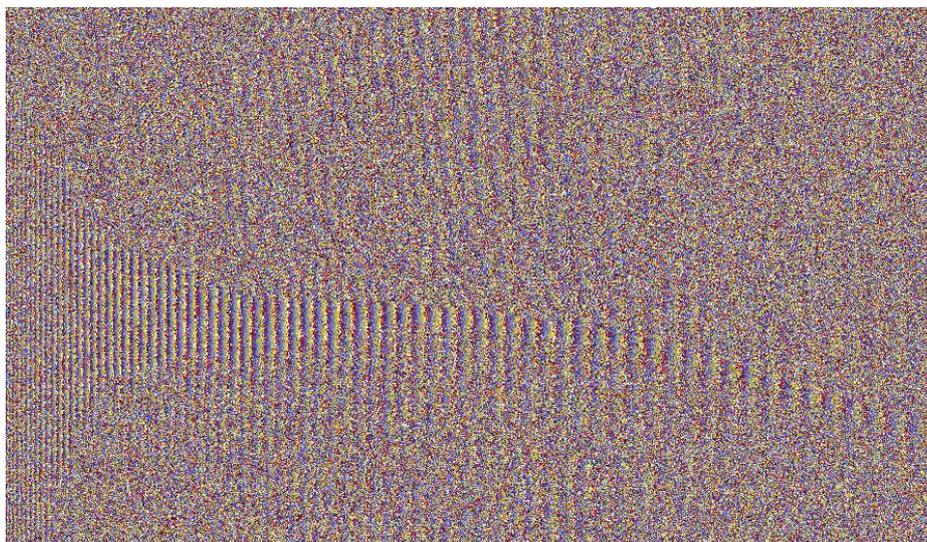


Figure 143 : Phase interférométrique de la vue 0 (vue latérale) du traitement DBS

6.2 Etude du mode LR

Il faut ensuite effectuer un aplatissement de la phase (Figure 144), avant de moyenner les interférogrammes à bord. Seule une hauteur d'eau de référence unidimensionnelle est embarquée à bord, puis extrapolée dans la fauchée. Ainsi, les surfaces continentales présentant de la topographie ne peuvent pas être déroulées correctement.

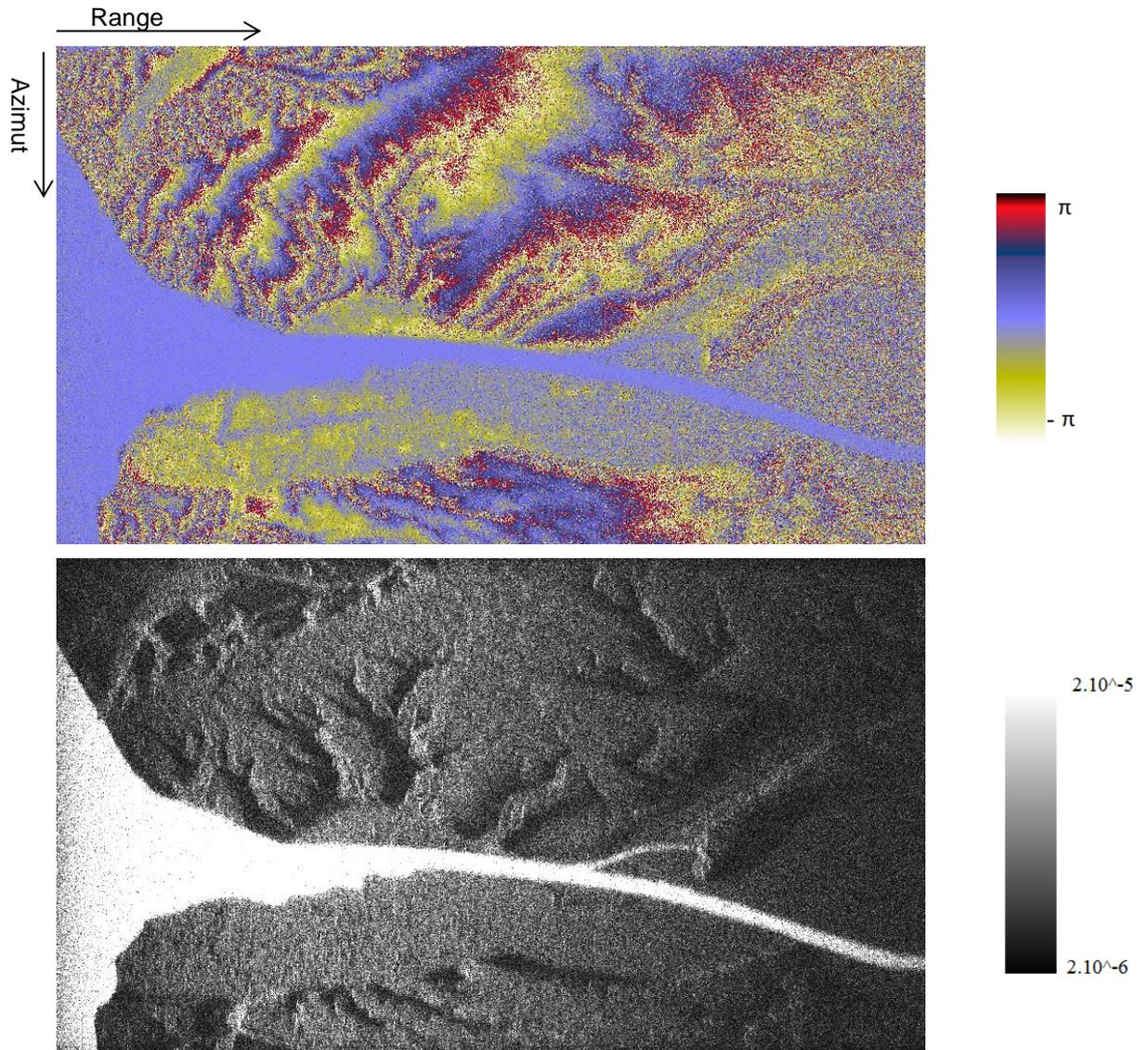


Figure 144 : Interférogramme (phase et amplitude) en géométrie radar après traitement DBS avec aplatissement de la phase (vue centrale)

Après moyennage, on obtient les produits sur une grille fixe de 1x1km (Figure 145). On note que sur l'image d'amplitude, le contraste eau/terre est plus important en milieu de fauchée. Cette étape étant pratiquée à bord, il n'y a pas de retour en arrière possible en cas de moyennage de points aberrants (mélange terre/eau par exemple). De plus, à partir de ce moment, les hauteurs terrestres ne sont plus exploitables et définitivement perdues car le moyennage kilométrique (ou de $250 \times 250 \text{ m}^2$) a été appliqué à

travers des franges non déroulées. Ainsi, pour le mode LR, de par la nature des moyennes effectuées à bord, l'extraction d'un MNT terrestre est impossible.

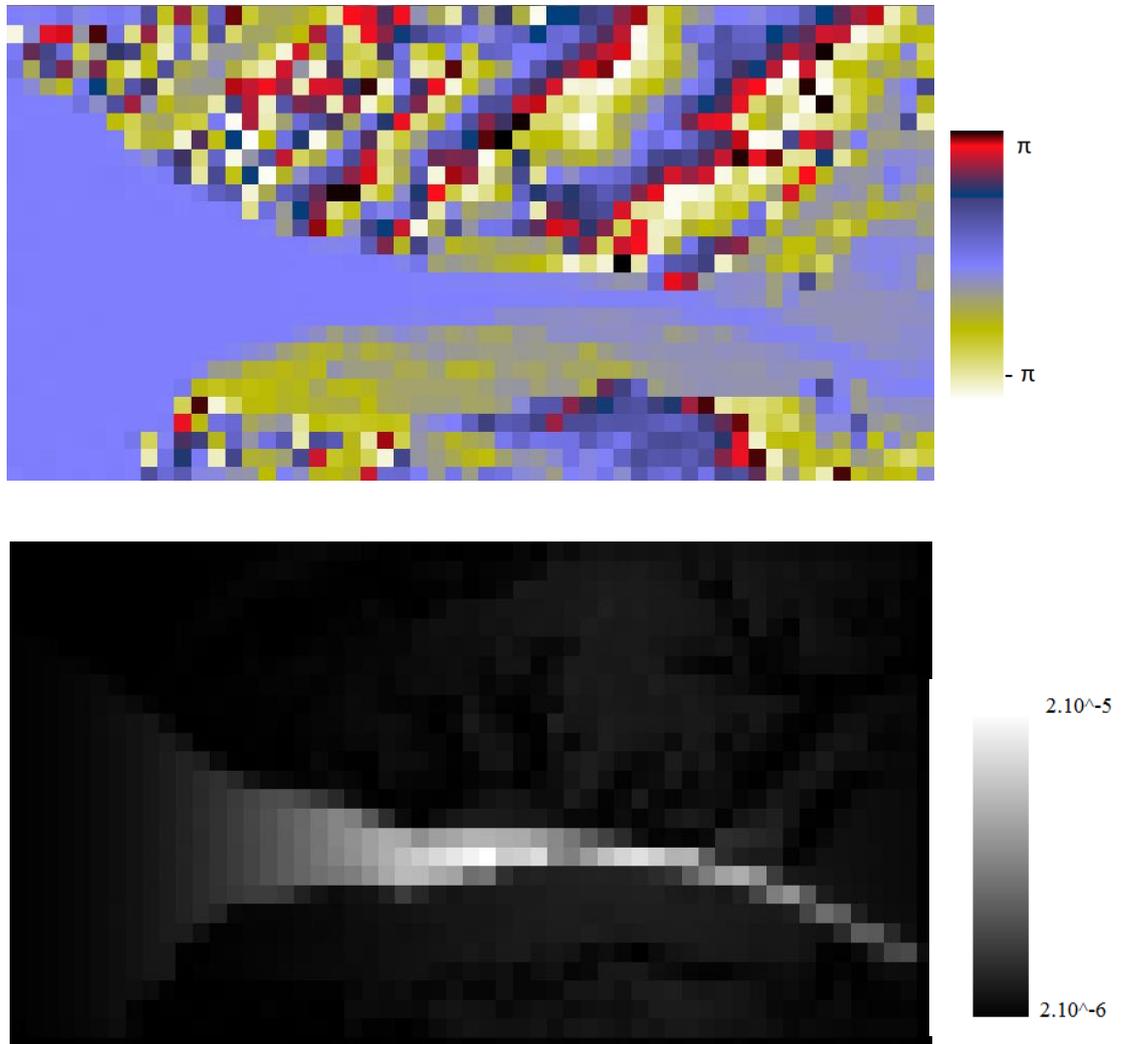


Figure 145 : Interférogramme (phase et amplitude) en géométrie sol de la scène ci-dessus, après moyennage kilométrique (vue centrale)

On procède alors à l'inversion phase-hauteur, au recalage et à la combinaison des vues (Figure 146).

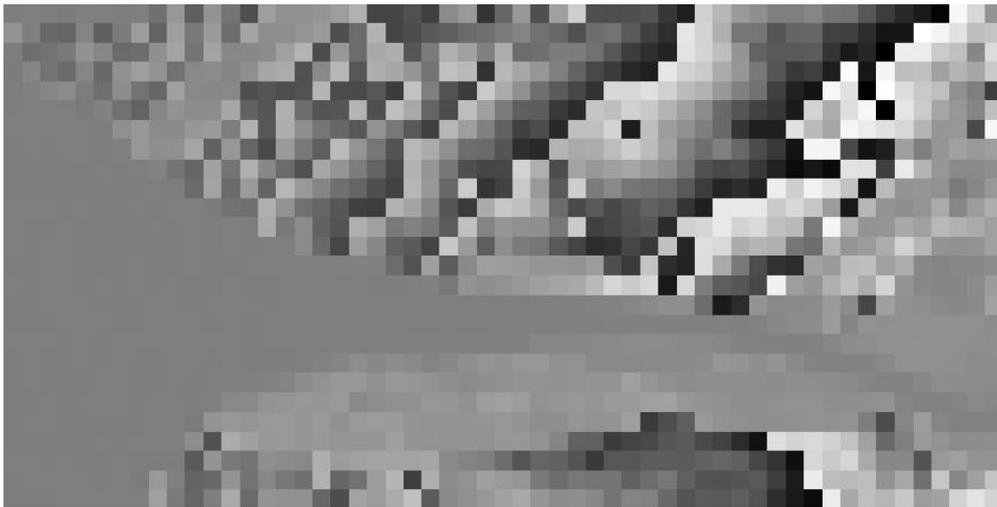


Figure 146 : Hauteurs finales restituées en mode LR après combinaison des 9 vues, seules les hauteurs sur l'eau sont valides, le déroulement n'étant pas correct sur les surfaces terrestres

Les performances altimétriques sur les surfaces d'eau sans layover (Figure 147) sur un ensemble de 10 x 10 pixels kilométriques, dont la hauteur moyenne du MNT de simulation est de -18,8 mm, montrent une hauteur moyenne de -18,6 mm pour les 9 vues combinées, pour un écart type de 13 mm (au lieu de 20 mm pour le mode HR). Sur les hauteurs géolocalisées obtenues à partir d'une seule vue (vue centrale), on obtient une hauteur moyenne de -17 mm et un écart type de 28 mm. Un gain d'un facteur 2 environ entre le traitement sur la vue centrale et le traitement sur les vues combinées simplement sans pondération est obtenu. Le traitement a été réalisé ici avec une hauteur de référence à 0 m, donc très proche de la hauteur réelle.

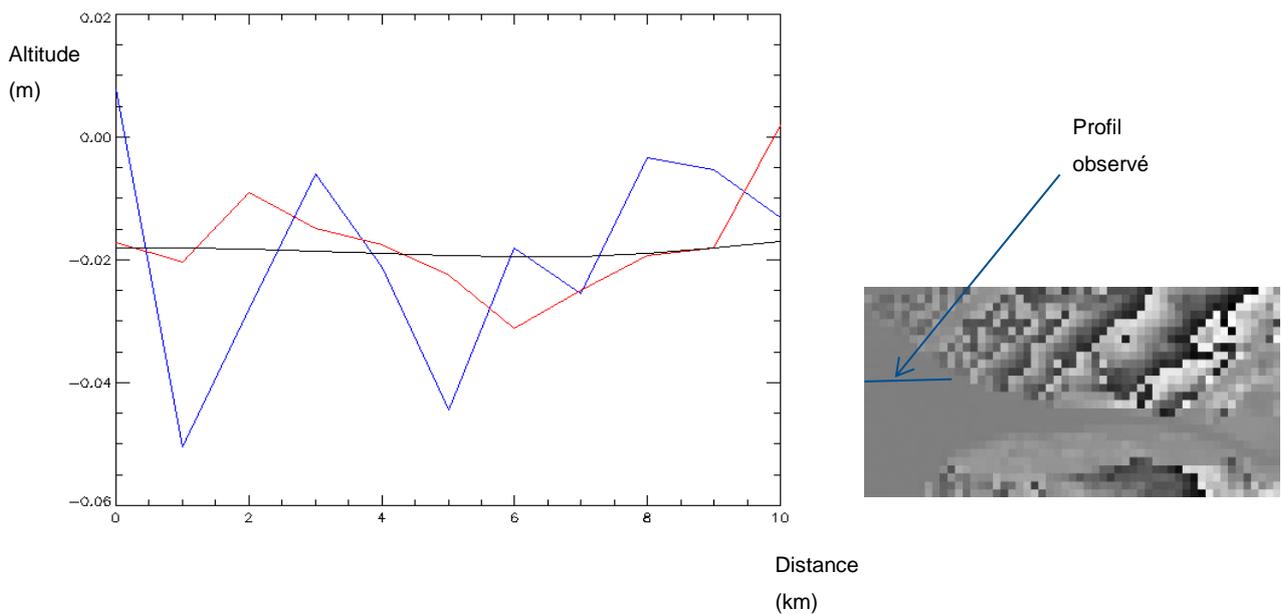


Figure 147 : Profil de hauteur, en noir la hauteur théorique du niveau d'eau, en bleu la hauteur restituée à partir de la vue centrale, en rouge la hauteur restituée à partir des 9 vues combinées

Grâce l'absence de présomption, la précision théorique attendue pour une surface donnée (ici 1 km^2) est meilleure que celle obtenue par le mode HR (après moyennage sur 1 km^2) à cause de la présomption. Celle-ci n'ayant pas été réalisée avec un filtrage optimal (cf. 3.4.1), la réduction de précision entre les deux modes est approximativement de $\sqrt{2.5}$, ce qui est cohérent avec la valeur attendue. Dans le cas où la présomption serait réalisée parfaitement, la différence entre LR et HR serait réduite.

La pollution par le layover et la distinction eau/terre ne sont pas corrigeables dans le mode LR. La résolution kilométrique des produits LR descendus entraînent également une dégradation forte de la précision sur les pixels côtiers. Ces derniers présentent une hauteur qui est irrémédiablement biaisée par la combinaison de pixels provenant à la fois de l'océan et de la terre durant le moyennage bord. C'est une des motivations pour la demande de modification des spécifications scientifiques, visant à descendre des interférogrammes échantillonnés à 250 m au lieu de 1 km^2 .

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse a essentiellement porté sur le développement d'algorithmes de restitution de hauteurs géolocalisées destinés à la future mission SWOT, ainsi que sur l'étude des différents phénomènes physiques et étapes de traitement préalables qui ont un effet déterminant sur la précision altimétrique de la mission. Comme il a été mené dans le cadre d'un projet en développement, ce travail a été largement structuré par l'avancement du projet et les réflexions de la « Science Definition Team ». L'émulation scientifique autour du traitement des données SWOT, alimentée par une double collaboration franco-américaine d'une part, et entre hydrologie et océanographie d'autre part, a permis d'aborder en un temps court des questions scientifiques variées. A contrario, le pragmatisme typique du travail en projet imposait de converger rapidement sur des stratégies de traitements réalisables à l'échelle d'un segment sol de mission. L'objet de cette conclusion est de résumer les résultats principaux obtenus dans cette thèse, mais aussi de prendre du recul sur les choix effectués : certains relèvent d'une analyse de la problématique scientifique, d'autres d'une démarche plus pragmatique visant à démontrer la faisabilité d'un traitement conforme aux exigences de performance. Nous ouvrirons enfin des perspectives à ce travail selon ces deux approches complémentaires : d'une part, nous tenterons de préconiser une stratégie de traitement pour SWOT, d'autre part nous identifierons les pistes d'approfondissement qui nous semblent les plus intéressantes à court ou moyen terme.

Revenons tout d'abord sur les acquis de cette thèse. En l'absence de données réelles représentatives de SWOT, les données simulées ont été l'outil principal de la thèse. Il a fallu développer des simulateurs détaillés et réalistes, à la fois au niveau géométrique et radiométrique. L'objectif a été de produire des outils de simulation suffisamment aboutis pour comprendre et gérer la phénoménologie de KaRIn, afin de prendre en compte l'essentiel des composantes du bilan d'erreur de la mission. Le développement de ces outils a nécessité la gestion permanente d'un compromis entre leur réalisme et leur complexité de calcul. Les différents types d'erreur, la précision et la résolution requise du MNT ou certaines simplifications sur les orbites ou les géoïdes utilisés ont été autant de points à prendre en compte. Ce simulateur a permis de guider le développement parallèle d'un simulateur chez un partenaire industriel (CLS/Altamira-Information), qui pour certains aspects va encore plus loin en représentativité (orbites et géoïdes réels, erreurs d'attitude, corrections géophysiques). Le cœur de la thèse a cependant porté sur cet élément sensible de la chaîne de traitement qu'est l'inversion de la phase en vue d'obtenir une hauteur géolocalisée. Les méthodes interférométriques classiques, et notamment le déroulement spatial, s'avèrent difficilement applicables au mode HR de SWOT. Un rapport signal à bruit faible, des structures à dérouler étroites et potentiellement

fractionnées, un très large volume de données, tous ces aspects ont conduit à envisager une approche fondée sur un déroulement pixellique.

Pour étudier la faisabilité de cette approche, nous avons élaboré un prototype d'inversion de hauteur directe pixel par pixel, utilisant des modèles numériques de terrain comme référence a priori. Ce choix d'implémentation permet en principe de s'affranchir de l'ambiguïté de phase et d'éviter la propagation d'erreur typique des méthodes de déroulement classiques. De plus, l'inversion directe permet de réduire le temps de calcul, paramètre dimensionnant pour le centre de mission qui devra assurer le traitement opérationnel des données SWOT. Elle nécessite néanmoins de s'appuyer sur un MNT de référence a priori, donc sur des produits obtenus en préalable à SWOT, et dont la qualité ne sera pas forcément homogène ni suffisante. On peut imaginer qu'après quelques cycles d'acquisitions SWOT, il sera possible de compléter et d'améliorer itérativement le MNT de référence. Plusieurs cas d'étude ont été simulés et testés sur des sites où des MNT très résolus étaient disponibles, pour tester la robustesse de la méthode et vérifier son domaine de validité. Les derniers tests menés ont utilisé des MNT très précis pour la simulation, et des données de référence issues de SRTM pour les traitements, afin de respecter le plus possible la réalité des futurs traitements SWOT. Globalement, le déroulement pixellique présente des performances satisfaisantes lorsque l'on prend des hypothèses raisonnablement optimistes, la qualité du MNT étant le facteur déterminant pour la restitution. Certains points délicats ont été identifiés et approfondis : en particulier en proche nadir, le manque de précision des données auxiliaires (MNT et hauteurs d'eau de référence) peut rendre le déroulement pixellique de la phase inefficace, même si cela n'entache pas la performance sur le reste de la fauchée. Par ailleurs, la qualité des données de référence n'est pas homogène sur tout le globe, certaines régions comme les hautes latitudes n'étant pas couvertes par SRTM.

Afin de pallier aux différentes situations d'erreur rencontrées, l'utilisation de toutes les données auxiliaires disponibles, en particulier des masques d'eau a priori et ceux extraits des données SWOT, a permis d'améliorer la méthode. L'utilisation des masques comme guide lors de la projection des données de références en géométrie radar, le recalage de ces mêmes masques avec ceux extraits directement de la donnée, ou l'utilisation de l'uniformité des surfaces d'eau, ont contribué à rendre l'approche pixellique plus robuste. Dans le cas où ces données auxiliaires restent malgré tout insuffisantes, des méthodes de déroulement locales peuvent apporter les corrections nécessaires cas d'erreur récalcitrants. En particulier, certaines zones du globe peuvent ne pas disposer de masques d'eau a priori, ou bien ceux-ci ne sont pas exploitables, en raison de leur imprécision ou des variations fortes des étendues d'eau, par exemple dans les zones humides. La gestion et l'intégration des méthodes locales de correction à apporter dans ces cas en compte dans la chaîne de traitement finale.

Le phénomène de layover est caractéristique des images SWOT du fait des faibles angles d'incidences. Les pixels d'eau pollués par le layover des berges doivent de préférence être identifiés et exclus du calcul des hauteurs et des pentes, afin d'éviter d'introduire des biais. Plusieurs approches ont été étudiées pendant la thèse. La prédiction géométrique à partir du MNT de référence est conceptuellement simple, mais très dépendante de la résolution et de la précision du MNT et des niveaux d'eau. La prise en compte de la végétation est un autre point délicat, car elle n'est généralement pas incluse dans les MNT ou n'est pas représentative de la pénétration en bande Ka à faible incidence. L'autre solution consiste à

détecter le layover directement à partir de la donnée, comme une anomalie de phase, de cohérence ou de hauteur. Cependant, le niveau de bruit thermique exige de moyennner fortement pour rendre les anomalies détectables, ce qui est rédhibitoire pour des zones de layover de petite taille.

Le déroulement pixellique et la prédiction du layover s'inscrivent dans une chaîne comportant bien d'autres étapes, dont nous avons au cours de ce projet abordé certaines, soit par nécessité de comprendre leur impact sur les caractéristiques d'erreur des images SWOT, soit comme étude d'application des outils de simulation pour le compte du projet.

Le traitement SAR a été étudié, avec les approches fréquentielles ou temporelles pour la focalisation azimut, le traitement multivue adaptatif en fonction du masque d'eau, et les erreurs liés à de mauvaises corrections des délais de propagation. Différentes études sur ces aspects, parfois en marge du sujet principal de la thèse, ont permis d'améliorer les outils de simulation et de traitement, d'aider à définir les méthodes à employer dans le cadre du développement industriel des prototypes de traitement.

Les étapes dont la qualité est dépendante de la précision des données auxiliaires, telles que la prédiction du layover ou la détection des surfaces d'eau, ont amené à définir des stratégies de traitements itératifs. En l'état actuel des connaissances, le nouveau MNT SRTM à 30 m de résolution semble être suffisant pour une partie des traitements HR, en particulier en milieu et fin de fauchée (typiquement de 25 à 60km de fauchée). Pour le déroulement de phase en début de fauchée, il conviendra d'adopter des techniques complémentaires au déroulement direct, au moins en début de mission. Pour l'estimation du layover dans les zones critiques à très faibles incidences, l'utilisation d'itérations pour mettre à jour les niveaux d'eau apportera des améliorations dans la précision des produits. De même, un retraitement en fin de mission, utilisant une bathymétrie moyenne estimée à partir des différentes mesures au cours des cycles de SWOT, permettra de prédire à nouveau les zones affectées par le layover avec une erreur fortement réduite.

Le mode LR de SWOT a été abordé à travers la problématique de l'impact sur la précision en hauteur des choix d'implémentation du traitement bord, qui nécessite des approximations spécifiques. Un prototypage simplifié de l'OBP sur la base des algorithmes proposés par le JPL a été réalisé afin de servir de support à l'étude de l'inversion phase-hauteur pour l'océan. Les différences avec le mode HR dans la restitution de hauteurs, en particulier l'étape de déroulement de phase à bord et le moyennage kilométrique (ou sur $250 \times 250 \text{m}^2$) des produits descendus au sol ont été étudiés, en particulier les aspects liés à la MSS qui est l'équivalent du MNT de référence du mode HR.

Pour le mode HR, les hauteurs obtenues à l'issue de l'algorithme d'inversion ne sont pas directement exploitables sans moyennage, du fait de leur bruit élevé tant en géolocalisation qu'en hauteur. Pour obtenir un produit résolu utilisable par les scientifiques, une approche de moyennage adapté le long des cours d'eau et des lacs a été mise au point, afin d'agglomérer de manière réaliste et physique les pixels d'eau et améliorer leur géolocalisation en vue d'estimer plus facilement les hauteurs et les pentes moyennes, ainsi que l'étendue de la surface d'eau. Suite à la présentation de cette approche à la Science Definition Team (SDT) de SWOT, il a été décidé d'ajouter dans le produit pixel cloud, d'une part les coordonnées des pixels en géométrie radar (case distance et azimut), et d'autre part une géolocalisation (lat,lon) améliorée, en plus du triplet (lat,lon,hauteur) bruité initialement prévu.

Des choix algorithmiques importants restent encore à faire dans le cadre de l'Algorithm Development Team (ADT), en particulier concernant certains éléments du traitement bas niveau (traitement SAR temporel ou traitement fréquentiel) ainsi que sur le traitement interférométrique (approche d'inversion de phase, utilisation des données auxiliaires, détection des surfaces d'eau). Des tests seront menés afin d'étudier l'impact de ces choix sur la performance des produits, en particulier la comparaison des chaînes HR end-to-end fréquentielles et temporelles dans le cas d'erreurs d'orbites réalistes.

De plus, les traitements devront être adaptés pour être testés sur des données réelles, en particulier sur les données aéroportées AirSWOT, qui peuvent apporter des informations supplémentaires sur la physique de la mesure SWOT, voire remettre en cause notre conception théorique de la question.

Du côté des simulations, la variété des scènes devra s'enrichir, en simulant des cours d'eau aux géométries particulières et sensibles. Pour cela, il sera nécessaire de disposer de vérités terrain suffisamment précises et résolues, ainsi que de modèles hydrologiques reflétant la nature de la scène.

- Les structures d'eau complexes, les cas d'inondations ou des données SWOT incomplètes sont autant de cas à étudier pour parvenir à des chaînes de traitement adaptées à tous les cas rencontrés au cours de la mission.
- Le mouvement des surfaces d'eau est un élément de simulation très important dans l'étude de performances des traitements bas niveau, en particulier la focalisation et l'estimation du Doppler, ainsi que la détection des surfaces d'eau.

L'aspect multi temporel, avec la gestion des revisites de SWOT sur la même scène, et la capacité de restituer le cycle hydrologique de la scène observée, ainsi qu'une éventuelle bathymétrie, sont également des objectifs d'études-pour la suite, à la fois dans les simulations et les traitements. De nombreux éléments de la chaîne de traitement peuvent bénéficier de cette approche, de la détection des masques d'eau à l'agrégation des produits finaux, en passant par le déroulement de phase ou la prédiction du layover. Il s'agira ici de développer des méthodes innovantes, les surfaces observées variant entre chaque acquisition, de même que la précision et la qualité des produits.

Enfin, la question des produits de plus haut niveau se posera également, et demandera une interaction forte avec les scientifiques, afin de définir les produits et les traitements les mieux adaptés à leurs besoins comme à ceux d'autres futurs utilisateurs.

LISTE DES PUBLICATIONS

Damien Desroches, Roger Fjørtoft, Didier Massonnet, Javier Duro, J-M Gaudin, Nadine Pourthie, "Inland water height estimation without ground control points for near-nadir InSAR data", GRSL, 2016

Damien Desroches, Roger Fjørtoft, "Precise geolocation of water bodies for SWOT HR mode", EUSAR, 2016

Damien Desroches, Roger Fjørtoft, J-M Gaudin, Nadine Pourthie, Didier Massonnet, Javier Duro, "SWOT HR height restitution without control points", IGARSS, 2015

François Soulat, Javier Duro, Roger Fjørtoft, Pierre Dubois, Xavier Banqué, Roberto Robledo, Damien Desroches, Jean-Marc Gaudin, Nadine Pourthie, Denis Carbonne, Nicolas Picot, "Simulation of near-nadir bistatic InSAR data in Ka-Band for the SWOT mission, IGARSS, 2015

Xavier Banqué, Javier Duro, Damien Desroches, Nadine Pourthie, Roger Fjørtoft, "River current measurements with space-borne bistatic InSAR data", EUSAR, 2014

Roger Fjørtoft, J-C Souryris, Damien Desroches, J-M Gaudin, Nadine Pourthie, Denis carbonne, Hélène Vadon, Javier Duro, Xavier Banqué, Roberto Robledo, Fifame Koudogbo, Pierre Dubois, François Soulat, "Simulation of Ka-Band Near Nadir data and water elevations representative of Karin SWOT", IGARSS 2014

Damien Desroches, Roger Fjørtoft, Nadine Pourthie, Javier Duro, Patrick Ordoqui, "Height map generation for hydrology from low incidence TanDEM-X data", 4th TanDEM-X Science Team Meeting, 2013

BIBLIOGRAPHIE

- [Akuj-1993] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin. « *Network flows: theory, algorithms, and applications* », Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, ISBN 0-13-617549-X., 1993
- [Albe-1991] G. Alberti, G. Franceschetti, V. Pascazio, G. Schirinzi, "*Time Domain Convolution of One Bit Coded Radar Signals*", Proc. IEEE, Pt. F, 138, 438-444, 1991.
- [Alsd-2007] D. Alsdorf, "*The WatER Mission*", Venice, Symposium: 15 Years of Progress in Radar Altimetry, 2006.
- [Amar-2004] L. Amarouche, P. Thibaut, O. Z. Zanife, J.P. Dumont, P. Vincent, N. Steunou, "*Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects*", Marine Geodesy, 27:171-197, 2004
- [Aviso] Site Internet Aviso : <http://www.aviso.altimetry.fr>
- [Baml-1998] R. Bamler and P. Hartl, "*Synthetic Aperture Radar Interferometry*", Inverse Problem., vol. 14, no. 1, pp. R1-R54, 1998.
- [Bart-2008] M. Bartusch, et al, "*The TanDEM-X Mission*", EUSAR 2008
- [Bois-2015] O. Boisot, "*Étude de la rétrodiffusion des surfaces d'eau en bande Ka à faible Incidence*", thèse, Université de Toulon, 2015
- [Brow-1977] G.S. Brown, "*The average impulse response of a rough surface and its applications*", Antennas and Propagation, IEEE Transactions on [legacy, pre-1988], Vol. 25, Issue 1, pp. 67-74, Jan. 1977
- [Caze-1998] A. Cazenave, L. Fu, "*Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of techniques and Applications*", International Geophysics Series 200, 69, Academic Press, 1998
- [Chap-1994] R. D. Chapman, B. L. Gotwols, and R. E. Sterner II. "*On the statistics of the phase of microwave backscatter from the ocean*", Journal of Geophysical Research, 99(C8) : 16293–16301, 1994. 97
- [Chan-1999] T. Chan and L. Vese, "*An active contour model without edges, In Scale-Space*", M. Nilsen et al. (Eds.), LNCS, vol. 1682, pp. 141–151., 1999

- [Chel-2001] D.B. Chelton, J.C. Ries, L.L. Fu, P. Callahan, “*Satellite altimetry*”, in *Satellite and earth sciences*, ed L.L. Fu and A. Cazenave, Academic Press, 2001
- [Chen-2001] C. W Chen., and Zebker, “*H. A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms*”, *Journal of the Optical Society of America*, 17, 3, 401—414, 2001
- [Chev-2014] L. Chevalier, *Caractérisation et modélisation de la variabilité hydrologique de l'estuaire de Seine dans le cadre de la future mission spatiale SWOT*. Thèse de 3ème cycle, Univ. Rouen, 362p. , 2014
- [Cipo-2014] P. Cipollini, S. Vignudelli, J. Benveniste, “*The Coastal Zone: A Mission Target for Satellite Altimeters*”, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95 (8). p72., 2014
- [Cost-1998] M. Costantini, “*A novel phase unwrapping method based on network programming*”, *IEEE Trans.Geosci.Remote Sensing*, vol. 36, pp. 813-821, May 1998.
- [Dela-2013] C.-A Deledalle, L. Denis, F. Tupin, A. Reigber and M. Jager, “*NL-SAR: a unified Non-Local framework for resolution-preserving (Pol)(In)SAR denoising*”, <hal-00844118v1>, 2013
- [DePa-2009] R. De Paulis, C. Prati, F. Rocca, S. Scirpoli, S. Tebaldini, “*Focusing Synthetic Aperture Sonar (SAS) Data with the Omega-K Technique*”, *IGARSS* , 2009
- [Dera-1995] D. Derauw, “*Phase unwrapping using coherence measurements*”, *Proc. SPIE 2584, Synthetic Aperture Radar and Passive Microwave Sensing*, 319, 1995
- [DLR-2012-a] DLR, TanDEM-X Payload Ground Segment, “*CoSSC Generation and Interferometric Considerations*”, *Remote Sensing Technology Institute*, 2012
- [DLR-2012-b] DLR, TanDEM-X Ground Segment, “*TanDEM-X Experimental Product Description*”, *Remote Sensing Technology Institut*, 2012
- [Dubo-2011] P. Dubois. “*Impact de l'état de la mer sur la mesure d'élévation des futurs instruments altimétriques*”, *PhD Thesis, Université de Toulouse*, 2011
- [Duro-2010] J. Duro, “*Development of new methodologies for the detection, measurement and on going monitoring of ground deformation using spaceborne SAR data*”, *PHD*, 2010

- [Duro-2014] J. Duro, Xavier Banqué, Roberto Robledo, Fifame Koudogbo, Roger Fjørtoft, Damien Desroches, Nadine Pourthie, Jean-Marc Gaudin, Pierre Dubois, François Soulat, “*Simulation of near-nadir high resolution InSAR data in Ka-band for the SWOT mission*”, EUSAR Berlin, 2014
- [Eine-1998] M. Eineder, M. Hubig, and B. Milcke “*Unwrapping large interferograms using the minimum cost flow algorithm*”, Proc. IGARSS 98, Seattle, WA, 1998, pp. 83-87.
- [Eine-2008] M. Eineder, T. Fritz, J. Mittermaye, A. Roth, E. Boerner, H. Breit, “*TanDEM-X Ground Segment, DEM Products Specification Document*”, DLR, 2008
- [Eine-2005] M. Eineder, A. Nico. “*A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model*”, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 43, no. 1 : 24-36., 2005
- [Elac-1980] C. Elachi, “*Spaceborne Imaging Radar: Geologic and Oceanographic Applications*”, Science, vol. 209, No. 4461, pp. 1073–1082., 1980
- [Enro-2006] V. Enjolras, P. Vincent, J.-C. Souyris, E. Rodriguez, L. Phalippou and A. Cazenave, “*Performances Study of Interferometric Radar Altimeters: from the Instrument to the Global Mission Definition*”, Sensors, 6, 164-192, 2006
- [Enro-2007] V. Enjolras, *Evaluation des performances des nouveaux instruments radar altimètres imageurs interférométriques spatiaux – application à l’océanographie et à l’hydrologie*, Ph.D. thesis, SDU2E UT3 UPS, Toulouse, Toulouse, 2007a.
- [Feno-2000] Fenoglio-Marc, L., 2000 “*Analysis and representation of regional sea-level variability from altimetry and atmospheric–oceanic data*”, Geophysical Journal International, 2000
- [Ferr-1999] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca. “*Multibaseline INSAR DEM reconstruction: the wavelet approach.*” IEEE TGRS. vol. 37, pp. 705 – 715, 1999
- [Ferr-2001] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, “*Permanent scatterers in SAR interferometry,*” IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 39, pp. 8–20, 2001
- [Fjør-1998] R. Fjørtoft, A. Lopès, P. Marthon and E. Cubero-Castan, “*An optimal multiedge detector for SAR image segmentation*”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 36, No. 3, 1998
- [Fjør-1999] R. Fjørtoft, “*Segmentation d’images radar par detection de contours*”, pp. 29-37, PHD, 1999.

- [Fjør-2003] R. Fjørtoft, Y. Delignon, W. Pieczynski, M. Sigelle, and F. Tupin, “*Unsupervised classification of Radar images using hidden markov chains and hidden Markov random fields*”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. 41, No. 3, 2003
- [Fjør-2014] R. Fjørtoft, J.M. Gaudin, N. Pourthié, J.C Lalaurie, A. Mallet, J.F. Nouvel, J. Martinot-Lagarde, H. Oriot, P. Borderies, C. Ruiz, S. Daniel, “*KaRIn on SWOT, Characteristics of Near-Nadir Ka-Band Interferometric SAR Imagery*”, IEEE Trans.Geosci. Remote Sensing, Vol 52., No. 4, April 2014
- [Fu-2000] L. Fu, A. Cazenave, “*Satellite Altimetry and Earth Sciences, A Handbook of Techniques and Applications*”, Academic Press, 2000
- [Fu-2012] L. Fu, D. Alsdorf, R. Morrow, E. Rodríguez, and N. Mognard, eds., *SWOT: The Surface Water and Ocean Topography Mission: Wide-Swath Altimetric Measurement of Water Elevation on Earth*, No. JPL-Publication 12-05, Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2012.
- [Gabr-1989] Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. and Zebker, H.A. (1989). “*Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry*”. Journal of Geophysical Research 94: doi: 10.1029/89JB00516. issn: 0148-0227., 1989
- [Gatt-1994] F. Gatelli, A. Monti Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, and F.Rocca, “*The wavenumber shift in SAR interferometry*”, IEEE Trans.Geosci. Remote Sensing, vol. 32, pp. 855-865, 1994.
- [Ghig-1994] D.C Ghiglia and L.A Romero, “*Robust two-dimensional weight and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iteratives methods*”, Optical Society of America, 1994
- [Gold-1988] R.M Goldstein, H.A Zebker and C.L. Werner, “*Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping,*” Radio Science, 1988
- [Good-1976] J.W. Goodman, “*Some fundamental properties of speckle*”, J. Opt. Soc. Am., 66, pp. 1145-1150, 1976
- [Gomm-2011] C. Gommenginger, P. Thibaut, L. fenoglio-Marc, G. Quartly, X. Deng, J. Gomez-Enri, P.Challenor and Y.Gao, “*Retraking altimeter near the coasts*”, Coastal altimetry, Springer Verlag, Berlin, 2011
- [Hali-2013] A. Halimi. “*De l'altimétrie conventionnelle à l'altimétrie SAR/Doppler*”, Signal and Image Processing. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2013

- [Hans-1999] R. Hanssen and R. Bamler, "Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry." *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 37(1): 318-32, 1999
- [Hans- 2001] R. Hanssen, "Radar interferometry : Data interpretation and error analysis." PhD Thesis., 2001
- [Jayl-2002] C. Jayles, J.P. Berthias, D. Laurichesse, S. Nordine, P. Cauquil, G. Tavernier, "DORIS-DIODE : two years results of the first European Navigator", *Advances in Space Research*, Vol. 30, Issue 2, p. 301-306, 2002
- [Just-1994] D. Just & R. Bamler, *Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar*. *Appl. Opt.*, 33(20), 4361–4368., 1994
- [Kamp-2005] B. M. Kampes, "Radar interferometry: Persistent scatterer technique" Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2005
- [Kase-2002] T. Kasetkasem and P. K. Varshney, "An image change detection algorithm based on Markov random fields models," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(8), pp. 1815-1823, 2002.
- [Krie-2007] G. Krieger, Member, IEEE, A. Moreira, Fellow, H. Fiedler, I. Hajnsek, M. Werner, Marwan Y. M. Zink, *TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry*, IEEE, November 2007
- [Lach-2008] M. Lachaise, T. Fritz, and M. Eineder, "A new dual baseline phase unwrapping algorithm for the TanDEM-X Mission", *Proc. EUSAR 2008*, Friedrichshafen, 2008
- [Lach-2012-a] M. Lachaise, T. Fritz, U. Balss, R. Bamler, M.Eineder, "Phase Unwrapping correction with dual baseline data for the TanDEM-X mission", *Remote Sensing Technology Institute IMF*, 2012
- [Lach-2012-b] M. Lachaise, U. Balss, T. Fritz, and H. Breit, "The dual baseline interferometric processing chain for the TanDEM-X mission", *Proc. IGARSS 2012*, Munich, 2012
- [Lamb-2010] J. Lambin, R. Morrow, L. Fu, J. K. Willis, H. Bonekamp, J. Lillibridge, J. Perbos, G. Zaouche, P. Vaze, W. Bannoura, F. Parisot, E. Thouvenot, S. Coutin-Faye, E. Lindstrom and M. Mignogno "The OSTM/Jason-2 Mission", *Marine Geodesy*, Vol. 33, Supplement 1, 2010
- [Lebe-1990] F. Leberl, *Radargrammetric Image Processing*, Artech House, Norwood, 1990
- [Li-1985] F.K. Li, D.N. held, J. Curlander, C.Wu "Doppler parameter estimation for Synthetic Aperture Radar", *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, vol. GE-23, no.1, pp. 47-56, Jan.1985

- [Li-1990] F.K. Li, and Goldstein, R.M., “*Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. Geoscience and Remote Sensing*”, IEEE Transactions on, 28(1): 88-97., 1990.
- [Lin-1994] Q. Lin, J. F. Vesecky, and H. A. Zebker, “*Phase Unwrapping Through Fringe-Line Detection in Synthetic Aperture Radar Interferometry*”, Applied Optics, vol. 33, pp. 201-208, 1994.
- [Lion-2013] C. Lion, “*Simulation des données SWOT haute résolution et applications à l'étude de l'estuaire de l'Amazonie*”, PhD thesis, 2013
- [Loho-2001] C. Lohou, “*Contribution à l'analyse topologique des images : étude d'algorithmes de squelettisation pour images 2D et 3D, selon une approche topologique digitale ou topologique discrète*”, thèse de doct., Université de Marne-la-Vallée, déc. 2001.
- [Mads-1989] S.N. Madsen. “*Estimating the Doppler Centroid of SAR Data*”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol 25(2):pp 134-140, March 1989.
- [Mars-1995] G. de Marsily, “*L'eau*”, Dominos Flammarion, 1995
- [Mass-1993] D. Massonnet and T. Rabaute, “*Radar interferometry : limits and potential. Geoscience and Remote Sensing*”, IEEE Transactions on, 31(2), 455–464, 1993
- [Mass-1993] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, G. Peltzer, K. Feigl et F. Adragna, “*The displacement field in the year after the Landers earthquakes*”, Nature, 364, pp. 138-142
- [Mass-1994] D. Massonnet, K. Feigl, M. Rossi and F. Adragna, “*Radar interferometric mapping of deformation in the year after the landers earthquake*”, Nature, 369(6477), 227–230, 1994
- [Mass-1996] D. Massonnet and F. Adragna, “*Description of the DIAPASON software developed by CNES current and future applications*”, Fringe 96, 1996
- [Mass-1998] D. Massonnet and K. L. Feigl, “*Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface*”, Rev. Geophys., 36(4), 441–500, 1998.
- [Mass-2008] D. Massonnet and J. Souyris, “*Imaging with synthetic aperture radar*”, Editions EPFL Press, Lausanne, 2008.
- [Mena-2003] Y. Ménard, L. Fu, P. Escudier, F. Parisot, J. Perbos, P. Vincent, S. Desai, B. Haines and G. Kunstmann, “*The Jason-1 Mission Special Issue: Jason-1 Calibration/Validation*”, Marine Geodesy, Vol. 26, Issue 3-4, 2003

- [Milm-1993] A.S. Milman, "SAR Imaging by $w - k$ Migration", International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no. 10, pp. 1965-1979, 1993.
- [Moll-2011] D. Moller, S. Hensley, G. A. Sadowy, C. D. Fisher, T. Michel, M. Zawadzki, and E. Rignot, "The Glacier and land ice surface topography interferometer: An airborne proof-of-concept demonstration of high precision Ka-band single-pass elevation mapping", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 49, no. 2, pp. 827–842, Feb. 2011.
- [Moll-2014] D. Moller and D. Esteban-Fernandez. "Near-Nadir Ka-band Field Observations of Freshwater Bodies, in Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle." JohnWiley & Sons, Inc, 2014
- [Nouv-2008] J. Nouvel, P. Dubois-Fernandez, P. Kosuth and Y. Lasne, "Along track interferometry on Rhone River", in Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Symp., Boston, MA, Jul. 6–11, vol. 5, pp. 495–497, 2008
- [Path-2003] E. Pathier, "Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan", PhD thesis, 2003
- [Pitz-2006] W. Pitz, « The TerraSAR-X Satellite », EUSAR, 2006
- [Prat-1990] C. Prati, F. Rocca, A. Monti Guarnieri, E. Damonti, 1990, "Seismic migration for SAR focusing: Interferometrical applications", IEEE Transactions on GARS, Vol.28, N.4, pp.627-640.
- [Rane-1998] R. K. Raney, "The delay/Doppler radar altimeter", IEEE Trans. Geosci. And Remote Sensing, 36(5) 1578-1588, Sept. 1998
- [Remy-2003] D. Remy, S. Bonvalot, P. Briole, and M. Murakami, "Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from sar interferometry data : application to sakurajima volcano (japan)", Earth and Planetary Science Letters, 213(3-4), 299–310, 2003
- [Rich-2007] M. Richards, "A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing", IEEE A & E Systems Magazine, vol. 22, no 9, ISBN 0018-9251, 2007
- [Rich-2008] J. Richard, B. Durand, F. Robert, N. Taveneau, "Altika Instrument for Space Altimetry with Improved Performances and Ocean Sampling : Development Status and First Test Results", Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008
- [Rodr-1992] E. Rodriguez and J. M. Martin, "Theory and design of interferometric synthetic aperture radars," Proc. Inst. Elect. Eng. F, vol. 139, pp.147–159, Apr. 1992.

- [Rodr-1999] E. Rodríguez, B.D. Pollard, J.M. Martin, “*Wide-Swath Ocean Altimetry Using Radar Interferometry*”. Submitted to IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Unpublished, 1999.
- [Rodr-2011] E. Rodriguez, “*Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT) : Science Requirements Document*”, second release, JPL, 2011
- [Roge-1969] A. E. E. Rogers, R. P. Ingalls, “*Venus: Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry*”, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Lexington 02173, 1969
- [Rome-2000] R. Romeiser and D.R. Thompson, “*Numerical Study on the Along-Track Interferometric Radar Imaging Mechanism of Oceanic Surface Currents*”, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No.1, pp. 446-458, 2000
- [Rome-2007] R. Romeiser, H. Runge, S. Suchandt, J. Sprenger, H. Weilbeer, A. Sohrmann, and D. Stammer, “*Current measurements in rivers by space-borne along-track InSAR*”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 12, pp. 4019–4031, Dec. 2007
- [Rome-2010] R. Romeiser, S. Suchandt, H. Runge, U. Steinbrecher, and S. Grünler, “*First Analysis of TerraSAR-X Along-Track InSAR-Derived Current Fields*”, *IEEE TGRS*, vol. 48, no. 2, 2010
- [Rome-2014] R. Romeiser, H. Runge, S. Suchandt, R. Kahle, C. Rossi, and P. S. Bell, “*Quality Assessment of Surface Current Fields From TerraSAR-X and TanDEM-X Along-Track Interferometry and Doppler Centroid Analysis*”, *IEEE TGRS*, vol. 48, no. 2, 2014
- [Sant-2007] M. Santoro, C. Werner, U. Wegmüller and O. Cartus, “*Improvement of interferometric SAR coherence estimates by slope-adaptive range common band filtering.*” *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 23–28 July 2007, Barcelona, Spain, pp. 129–132., 2007
- [Scar-2004] R. Scharroo, J. Lillibridge, and W.H.F. Smith, “*Cross-calibration and long-term monitoring of the Microwave Radiometers of ERS, Topex, GFO, Jason-1 and Envisat*”, *Marine Geodesy*, 97, 2004
- [Trou-1996] E. Trouvé, “*Imagerie interférentielle en radar à ouverture synthétique*”, PhD thesis, 1996
- [Tupi-1998] F. Tupin, H. Maitre, J-F. Mangin, J-M. Nicolas, and E. Pechersky, “*Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction,*” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 2, pp. 434–453, Mar. 1998.

- [Tupi-2014] F. Tupin, J-M Nicolas, J. Inglada, *Imagerie de télédétection*, Hermes Science Publications, p.258, 2014
- [Ulab-1986] F. T. Ulaby and A. Goetz, “*Remote Sensing Techniques*”, in *The Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press, 1986.
- [Ulab-1989] F. T. Ulaby and M. C. Dobson, “*Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain.*” Boston, MA, USA: Artech House, 1989.
- [Vand-2004] D. Vandermark, B. Chapron, J. Sun, G. H. Crescenti, and H. C. Graber, “*Ocean wave slope observations using radar backscatter and laser altimeters,*” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 34, no. 12, pp. 2825–2842, 2004.
- [Vinc-2006] P. Vincent, N. Steunou, E. Caubet, L. Phalippou, L. Rey, E. Thouvenot and J. Verron, “*AltiKa: a Ka-band Altimetry Payload and System for Operational Altimetry during the GMES Period*”, *Sensors*, 208-234, 2006
- [Wern-2000] M. Werner, *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, Proceedings of EUSAR 2000, pp. 209.
- [Will-2015] B. Williams, “SWOT phase averaging and the pixel cloud”, presentation à la SDT à Toulouse en Juin 2015
- [Zack-2000] A.I. Zakharov and P.V. Tugarinov, “*On the use of FFT for phase unwrapping of interferogram with poor quality*”, Proc. of EUSAR 2000, pp. 509-511, Munich, Germany, May 23–25, 2000
- [Zebk-1986] H. A Zebker and R. M. Goldstein, “*Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations*”, *J. Geophys. Res.*, 91(B5), 4993–4999., 1986
- [Zebk-1994] H. A Zebker, C. L. Werner, P. A. Rosen and S. Hensley, “*Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar*”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 32(4), 823–836., 1994
- [Zebk-1998] H. A Zebker and Y. Lu, “*Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms*”, *J. Opt. Soc. Am. A*, 15(3), 586–598., 1998
- [Zisk-1978] S. H. Zisk, “*Mare Crisium Area Topography: A Comparison of Earth-Based Radar and Apollo Mapping Camera Results*”, accepted for publication in *Mare Crisium: The View From Luna 2.*, 1978

GLOSSAIRE

DBS	Doppler Beam Sharpening	Traitement bord non focalisé
ERS	European Remote Sensing satellite system	
Far-range		Fin de fauchée (dernière colonne de l'image)
FFT	Fast Fourier Transform	Transformée de Fourier discrète
FIR	RIF	Réponse impulsionnelle finie
HR mode	High Rate mode	Mode de fonctionnement hydrologique
KaRIn	KA Radar Interferometer	Interféromètre radar en bande Ka
Land-cover		Masque d'occupation du sol
Layover		Phénomène d'inversion géométrique dû à l'échantillonnage en distance des images Radar
mNGF		Unité de mesure (mètre nivellement général de la France)
Monovue		Image non moyennée
Multivue		Image après moyenne incohérente
MSS	Mean Sea Surface	Surface de mer moyenne
Near-range		Début de fauchée (première colonne de l'image)
LR mode	Low Rate mode	Mode de fonctionnement océanique
PDF	Probability Density Function	Fonction de densité de probabilité
PRF	Pulse Repetition Frequency	Fréquence de répétition des impulsions Radar
PRI	Pulse Repetition Interval	Inverse de la PRF
Produits niveau L0		Données brutes
Produits niveau L1		Données focalisées
Produits niveau L2		Hauteurs géolocalisées
POD	Precise Orbit Determination	
PTR	Point Target Response	Réponse impulsionnelle
SAR	Synthetic Aperture Radar	Radar à synthèse d'ouverture
SER		Surface équivalente Radar

SNR	Signal to Noise Ratio	Rapport signal à bruit
SSH	Sea Surface Height	Hauteur de la surface océanique
SLA	Sea Level Anomaly	Variabilité océanique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	
SWOT	Surface Water and Ocean Topography	
WatER	Water Elevation Recovery satellite mission	
WSOA	Wide Swath Ocean Altimeter	
Zero-padding		Traitement fréquentiel visant à sur-échantillonner un signal

Résumé

La mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography), menée par le CNES et le JPL et dont le lancement est prévu pour 2020, marque un tournant majeur pour l'altimétrie spatiale, à la fois en océanographie et en hydrologie continentale. Il s'agit de la première mission interférométrique SAR dont l'objectif spécifique est la mesure de la hauteur des eaux. L'instrument principal de la mission, KaRIn, un radar interférométrique en bande Ka, présente des caractéristiques particulières : angle de visée proche du nadir (0.6 à 3.9°), faible longueur d'onde (8.6 mm) et courte base stéréoscopique (10 m). Ces spécificités techniques entraînent des particularités propres à SWOT, à la fois en termes de phénoménologie et de traitement des données. Par ailleurs, du fait de la nature et du grand volume des données, de nouvelles méthodes de traitement sont envisagées, qui se distinguent de celles des missions interférométriques antérieures. Pour le mode « Low Rate » (LR) dédié à l'océanographie, une grande partie du traitement se déroulera à bord pour limiter le volume de données à transmettre au sol. Le mode « High Rate » (HR) visant principalement l'hydrologie continentale, présente lui aussi des originalités en termes de traitement, essentiellement réalisé au sol, de par la grande diversité de structure des surfaces d'eau qui seront observées. Pour les deux modes, la stratégie d'inversion de la phase en hauteurs géolocalisées ne peut être calquée sur celles des missions antérieures, fondées sur le déroulement spatial de la phase interférométrique. L'approche retenue est d'utiliser, autant que possible, un modèle numérique de terrain (MNT) de référence pour lever l'ambiguïté de phase et procéder directement à l'inversion de hauteur. Ceci permet à la fois de gagner en temps de traitement et de s'affranchir de l'utilisation des points de contrôle, difficiles à obtenir sur les océans comme sur les continents, du fait des variations de niveau d'eau et un rapport signal à bruit très faible sur les zones terrestres. Dans les cas où la précision du MNT de référence n'est pas suffisante pour assurer correctement le déroulement de la phase, des méthodes visant à détecter et réduire les erreurs sont proposées. Afin de faciliter l'utilisation des hauteurs géolocalisées issues de la phase l'interférométrique en mode HR, nous proposons une méthode qui permet d'améliorer considérablement la géolocalisation des produits, sans dégrader l'information de hauteur d'eau.

Mots clefs : Altimétrie, interférométrie, radar, déroulement de phase, inversion phase-hauteur, SWOT.

Abstract

The SWOT mission (Surface Water and Ocean Topography), conducted by CNES and JPL, and scheduled for launch in 2020, is a major step forward for spaceborne altimetry, both for oceanography and continental hydrology. It is the first interferometric SAR mission whose specific objective is the measurement of water surface height. The main instrument of the mission, KaRIn, a Ka-band Radar Interferometer, has particular characteristics: very low incidence angle (from 0.6 to 3.9°), short wavelength (8.6 mm), and short baseline (10 m). This technical configuration leads to properties that are specific to SWOT, both in terms of phenomenology and data processing. Moreover, due to the nature and the huge volume of data, new processing methods, different from those used in previous interferometric mission, are considered. For the Low Rate (LR) mode dedicated to oceanography, a large part of the processing will take place onboard to limit the data volume transmitted to ground. The High Rate (HR) mode, mainly targeting continental hydrology, also present original characteristics in terms of processing, essentially conducted on ground, due to the large diversity in the structure of the observed water surfaces. In both modes, the strategy for conversion of phase into geolocated heights cannot be directly based on those of previous missions, relying on spatial phase unwrapping. The approach retained here is to use, as far as possible, a reference Digital Terrain Model (DTM) to remove the phase ambiguity and proceed directly to height inversion. This allows both to reduce the computing time and to avoid the need for ground control points, which are difficult to obtain both over oceans and continental surfaces, due to varying water level and very low signal-to-noise ratio over land. For cases where the precision of reference DTM is not good enough to ensure a correct phase unwrapping, methods to detect and reduce the errors are proposed. To facilitate the use of the geolocated heights derived from the interferometric phase in HR mode, we propose a method that permits to significantly improve the geolocation of the products, without degrading the water height information.

Keywords: Altimetry, interferometry, radar, phase unwrapping, phase-to-height conversion, SWOT.