



HAL
open science

Génération de MNT d'une zone montagneuse par radargrammétrie et approche multi-échelle

Franck Fayard

► **To cite this version:**

Franck Fayard. Génération de MNT d'une zone montagneuse par radargrammétrie et approche multi-échelle. Electronique. INSA de Rennes, 2010. Français. NNT: . tel-00820847

HAL Id: tel-00820847

<https://theses.hal.science/tel-00820847>

Submitted on 6 May 2013

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



THESE INSA Rennes présentée par
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne **Franck Fayard**
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'INSA DE RENNES **ECOLE DOCTORALE : MATISSE**
Spécialité : Electronique **LABORATOIRE : IETR-INSA**

**Génération de
MNT d'une zone
montagneuse par
radargrammétrie et
approche multi-fenêtre**

Thèse soutenue le 08.02.2010
devant le jury composé de :

René Garello

Professeur, Télécom Bretagne / président

Jean-Marie Nicolas

Professeur, Télécom ParisTech / rapporteur

Yide Wang

Professeur des Universités, Polytech'Nantes / rapporteur

Reynald Dumont

Directeur de projets, Groupe OPEN Rennes / examinateur

Stéphane Méric

Maître de Conférences, IETR Rennes / co-encadrant

Eric Pottier

Professeur des Universités, IETR Rennes / Directeur de thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Eric Pottier, pour m'avoir introduit dans l'équipe SAPHIR (SAR, Polarimétrie, Holographie, Interférométrie, Radargrammétrie). Je serai toujours admiratif de la cohésion et du dynamisme qui règne dans cette équipe et je suis honoré d'avoir eu la possibilité de vivre l'aventure radargrammétrique dans ces bonnes conditions. Je remercie également Daniel Thouroude, directeur de l'IETR, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire durant ces quelques années et de m'avoir permis ainsi de réaliser mes travaux de recherche.

Mes remerciements se tournent également envers René Garello qui a accepté de présider le jury lors de ma soutenance, ainsi que Yide Wang et Jean Marie Nicolas qui se sont investis en tant que rapporteurs. Je suis flatté de l'attention qu'ils ont su apporter à la lecture de mon manuscrit de thèse. Les remarques et questions soulevées lors de nos différents échanges ont été constructives et encourageantes : cela m'a permis d'éclairer mon travail et d'améliorer mon manuscrit.

Je tiens à témoigner mon estime envers Reynald Dumont qui m'a incité à débiter un travail de thèse alors qu'il était mon maître de stage. C'est grâce à lui que j'ai pu saisir cette opportunité et je lui en suis reconnaissant. Je suis donc ravi qu'il ait accepté de faire partie de mon jury de thèse.

J'adresse toute ma gratitude à Stéphane Méric, mon encadrant, qui a réussi à me supporter (dans les deux sens les plus communs du terme) pendant ces quelques années. C'est un homme de cœur et d'esprit qui m'a toujours prodigué de bons conseils. Il s'est énormément investi à mes côtés alors je le remercie sincèrement pour son implication, pour sa patience et pour avoir cru en moi jusqu'au bout.

J'aimerais remercier également tous les SAPHIRiens, qu'ils soient encore présents dans les locaux de l'IETR ou bien partis vers de nouvelles aventures scientifiques. J'adresse un petit clin d'œil particulier à : Paul, Maxim, Shaharyar, Stéphane, Nicolas, Stefan, Olivier, Yué, Vishal, sans oublier bien sûr Sandrine alias Miss Comité des Fêtes. Merci aussi à Joëlle pour sa disponibilité et sa rapidité à traiter nos requêtes. Merci également à Laurent pour m'avoir dépanné en cette fin de thèse. Je pense qu'Eric ne peut que se féliciter d'encadrer une équipe aussi soudée, que ce soit sur le plan professionnel ou humain.

Enfin, je remercie mes parents, mes deux filles Rachel et Léane pour ces moments de joie, ainsi que mes amis qui ont su m'épauler dans les moments difficiles : Emeric, Jérôme, Mickaël, Christine, David, Juliette, Ludivine, Benjamin et Guillaume. Je termine en remerciant toutes les personnes (que je n'ai pas citées mais qui se reconnaîtront) qui m'ont fait confiance et qui ont participé à mon épanouissement personnel et professionnel.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 1 |
| I Imagerie radar et radargrammétrie | 5 |
| 1 Le radar à ouverture synthétique | 7 |
| 1.1 Généralités | 7 |
| 1.1.1 Fréquences d'émission | 9 |
| 1.1.2 Polarisation de l'onde | 10 |
| 1.1.3 Missions en imagerie radar | 10 |
| 1.2 Traitement du signal pour imagerie radar | 14 |
| 1.2.1 Formation de l'image | 15 |
| 1.2.2 Résolution en distance | 16 |
| 1.2.3 Résolution en azimut | 17 |
| 1.2.4 Corrections de l'image radar | 18 |
| 1.3 Interprétation de l'image radar | 19 |
| 1.3.1 Distorsions d'une image radar | 21 |
| 1.3.1.1 Phénomène d'ombre | 21 |
| 1.3.1.2 Phénomènes de compression et de recouvrement | 21 |
| 1.3.1.3 Phénomènes d'inversion ou de repliement | 21 |
| 1.3.2 Modélisation géométrique de la prise de vue | 22 |
| 1.3.3 Informations géographiques d'une image radar | 24 |
| 1.3.3.1 Positions radar et positions image | 24 |
| 1.3.3.2 Courbe d'iso-distance et cône Doppler | 25 |
| 1.3.4 Radiométrie des images ROS | 26 |
| 1.3.4.1 Mécanismes de rétrodiffusion | 27 |
| 1.3.4.2 Phénomène de speckle | 30 |
| 1.4 Conclusion | 31 |
| 2 Radargrammétrie | 33 |
| 2.1 Méthodes d'extraction de relief en imagerie ROS | 33 |
| 2.1.1 Définition | 33 |
| 2.1.2 Etat de l'art | 33 |
| 2.1.2.1 Interférométrie | 34 |
| 2.1.2.2 Polarimétrie | 36 |
| 2.1.2.3 Radarclinométrie | 36 |
| 2.1.2.4 Stéréoscopie - Radargrammétrie | 37 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.2 | Bases théoriques de la radargrammétrie | 39 |
| 2.2.1 | Principe | 39 |
| 2.2.1.1 | La mise en correspondance | 40 |
| 2.2.1.2 | La mesure de la différence de disparités | 40 |
| 2.2.1.3 | La reconstruction du relief | 40 |
| 2.2.2 | Configurations de prise de vue | 41 |
| 2.2.3 | Localisation mono-scène et multi-scènes | 43 |
| 2.2.3.1 | Principe | 43 |
| 2.2.3.2 | Équations | 43 |
| 2.2.3.3 | Résolution d'un système d'équations non-linéaires | 44 |
| 2.2.4 | Reconstruction géométrique à partir des disparités | 44 |
| 2.3 | Chaîne radargrammétrique | 45 |
| 2.3.1 | Appariement par corrélation | 46 |
| 2.3.1.1 | Principe | 46 |
| 2.3.1.2 | Mise en défaut de la corrélation | 46 |
| 2.3.2 | Améliorations de la corrélation | 47 |
| 2.3.2.1 | Réduction de la zone de recherche | 47 |
| 2.3.2.2 | Critère de corrélation adapté aux images radar | 47 |
| 2.3.2.3 | Modélisation d'un problème sous contraintes | 48 |
| 2.3.2.4 | Autres pistes d'amélioration | 48 |
| 2.3.3 | L'approche pyramidale | 49 |
| 2.3.4 | Effets du speckle | 50 |
| 2.3.5 | Interpolation du MNT | 51 |
| 2.4 | Conclusion | 51 |
| II Analyse et développement d'une chaîne radargrammétrique | | 53 |
| 3 Précision de la reconstruction stéréoscopique | | 55 |
| 3.1 | Introduction | 55 |
| 3.2 | Études sur les précisions en radargrammétrie | 55 |
| 3.3 | Reconstruction et précision | 57 |
| 3.3.1 | Formules de reconstruction | 57 |
| 3.3.2 | Erreurs de reconstruction | 58 |
| 3.4 | Simulation d'images ROS | 59 |
| 3.4.1 | Description des paramètres de mission | 59 |
| 3.4.2 | Description de la scène radar | 60 |
| 3.5 | Précision de reconstruction sur images simulées | 61 |
| 3.5.1 | Angle de visée de référence fixe | 62 |
| 3.5.2 | Variation de l'angle de visée de référence | 64 |
| 3.5.3 | Conclusion sur le choix d'une configuration | 64 |
| 3.6 | Conclusion | 65 |
| 4 Développement d'une chaîne radargrammétrique | | 67 |
| 4.1 | Introduction | 67 |
| 4.2 | Description des images SIR-C | 68 |
| 4.3 | Définition de la géométrie de prise de vue | 71 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3.1 | Évaluation des trajectoires du satellite | 71 |
| 4.3.2 | Détermination des courbes épipolaires et de la zone de recherche | 72 |
| 4.3.3 | Utilisation de points d'amer | 77 |
| 4.4 | Chaîne radargrammétrique | 79 |
| 4.4.1 | Processus d'appariement | 79 |
| 4.4.1.1 | Obtention de la disparité | 80 |
| 4.4.1.2 | Filtrage du <i>speckle</i> | 83 |
| 4.4.1.3 | Approche multi-échelle | 84 |
| 4.4.2 | Localisation multi-scènes dans le repère géocentrique | 87 |
| 4.4.2.1 | Equations de localisation multi-scènes | 88 |
| 4.4.2.2 | Résolution de la localisation multi-scènes, configuration 1 | 90 |
| 4.4.2.3 | Résolution de la localisation multi-scènes, configuration 2 | 93 |
| 4.5 | Obtention du MNT complet | 97 |
| 4.5.1 | Etude sur le MNT généré | 98 |
| 4.5.2 | Comparaison avec l'existant et perspectives | 100 |
| 4.6 | Conclusion | 101 |
| 5 | Appariement : une approche multi-fenêtre | 103 |
| 5.1 | Introduction | 103 |
| 5.2 | Méthodes multi-fenêtre | 104 |
| 5.2.1 | Méthode 1 : produit des coefficients de corrélation | 104 |
| 5.2.2 | Méthode 2 : dilatation de la fenêtre de corrélation | 106 |
| 5.2.3 | Méthode 3 : combinaison des méthodes 1 et 2 | 109 |
| 5.3 | Application des méthodes à l'étape 1 multi-échelle | 111 |
| 5.3.1 | Résultats obtenus à l'étape 1 | 112 |
| 5.3.2 | Résultats obtenus à l'étape finale | 113 |
| 5.3.3 | Bilan sur les résultats | 115 |
| 5.4 | Application des méthodes sur toutes les étapes multi-échelle | 115 |
| 5.5 | Améliorations finales | 117 |
| 5.5.1 | Résultats à l'étape 1 (résolution SRTM) | 118 |
| 5.5.2 | Résultats à l'étape finale (résolution SRTM) | 123 |
| 5.5.3 | Résultats à l'étape finale (résolution améliorée) | 124 |
| 5.6 | Conclusion | 128 |
| | Conclusion | 129 |
| | Annexe | 135 |
| A | Résolution d'équations non-linéaires | 137 |
| A.1 | Généralités | 137 |
| A.2 | Méthode de la bissection | 138 |
| A.3 | Méthode du point fixe | 138 |
| A.4 | Méthode de l'interpolation linéaire (ou de la sécante) | 139 |

| | | |
|----------|--|------------|
| A.5 | Méthode de Newton-Raphson | 139 |
| A.6 | Extension à un système d'équations | 139 |
| A.6.1 | Méthode multi-dimensionnelle du point fixe | 140 |
| A.6.2 | Méthode multi-dimensionnelle de Newton-Raphson | 140 |
| B | Paramètres d'acquisition des images SIR-C stéréoscopiques | 141 |
| C | Description du filtrage de <i>speckle</i> | 143 |
| C.1 | Généralités | 143 |
| C.2 | Stratégie d'estimation | 143 |
| C.3 | Application : filtrage de Lee | 144 |
| C.3.1 | Description | 144 |
| C.3.2 | Dimensionnement | 144 |
| C.3.3 | Interprétation | 145 |
| C.3.4 | Dimension de la fenêtre | 145 |
| D | Liste des travaux | 147 |
| D.1 | Publications | 147 |
| D.2 | Publications à venir | 147 |
| | Table des figures | 149 |
| | Liste des tableaux | 153 |
| | Bibliographie | 155 |

Introduction

Actuellement, l'observation de la Terre se fait principalement par l'intermédiaire de deux types d'imagerie : l'imagerie optique et l'imagerie radar. Ces deux modes d'imagerie se différencient par les procédures d'obtention des images (source d'énergie utilisée) et les méthodes d'interprétation mises en œuvre. Les capteurs optiques satellitaires (Landsat, SPOT, QuickBird, IKONOS, Worldview) travaillent dans le domaine du visible ou de l'infra-rouge et peuvent fournir des images à des résolutions de plus en plus fines, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres. Cependant, ces capteurs ne sont pas opérationnels de nuit ou lorsque la couverture nuageuse est trop chargée d'humidité, ce qui la rend opaque. En revanche, les capteurs radar spatiaux (SIR, ERS, JERS, ENVISAT, ASAR, RADARSAT) exploitent le domaine des micro-ondes et peuvent opérer par tout temps, car ces capteurs sont actifs : ils possèdent leur propre source d'illumination. Les prises de vue nocturnes sont alors possibles. De plus, les micro-ondes sont peu sensibles à l'humidité présente dans l'atmosphère. Les résolutions des images radar, de l'ordre de quelques mètres (3 mètres pour Radarsat-2) à quelques dizaines de mètres, approchent celles des images optiques.

Au sein de l'IETR, l'équipe SAPHIR (*SAR* Polarimétrie Holographie Interférométrie Radargrammétrie) est particulièrement focalisée sur les thèmes de recherche concernant la théorie de la polarimétrie radar, la télédétection radar polarimétrique et interférométrique, ainsi que l'imagerie radar ROS (Radar à Ouverture de Synthèse, acronyme français équivalent de *SAR*). La combinaison de ces techniques d'imagerie ROS ouvre de nouvelles voies de recherche en télédétection radar et les applications offertes sont très nombreuses : aménagement des ressources naturelles, détection d'objets enterrés, archéologie, cartographie des sols, estimation des paramètres physiques d'un environnement naturel tels que rugosité des sols, épaisseur des glaces, texture et taux d'humidité, surveillance des risques naturels tels que tremblements de terre ou mouvements de glaciers, etc, ... Un nouvel axe de recherche s'est ouvert au sein de l'équipe SAPHIR concernant l'obtention de MNT (Modèle Numérique de Terrain) à partir de couples d'images ROS stéréoscopiques : la radargrammétrie.

La génération de MNT, ou plus généralement la reconstruction du relief par imagerie radar est une application qui a intéressé les scientifiques dès les années 1960 [1]. Plusieurs techniques existent pour déterminer l'altimétrie à partir de données ROS :

- l'interférométrie [2], qui s'appuie sur les informations de phase de plusieurs images acquises dans des conditions de prise de vue très proches. La méthode interférométrique permet de fournir des MNT d'une grande précision : 3 à 30 mètres. Cependant, elle se trouve parfois en défaut à cause des sauts de phase lors du déroulement de franges pour de forts reliefs ou lors d'un manque de

- cohérence entre les images,
- la radarclinométrie [3], qui permet d’estimer le relief à partir d’une seule image. C’est une méthode peu utilisée pour générer des MNT car elle est peu précise. De plus, elle requiert plusieurs points d’appui ainsi que l’élaboration de modèles de rétrodiffusion pour chaque type de terrain (roche, végétation, ...),
- la polarimétrie [4], qui s’applique sur plusieurs images de la même zone, enregistrées avec des polarisations différentes. Son utilisation est encore peu répandue pour la génération de MNT,
- la radargrammétrie [5], qui utilise le principe de la stéréovision avec plusieurs images dont les angles de prise de vue sont différents.

C’est à cette dernière méthode que nous allons nous intéresser dans ce manuscrit, et plus particulièrement à l’étape d’appariement qui permet la mise en correspondance entre les images. Ce rapport est divisé en deux parties, qui différencient l’approche théorique (chapitres 1 et 2) et l’application expérimentale (chapitres 3 à 5).

Le **chapitre 1** pose les bases de la mesure radar et de l’acquisition d’images ROS. Nous y décrivons la formation des images radar grâce à la géométrie du porteur. Puis, nous détaillons les différentes distorsions (ombres, compression, repliement) qu’une image radar peut subir par rapport à une image optique. Nous introduisons également la notion de radiométrie d’une image radar et les défauts inhérents à la cohérence du signal radar à savoir le *speckle*, qui est un bruit multiplicatif propre aux images radar et qui peut gêner leur interprétation.

Le **chapitre 2** présente les méthodes de reconstruction du relief : l’interférométrie, la radarclinométrie, la polarimétrie et la radargrammétrie. Nous expliquons sommairement ces différentes méthodes pour nous consacrer ensuite à la radargrammétrie. Nous décrivons alors en détail les différentes étapes du processus de traitement radargrammétrique qu’il faut appliquer à deux images radar obtenues sous deux angles de vue différents : configuration de la prise de vue, mise en correspondance (appariement), reconstruction géométrique à partir de la localisation multi-scènes. Nous abordons également des méthodes d’optimisation comme la réduction de la zone de recherche grâce aux courbes épipolaires ou l’approche pyramidale.

Le **chapitre 3** vise à estimer la précision attendue des résultats de reconstruction altimétrique. Nous nous intéressons tout d’abord à différents travaux menés sur la précision du MNT pour avoir une estimation de la valeur de cette précision. Puis nous mettons en place une étude expérimentale sur des images simulées à partir de points brillants. L’utilisation d’images simulées permet de s’affranchir des contraintes radiométriques pour s’intéresser uniquement à la géométrie du problème. Plusieurs simulations avec des configurations de prise de vue différentes nous permettent d’établir la précision des résultats en planimétrie et en altimétrie, afin de les comparer aux attentes théoriques.

Le **chapitre 4** décrit l’application d’une chaîne de traitements radargrammétriques sur des images réelles, obtenues à partir du capteur SIRC. Le travail sur images réelles nécessite d’introduire de nouvelles notions comme l’évaluation des trajectoires du satellite et l’utilisation de points d’amer. Nous montrons également l’utilité de l’approche

multi-échelle et du filtrage du *speckle*. Enfin, ce chapitre se focalise sur la résolution de la localisation multi-scènes, qui est une étape indispensable pour déboucher finalement sur la génération d'un MNT complet de la zone d'étude.

Le **chapitre 5** expose de nouvelles méthodes d'amélioration en se focalisant sur l'étape de recherche des points homologues. D'une part, la zone d'étude comporte de fortes variations de relief (1900 à 2900 mètres) et la différence entre les angles de visée (35.7° et 50.1°) est importante. En conséquence, nous observons un fort phénomène de compression entre les deux images. Nous nous intéressons donc à la compensation de cette déformation. D'autre part, nous proposons d'utiliser une approche multi-fenêtre afin de prendre en compte des informations supplémentaires contenues dans chacune des fenêtres de corrélation utilisées dans l'étape d'appariement. Ces méthodes multi-fenêtres permettent de fiabiliser l'appariement afin d'obtenir un MNT plus précis et fidèle à la réalité. Pour terminer, nous proposons également quelques pistes dans le but de perfectionner ces méthodes.

Première partie

**Imagerie radar et
radargrammétrie**

Chapitre 1

Le radar à ouverture synthétique

1.1 Généralités

Un certain nombre de missions satellitaires (ou aéroportées) ont pour but l'observation de la Terre. Ces missions donnent lieu à de nombreuses images qui sont issues des phénomènes d'interactions entre l'onde et la matière via des procédures de traitement du signal appropriées au phénomène. Actuellement, l'observation de la Terre se fait principalement par l'intermédiaire de deux types d'imagerie : l'imagerie optique et l'imagerie radar. Ces deux modes d'imagerie se différencient par les procédures d'obtention des images (source d'énergie utilisée) et les méthodes d'interprétation mises en oeuvre.

Les satellites SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) ou Landsat sont des satellites qui embarquent des capteurs optiques pour réaliser des images de la Terre. Ils mesurent le rayonnement visible et infrarouge réfléchi par la surface terrestre pour réaliser ensuite des photos de la surface du globe. L'avantage principal de ce type d'imagerie est la facilité d'interprétation car l'image obtenue est proche de la perception de l'œil humain. Toutefois des inconvénients majeurs existent ; le principal étant l'impossibilité d'effectuer des images de nuit puisque la source d'énergie utilisée par les capteurs optiques provient du soleil. Il en est de même pour une zone recouverte de nuages puisque la lumière ne traverse pas la couche nuageuse. C'est ainsi que le système radar trouve son intérêt dans l'imagerie satellitaire puisque ce système fournit l'énergie nécessaire à l'imagerie : c'est le propre des systèmes actifs. Le domaine des fréquences de l'énergie se situe dans les micro-ondes pour lesquelles l'atmosphère reste transparente. L'imagerie radar peut donc être opérationnelle quelles que soient les conditions météorologiques ou temporelles (alternance jour/nuit). Le système radar est donc particulièrement avantageux dans les zones équatoriales où la couverture nuageuse est très présente et dans les zones polaires plongées dans la nuit pratiquement la moitié de l'année.

Actuellement, aucune technique entre l'imagerie radar et optique n'est préférée et c'est la complémentarité optique/radar qui prime. Les images ROS (Radar à Ouverture de Synthèse ou *SAR* pour *Synthetic Aperture Radar*) permettent, entre autres :

- d'établir des cartes de catégories de terrain. Les données fournies par les systèmes radar sont riches en informations liées aux propriétés diélectriques de la surface rétro-diffusante. Grâce à la diversité de rugosité des sols, il est possible

- de distinguer les zones urbaines des zones rurales, de caractériser l'humidité des sols, les différentes cultures (végétation basse, végétation haute, forêt),
- d'analyser les couvertures neigeuses, les failles, etc,
- d'étudier la mer : l'imagerie radar permet d'analyser l'état de surface des océans pour ainsi remonter aux paramètres météorologiques,
- de construire des MNT (Modèles Numériques de Terrain ou *DEM* pour *Digital Elevation Model*),
- ...

C'est dans ce dernier domaine que va porter notre étude et qui va utiliser l'atout majeur d'un système radar par rapport au système optique : l'image radar obtenue est complexe (amplitude et phase) et cette phase détient une information sur la distance entre le porteur et le terrain.

Le mot RADAR provient de l'acronyme anglais : *Radio Detection And Ranging* pour "détection et télémétrie par ondes radio". Le principe de base est donc de détecter des objets se situant devant le radar et de mesurer la distance au radar de ces objets détectés. De par ces deux fonctions principales, l'utilisation du radar peut être déclinée dans différentes applications civiles et militaires : détection et poursuite de cibles, navigation aérienne et fluviale, mesure de vitesse, imagerie satellite, météorologie, cartographie, surveillance en agriculture, géologie, hydrologie, etc. Le radar s'appuie sur la capacité des objets à rétrodiffuser l'énergie incidente à la surface de ces objets. Le principe de réflexion des ondes électromagnétiques sur des surfaces métalliques a été découvert à la fin du 19^e siècle par Heinrich Rudolf Hertz. Toutefois, ce n'est qu'au début du 20^e siècle que les fondements théoriques du radar se mettent en place, notamment en 1904 avec le dépôt du brevet du "Telemobiloskop" par l'Allemand Christian Hülsmeier et en 1917 où Nikola Tesla établit les principes théoriques (fréquences et niveaux de puissance) du futur radar. Dans les années 1920 et 1930, les expériences se sont multipliées et les premiers systèmes radar ont vu le jour pour détecter les bateaux et les avions de nuit ou par temps de brouillard. Ces radars utilisaient principalement les ondes continues et la longueur d'onde était de l'ordre du mètre. Ensuite, des essais sur des systèmes de détection par ondes courtes (16 et 80 cm de longueur d'onde) sont menés en France par la Compagnie générale de télégraphie Sans Fil (CSF) selon les principes de Nikola Tesla. C'est ainsi que naissent les radars à impulsions. À l'aube de la Seconde Guerre Mondiale, les radars en fonctionnement sont conçus de manière similaire aux radars actuels. Les essais au combat ont permis d'améliorer les techniques et le matériel, ce qui a donné un net avantage pour les pays alliés lors de la bataille d'Angleterre. Après la guerre, les radars sont utilisés dans de nombreuses applications civiles comme la météorologie et le contrôle routier et aérien. Au début des années 1950, l'invention du radar à synthèse d'ouverture (RSO) a permis de créer des radars imageurs à haute résolution. Le premier système embarqué sur une plate-forme satellitaire est le capteur civil SEASAT en 1979. Parmi les programmes satellitaires, on peut noter les missions de la navette spatiale américaine SIR (*Shuttle Imaging Radar*), les missions européennes ERS (*European Remote Sensing*), ENVISAT (*ENVironmental SATellite*), ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), les missions canadiennes RADARSAT et les missions japonaises JERS (*Japanese Earth Resources Satellite*) (voir paragraphe 1.1.3).

Le principe de la prise de vue repose sur l'antenne qui convertit un courant élec-

trique en une onde électromagnétique et réciproquement. Cette propriété permet à de nombreux systèmes radar de fonctionner en condition monostatique, c'est à dire avec une seule antenne qui fonctionne à la fois en émission et en réception. Dans une configuration bistatique, l'antenne réceptrice est passive et totalement distincte de l'antenne émettrice. L'émetteur génère donc un courant électrique qui induit un rayonnement d'ondes par l'intermédiaire de l'antenne émettrice. Les ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace sont partiellement réfléchies par le terrain et les cibles situées dans le champ de vision du radar. Une partie des ondes rétrodiffusées est ensuite captée par l'antenne réceptrice et transformée en signal électrique que le récepteur enregistre. Les données fournies par les systèmes radar sont riches en informations liées aux propriétés diélectriques de la surface rétro-diffusante.

La longueur d'onde λ_c du signal est liée à la fréquence d'émission f_c et la vitesse de la lumière c par la relation suivante :

$$\lambda_c = c/f_c \quad (1.1)$$

L'équation décrivant la puissance reçue P_r par le radar est appelée équation du radar et s'énonce avec

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda_c^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad (1.2)$$

où P_t est la puissance transmise par le radar, G est le gain de l'antenne d'émission et de réception dans le cas monostatique, λ_c est la longueur d'onde d'émission, R est la distance de visualisation et σ est la surface équivalente radar appelée aussi **SER**. Ce dernier paramètre est dépendant de nombreux facteurs : matériau de la cible, forme géométrique, orientation, fréquence et polarisation de l'onde émise, ... La SER s'exprime généralement en dB. Pour des surfaces naturelles [6], ce paramètre est compris entre -40 dB (surface peu réfléchissante et qui correspond donc à une zone sombre sur l'image) et +5 dB (surface qui renvoie beaucoup d'énergie ce qui est équivalent à une zone claire sur l'image radar). En termes d'interprétation d'images radar, il est intéressant de pouvoir associer à tel ou tel niveau ou aspect d'une zone d'image radar un phénomène de rétrodiffusion (voir paragraphe 1.3.4). Par exemple, les surfaces formant des coins (dièdres, trièdres) comme des bâtiments correspondent à des échos forts en énergie et très localisés dans l'espace. En revanche, les surfaces rugueuses diffusent les ondes et renvoient donc un écho faible. Ce signal rétrodiffusé vers le radar contient les informations d'amplitude et de phase du rayonnement rétrodiffusé. Le radar enregistre également le temps d'aller-retour des ondes, ce qui apporte l'information sur la distance radar-cible parcourue. Il convient maintenant de décrire l'onde électromagnétique suivant quelques caractéristiques.

1.1.1 Fréquences d'émission

Dans les applications radar, la gamme des fréquences utilisées va de 300 MHz à 30 GHz (figure 1.1), ce qui correspond à des longueurs d'onde qui vont du centimètre au mètre. Les bandes de fréquences les plus utilisées en télédétection sont :

- la bande L utilisée par le satellite américain SEASAT et le satellite japonais JERS-1, ainsi que dans le système aéroporté de la NASA,

| Bande | P | L | S | C | X | Ku | K | Ka | V | W | | |
|------------------------|-----|----|-----|---|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|
| Fréquence (GHz) | 0.3 | 1 | 2.0 | 3 | 4.0 | 8.0 | 12 | 18 | 27 | 40 | 75 | 110 |
| Longueur d'onde (cm) | 100 | 30 | 10 | 3 | 10 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.3 | | |

FIGURE 1.1 – Gamme des fréquences des systèmes radars.

- la bande C très répandue dans plusieurs systèmes de recherche aéroportés (Convair, AirSAR) et spatioportés (ERS-1 et 2 ainsi que RADARSAT),
- la bande X très utilisée dans les systèmes radars aéroportés et qui trouve de plus en plus d'applications satellitaires.

Chaque bande est utilisée en fonction des propriétés d'interaction avec la matière et de propagation dans l'air.

1.1.2 Polarisation de l'onde

Les ondes électromagnétiques présentent une polarisation [7] qui se traduit par l'orientation du vecteur électrique \vec{E} en fonction du temps. On parle de polarisation linéaire si \vec{E} est toujours orienté de la même façon en fonction du temps et on parle de polarisation circulaire si ce champ électrique \vec{E} « tourne » autour de l'axe de propagation de l'onde. On peut aussi décrire le sens de rotation par une caractérisation « circulaire droite » ou « circulaire gauche ». En imagerie radar, on s'intéresse particulièrement à deux configurations de la polarisation : polarisation horizontale (H) et polarisation verticale (V). De plus, lorsque l'on considère une situation de quasi-monostatisme (configuration bistatique mais avec les deux antennes très proches l'une de l'autre) et avec deux capteurs pour l'émission et deux capteurs pour la réception, il est alors possible de décrire quatre configurations de mesures : HH, VV, VH et HV. Ces quatre états nous permettent de définir une matrice de surface équivalente radar.

Les deux caractéristiques présentées vont donc constituer certaines propriétés de l'onde émise par le capteur radar afin d'« éclairer » la scène radar. Elles caractérisent aussi les différentes missions d'imagerie radar : aéroportées ou satellitaires.

1.1.3 Missions en imagerie radar

Les premiers systèmes RSO opérationnels civils voient le jour dans les années 1970 et sont aéroportés. Malgré l'essor du ROS spatial, le ROS aéroporté continue de jouer un rôle très important pour les études expérimentales et sur le plan commercial, de part sa souplesse d'intervention, ce que ne permet pas un satellite à cause de ses orbites limitées. Nous décrivons [8] sur le tableau 1.1 les missions aéroportées les plus significatives.

Les premières missions satellitaires (voir tableau 1.2) voient le jour aussi dans les années 1970 et notamment avec le lancement de SEASAT en 1978, premier satellite RSO civil, à vocation océanographique. Suivent alors deux missions où les capteurs radar sont embarqués dans une navette spatiale : SIR-A (*Shuttle Imaging Radar*) et SIR-B. Ensuite, trois nouvelles missions sont rapidement mises en place en 1991 et 1992 : Almaz de fabrication russe, le satellite européen ERS-1 (*European Remote*

| Porteur, capteur | Bande | Observations |
|------------------|----------|---------------------------|
| Caravelle | X | corrélation optique |
| P-3 | X, C, L | polarimétrique |
| Conquest, STAR | X | traitement ROS temps réel |
| DC-8, AirSAR | C, L, P | polarimétrique |
| Convair 580 | X, C | polarimétrique |
| PHARUS | C | polarimétrique |
| DO-SAR | Ka, X, C | interférométrique |
| E-SAR | X, C, L | |

TABLE 1.1 – Principales missions aéroportées.

Sensing) et son homologue japonais JERS-1 (*Japanese Earth Resources Satellite*). Ces systèmes n'ont qu'une seule polarisation et qu'une seule fréquence d'utilisation. Ces capteurs sont souvent limités à un seul angle de visée. La résolution est généralement de l'ordre de 10 à 30 mètres, ce qui leur permet de rivaliser avec des capteurs optiques comme Landsat et SPOT. Il faut attendre le lancement de SIR-C en 1994 pour faire des campagnes de mesures multi-fréquentielles et multi-polarimétriques. En 1995 sont lancés ERS-2 et RADARSAT. Le système ERS-2 reprend les mêmes caractéristiques que son prédécesseur mais RADARSAT propose différents modes de fauchée multi-résolutions et des angles de visée différents. Les missions ERS, SIR et RADARSAT permettent une large diffusion d'images à travers les communautés scientifiques de la télédétection.

Parmi les capteurs satellitaires, certains sont embarqués sur des navettes spatiales. C'est le cas des missions SIR (*Shuttle Imaging Radar*) A, B et C et SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Ces programmes sont limités dans le temps par la durée de la mission qui est réduite comparée à des satellites classiques indépendants.

Le premier programme est celui associé à la navette Columbia. Celle-ci, lancée le 12 novembre 1982, embarque le capteur SIR-A (*Shuttle Imaging Radar A*). La mission a duré moins de trois jours mais elle a montré le potentiel d'utilisation d'un tel capteur.

Ensuite, la navette Challenger lancée le 5 octobre 1984 embarque le capteur SIR-B, élaboré à partir de l'expérience acquise grâce aux missions SIR-A et SEASAT. Une principale évolution fut la possibilité de faire varier l'angle de visée de 15° à 65°. La mission a duré environ une semaine et a permis des enregistrements sur trois altitudes différentes.

Enfin, la navette Endeavour (figure 1.2) a été lancée deux fois pour le programme SIR-C : deux vols de 10 jours effectués l'un en avril 1994 et l'autre en octobre 1994. À son bord étaient présents les capteurs SIR-C et X-SAR. Le capteur SIR-C a nettement évolué par rapport à ses prédécesseurs : il est multi-fréquences (bandes C et L) et multi-polarisations. C'est le premier système ROS spatial à fournir une information multi-spectrale. De plus, comme SIR-B, il demeure multi-incidences même si la plage d'utilisation est plus réduite : 20° à 55°. Quant au capteur X-SAR, il travaille en bande X.

L'acquisition des données à des dates distinctes (avril et octobre 1994) fut prévu afin de pouvoir analyser les différences saisonnières. Cette campagne de mesure eut

| Capteur | Date | Fréquence (Ghz)(bande) | Polar. | Incidence (degrés) | Résolution (az./dis.)(m) |
|--------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|
| SEASAT | 1978 | 1.275 (L) | HH | 19-26 | 25/25 |
| SIR-A | 1981 | 1.278 (L) | HH | 50 | 40/40 |
| SIR-B | 1984 | 1.282 (L) | HH | 15-65 | 25/17-58 |
| Almaz | 1991 | 3.125 (S) | HH | 32-65 | 15-30 |
| ERS-1 | 1991 | 5.3 (C) | VV | 23 | 30/20 |
| JERS-1 | 1992 | 1.275 (L) | HH | 35 | 18/18 |
| SIR-C | 1994 | 1.27 (L) 5.3 (C) | multi multi | 17-63 | 25/10-60 |
| X-SAR | 1994 | 9.67 (X) | VV | 15-60 | 30/30 |
| ERS-2 | 1995 | 5.3 (C) | VV | 23 | 30/20 |
| RADARSAT-1 | 1995 | 5.3 (C) | HH | 20-59 | 10-100/10-100 |
| SRTM | 2000 | 5 (C) 10 (X) | multi multi | 57 | |
| ENVISAT | 2002 | 5.3 (C) | HH-VV | 25-45 | 40/30 |
| SAR-Lupe | 2006 à 2008 | 9.65 (X) | mono | | < 1 |
| TerraSAR-X | 2007 | 9.6 (X) | multi | 20-55 | 1-16/1.3-3.2 |
| RADARSAT-2 | 2007 | 5.4 (C) | multi | 10-60 | 3-100/3-100 |
| COSMO-SkyMed | 2007 à 2010 | 9.6 (X) | mono | 20-59.5 | 1-100 |

TABLE 1.2 – Principales missions satellitaires.

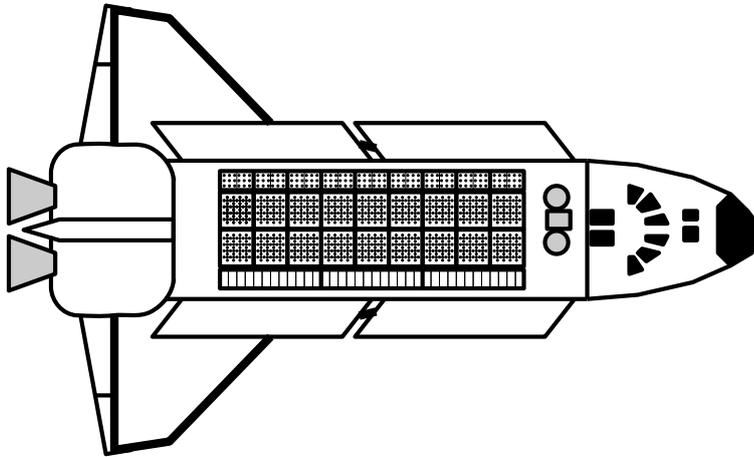


FIGURE 1.2 – Vue globale de la navette spatiale Endeavour.

pour but de quantifier les changements naturels de saison et ceux imputables à l'homme. Cela a permis par exemple des études sur la couverture neigeuse d'une zone tout en ayant connaissance des paramètres de cette zone dépourvue de neige.

La navette Endeavour a aussi servi pour un programme d'acquisition d'images ROS [9] : le programme SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Cette mission d'une dizaine de jours s'est déroulée en février 2000. La navette embarque un système analogue à celui de la mission SIR-C. Les capteurs correspondant à la bande L ont été retirés pour respecter des contraintes de masse et une seconde antenne a été positionnée à l'extrémité d'un mât déployable de 60 mètres. Cette seconde antenne utilisée en réception uniquement permet l'acquisition de données interférométriques.

L'objectif de la mission SRTM était de couvrir près de 80 % des surfaces émergées de la Terre avec la particularité d'inclure 95 % de surfaces habitées. L'aspect interférométrique a permis ensuite de déterminer la topographie sur ces zones imagedes en générant des MNT (Modèles Numériques de Terrain). Ces MNT obtenus sont disponibles gratuitement au public depuis septembre 2003.

La résolution des MNT fournis est de 31 mètres (1 arc seconde) pour les Etats-Unis et de 93 mètres (3 arcs seconde) pour le reste du Globe. La précision verticale d'élévation est d'environ 16 mètres. Les MNT sont découpés par fichiers en quadrillage de 1 degré en longitude et latitude. Les données SRTM sont exprimées en coordonnées géographiques (latitude, longitude et hauteur), du système mondial WGS84 (*World Geodetic System*).

Nous allons maintenant décrire les images radar obtenues avec les signaux enregistrés par un capteur radar. Ces images correspondent à l'organisation spatiale des niveaux d'énergie rétrodiffusée avec la meilleure précision possible. De plus, afin de pouvoir être considérée comme une information complémentaire de l'image optique, il est nécessaire que cette précision spatiale de l'image radar soit comparable à la précision spatiale de l'image optique.

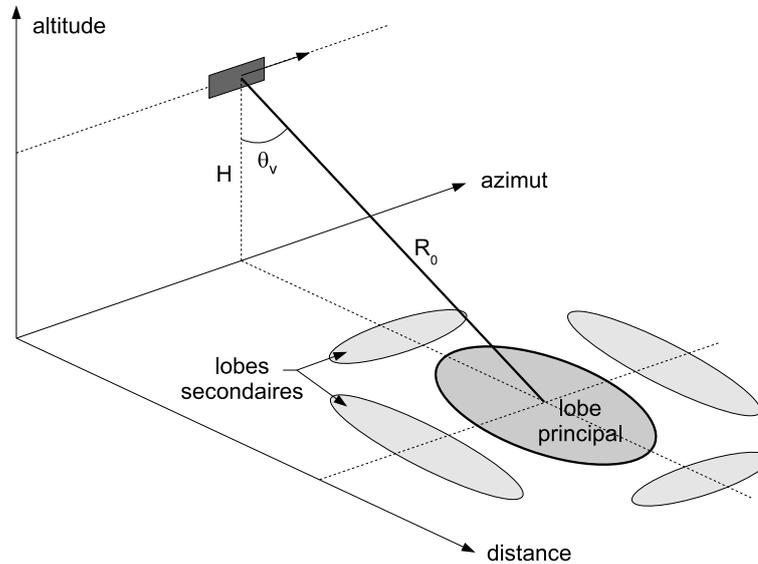


FIGURE 1.3 – Géométrie générale de la configuration en visée latérale.

1.2 Traitement du signal pour imagerie radar

Le SLAR (*Side-Looking Airborne Radar*) permet la création d'images du sol terrestre en émettant des impulsions électromagnétiques et en visant latéralement. La visée latérale est indispensable pour éviter le mélange des cibles qui se produirait en visée verticale. En d'autres termes, il s'agit d'éviter les ambiguïtés Doppler. Une configuration commune est une acquisition à hauteur constante, avec une visée perpendiculaire à la trajectoire (figure 1.3). Il est cependant possible de dépointer l'antenne pour fonctionner en angle oblique appelé *squint*.

L'image radar est formée par analyse des échos reçus. Un traitement du signal particulier permet d'organiser spatialement les énergies reçues par le radar (et donc rétrodiffusées par le sol), et ce avec une précision allant du mètre à la dizaine de mètres. Cette organisation de l'image radar se fait selon deux axes :

- l'axe azimut (*along range*) qui est confondu avec la trajectoire du porteur,
- l'axe distance (*cross range*) qui est perpendiculaire à l'axe azimut (dans le cas d'une configuration *SLAR*).

Dans la littérature [10], il est aussi possible de décrire les axes de l'image en utilisant une notion de

- *slow-time* pour indiquer que l'échelle de temps est à la mesure de la vitesse du porteur ; contrairement à la notion de
- *fast-time* qui fait référence à la vitesse de la lumière et qui se confond avec l'axe de propagation.

Dans un premier temps, il convient d'associer les performances de l'image radar, en termes de résolution, à l'antenne radar (voir figure 1.4). Cette antenne est assimilable à une antenne planaire rectangulaire dont les caractéristiques géométriques (longueur L et largeur l) sont telles que $L > l$ ce qui donne un lobe principal plus étroit selon l'axe azimut que selon l'axe distance. Il faut noter que cette antenne présente des lobes

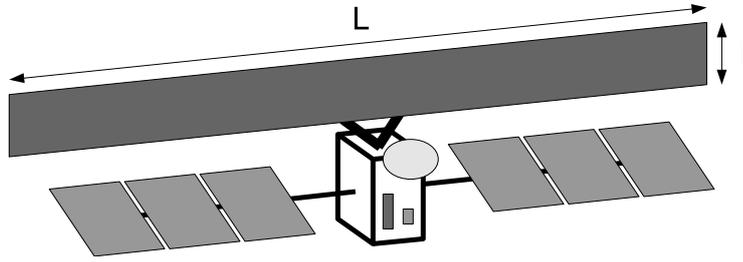


FIGURE 1.4 – Exemple de géométrie d’une antenne radar pour imagerie.

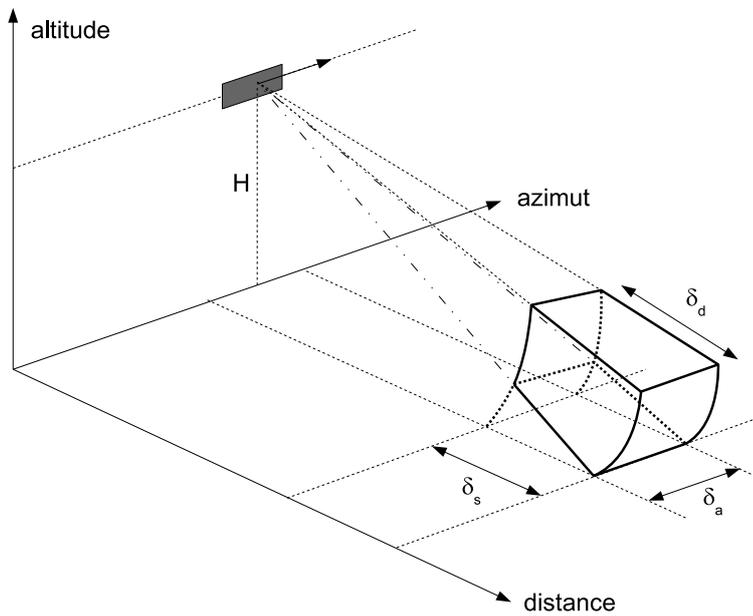


FIGURE 1.5 – Définition du volume de résolution radar.

secondaires qu’il convient de prendre aussi en compte dans le bilan de puissance.

1.2.1 Formation de l’image

Les systèmes radar que nous allons aborder dans cette thèse concernent les radars de type impulsionnel. On définit le volume de résolution radar (figure 1.5) donnant la résolution en azimut δ_a et la résolution en distance δ_d . Le paramètre δ_s définit la résolution en distance projetée au sol.

À chaque position du radar en azimut, une impulsion est envoyée vers le sol à la **fréquence de récurrence**, f_r . La durée de l’impulsion τ est très faible par rapport à la période de récurrence. Le radar est ensuite en position d’écoute du signal rétrodiffusé (figure 1.6). Ce signal rétrodiffusé est ensuite utilisé en entrée du processus de formation de l’image radar. Ce processus de formation de l’image radar se fait dans le **plan radar**. Ainsi, la représentation de cette image nécessite une interprétation particulière (c’est la projection des éléments rétrodiffusants du sol sur l’**axe radio-électrique**). Liée à la largeur du lobe en distance, la **fauchée** détermine la largeur

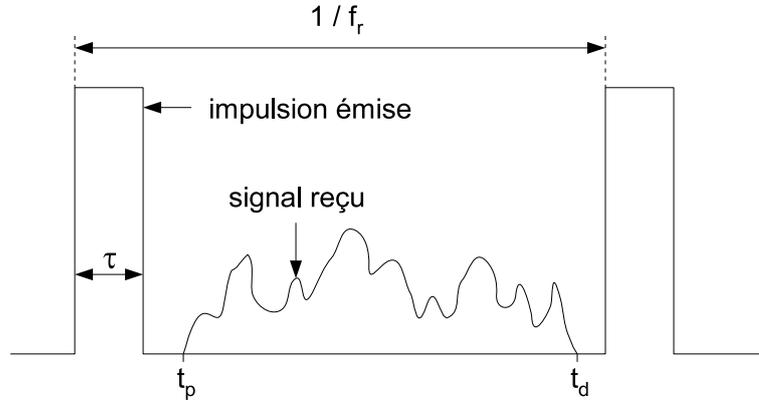


FIGURE 1.6 – Représentation du signal émis et du signal reçu.

de l'image. Sur le terrain, cette fauchée représente l'intervalle entre les distances R_p et R_d . Ces distances dépendent (figure 1.7) des instants de début et de fin d'enregistrement pour chaque position en azimut (respectivement t_p et t_d). La distance $d_p = (c.t_p)/2$ correspondant au bord proche de l'image est appelée **distance proximale** (*near range*) et la distance $d_d = (c.t_d)/2$ correspondant à l'autre extrémité de l'image est appelée **portée distale** (*far range*).

1.2.2 Résolution en distance

Pour que le radar puisse distinguer deux cibles (**pouvoir discriminateur**), il faut que les signaux réfléchis respectivement par les deux cibles soient reçus à des temps différents. La durée d'une impulsion τ détermine la capacité du radar à discerner deux cibles en distance : c'est la **résolution en distance**. Cette résolution en distance δ_d s'écrit donc :

$$\delta_d = \frac{c.\tau}{2} \quad (1.3)$$

où c est la vitesse de la lumière. À titre d'exemple, si nous nous référons aux caractéristiques de la mission SIR-C [11] à savoir une durée d'impulsion de $33,8 \mu s$, on obtiendrait avec l'équation (1.3) une résolution en distance dans le plan radar supérieure à 5 km ; ce qui est inacceptable pour des applications en télédétection.

Un système radar peut discriminer deux cibles en distance si et seulement si leur espacement, dans le plan radar, est supérieur à δ_d . Ainsi, pour avoir une résolution suffisamment élevée (δ_d petit), il faut que la durée de l'impulsion soit la plus brève possible. De plus, pour obtenir des rapports signaux à bruit performants, il est nécessaire de transmettre le plus de puissance possible. Ainsi, technologiquement, il est difficile de satisfaire ces deux contraintes. Il est donc nécessaire de recourir à un traitement du signal spécifique nous permettant d'émettre une puissance suffisante tout en gardant un bon pouvoir discriminateur en distance : c'est le principe de la **compression d'impulsion**. Ce principe s'appuie sur un codage des impulsions afin de synthétiser des impulsions brèves équivalentes. Dans les applications d'imagerie radar, ce codage est souvent une modulation linéaire de fréquence. Le signal ainsi émis est aussi connu

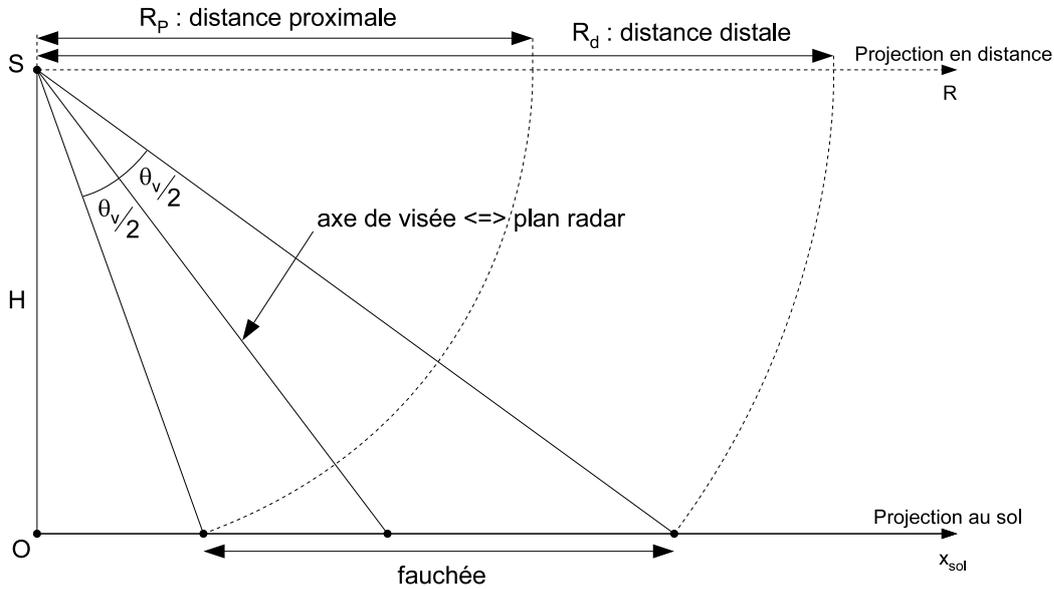


FIGURE 1.7 – Définition des portées radar.

sous le nom de *chirp*. La bande de modulation B_p est définie par un taux de modulation α et une durée d'impulsion τ . Une description du traitement du signal [12] basé sur le filtrage adapté nous permet d'écrire que la réponse impulsionnelle du traitement radar dans l'axe distance peut s'écrire sous la forme d'une fonction en sinus cardinal. Ainsi, si le produit $B_p \cdot \tau$ est suffisamment grand, la largeur à mi-puissance de cette réponse nous donne [11] la résolution en distance :

$$\delta_d = \frac{c}{2 \cdot B_p} \quad (1.4)$$

La résolution en distance est donc inversement proportionnelle à la bande passante. Si nous appliquons les caractéristiques de SIR-C à l'équation (1.4) c'est à dire une bande passante égale à 10 MHz, nous obtenons une résolution en distance de 15 m.

1.2.3 Résolution en azimuth

Sur l'axe azimuth, l'ouverture du diagramme d'antenne (représentée par la largeur du lobe à -3dB) va déterminer la capacité du radar à discriminer deux cibles dans le sens d'avancement du porteur. La résolution naturelle du radar (c'est à dire sans traitement approprié) dépend alors de la longueur de l'antenne mais aussi de la distance. En effet, plus on s'éloigne du porteur, plus la trace au sol du lobe d'antenne va s'élargir. Ainsi, pour distinguer deux cibles le long de la direction de déplacement du porteur, la distance entre elles doit être plus grande que la largeur du faisceau de l'antenne à la distance de visualisation. La résolution naturelle en azimuth se définit donc avec l'angle d'ouverture en azimuth $\theta_L = \frac{\lambda_c}{L}$ de l'antenne et la distance de visualisation R_0 :

$$\delta_a = \frac{\lambda_c \cdot R_0}{L} \quad (1.5)$$

Dans le cas de la mission SIR-C pour laquelle nous considérons $\lambda_c = 5,6$ cm, $L = 12,4$ m et $R_0 = 6594$ km, nous obtenons par l'intermédiaire de l'équation (1.5) une résolution naturelle en azimut de l'ordre de 30 km...

Le traitement spécifique du signal pour les radars à synthèse d'ouverture (ROS) permet d'obtenir une discrimination radar dans la direction azimut de l'ordre de la résolution en distance obtenue après la compression d'impulsion. La **synthèse d'ouverture** utilise le mouvement entre le radar et la scène radar considérée. Ainsi, si nous considérons le signal rétrodiffusé par un point de la scène radar, ce signal possède les caractéristiques d'un signal modulé en fréquence. Le taux de variation de cette modulation est directement lié à l'effet Doppler induit par le déplacement du radar. Une opération de filtrage adapté à cette modulation [12] permet d'écrire la réponse impulsionnelle du traitement de synthèse d'ouverture sous la forme d'une fonction en sinus cardinal. Ainsi, si le produit "temps de visualisation du point cible" et "variation de la fréquence Doppler" est suffisamment grand, la largeur à mi-puissance de la réponse impulsionnelle nous donne [11] la résolution en azimut :

$$\delta_a = \frac{L}{2} \quad (1.6)$$

La résolution en azimut est donc proportionnelle à la longueur de l'antenne. Il faut noter que l'expression (1.6) est optimale et considère le traitement du signal sur toute la durée de visualisation du point cible. L'application de (1.6) à la mission SIR-C nous donne une résolution en azimut environ égale à 6 m.

1.2.4 Corrections de l'image radar

Des contraintes et défauts liés aux traitements en azimut et distance ainsi qu'à la physique des systèmes embarqués nécessitent quelques corrections. Ainsi, la synthèse d'une image radar doit tenir compte des effets indésirables comme, par exemple, la migration en distance des cibles et la variation radiométrique, la non-focalisation ou l'influence des lobes secondaires :

- la migration en distance est due au fait que même avec une cible fixe, la distance radar-cible évolue paraboliquement pour atteindre un minimum quand la ligne cible-radar est perpendiculaire à la trajectoire de vol (cas d'un angle de dépointage nul). La rotation de la Terre induit également un décalage en distance,
- la variation radiométrique est due aux changements de puissance de l'onde entre le début et la fin de la fauchée. En effet, l'angle de visée est légèrement différent d'une case distance à l'autre. La correction radiométrique s'opère grâce à des informations sur la SER minimale et la SER maximale du terrain. La vérification de la qualité radiométrique peut passer par une comparaison avec des images prises sur des sites de test,
- la non focalisation concerne surtout le filtre adapté en azimut. La réponse impulsionnelle de ce filtre dépend de la vitesse du porteur et il est difficile pour ce porteur de maintenir une vitesse et une altitude parfaitement constante. La correction se fait grâce à des techniques de compensation qui déterminent le signal qui aurait été généré avec une trajectoire parfaite,

- la présence de lobes secondaires dans la réponse impulsionnelle des traitements en distance et en azimuth dégrade les performances du ROS associé. Ainsi, pour diminuer le niveau de ces lobes secondaires par rapport au lobe principal, il est appliqué sur le signal reçu des fonctions de pondération comme la fenêtre de Hamming.

Après corrections, il peut subsister des erreurs dans les images. Elles peuvent être corrigées en utilisant des points de contrôle appelés points d'amer. Ces points peuvent être des structures facilement identifiables comme un sommet de montagne, une intersection de routes, des bâtiments, ...

1.3 Interprétation de l'image radar

Comme nous l'avons vu, le ROS travaille dans le domaine des micro-ondes. Comparé à un système optique, cela permet d'opérer de nuit ou malgré une épaisse couverture nuageuse. En revanche, les images générées sont difficilement interprétables par quelqu'un de non-initié. Il est donc important de bien connaître les phénomènes en jeu afin de pouvoir analyser une image radar.

Une image radar est une projection en deux dimensions d'une zone tri-dimensionnelle à partir du point de vue du capteur aéroporté ou satellitaire. Dans l'axe azimuth, la projection se rapproche d'une image optique mais dans l'axe distance, la formation particulière de l'image à partir de la distance radar-cible fausse la perception et l'interprétation de l'image radar. Le relief du terrain va apporter des distorsions géométriques et radiométriques. La texture de l'image et surtout le bruit de *speckle* s'ajoutant au signal rendent également l'interprétation difficile.

Il existe plusieurs représentations pour une image radar : l'image originale est une image en distance avec une perspective oblique selon le plan radar (plan distance). L'image est dite en *slant range* (figure 1.8). Les distances radar-cible sont échantillonnées le long de l'axe de visée. La taille du pixel le long de la distance oblique est donc égale à la résolution en distance. En revanche, la taille du pixel au sol varie en fonction de l'angle d'incidence et de la courbure terrestre. Mais cette image peut être projetée en géométrie terrain pour obtenir une image au sol. L'image est dite en *ground range* (figure 1.8), où les distances sont ré-échantillonnées au sol. Cette transformation compense donc les effets de déformation de la taille d'un pixel au sol.

Ainsi, si R est la distance d'un point par rapport au satellite, h l'altitude de ce point et H l'altitude du satellite, la formule de projection s'applique pour tous les points de l'axe sol :

$$x_{sol} = \sqrt{R^2 - (H - h)^2} \quad (1.7)$$

L'image radar seule ne fournit donc pas l'altitude réelle de chaque point. C'est pourquoi ce type de projection requiert un MNT pour obtenir l'information de hauteur h décrite dans l'équation (1.7). De plus, nous pouvons constater que, pour des intervalles distance identiques ($x_{sol1} = x_{sol2}$) au sol, la projection dans le plan distance déforme ces intervalles ($d_1 < d_2$). Ces phénomènes de distorsions dans le plan radar sont des points délicats dans l'interprétation des images radar.

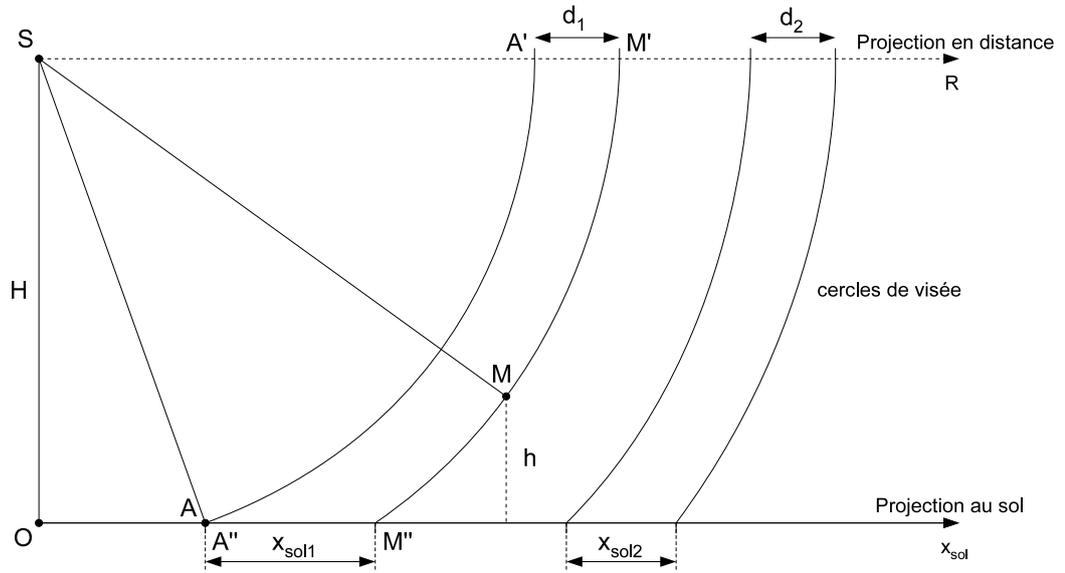


FIGURE 1.8 – Effet de la projection dans le plan distance.

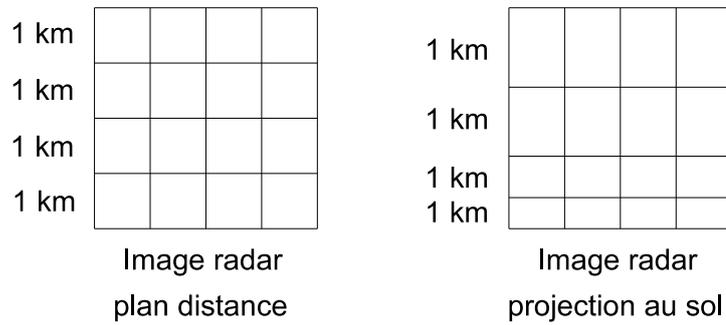


FIGURE 1.9 – Projection dans le plan distance et dans le plan sol.

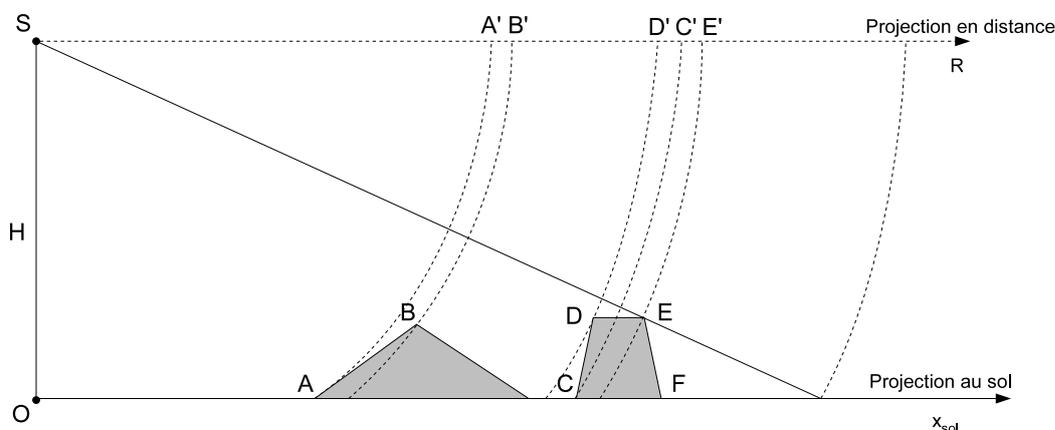


FIGURE 1.10 – Phénomènes de distorsion dans une image radar.

1.3.1 Distorsions d'une image radar

La projection d'une réalité terrain sur l'axe distance associée à une hauteur non nulle induit des déformations qu'il est possible de prévoir en fonction de la planimétrie du terrain (figure 1.10).

1.3.1.1 Phénomène d'ombre

Ce phénomène est aussi appelé effet *shadowing* et se localise sur la figure 1.10 par le segment à partir du point E', image du point E. Le radar possédant sa propre source d'illumination, les zones d'ombre apparaissent aux endroits où les ondes incidentes ne touchent pas la surface terrestre (exemple du point F). Le principe est identique au système optique sauf que pour le radar la source d'illumination et le point de vue se situent au même endroit, ce qui entraîne des zones d'ombres différentes par rapport à une image optique.

1.3.1.2 Phénomènes de compression et de recouvrement

Ce phénomène est aussi appelé effet *foreshortening*. Quand une pente est orientée vers le radar, la variation de distance sol-radar $[AB]$ sur toute sa surface sera faible (distance $[A'B']$) : il s'en suit que tous les points de la surface sont disposés sur une étroite bande en distance. De plus, la pente apparaît très claire sur l'image pour deux raisons. D'une part, une surface orientée vers le radar renvoie une grande partie de l'énergie de l'onde incidente vers l'antenne. D'autre part, pour un petit nombre de pixels sur l'image, la zone au sol est très grande donc le nombre de contributeurs y est plus important. Un recouvrement se produit lorsque plusieurs cibles sont imagées sur le même pixel. Ce phénomène se produit lorsque la pente du terrain est égale à l'angle d'incidence local.

1.3.1.3 Phénomènes d'inversion ou de repliement

Ce phénomène est aussi appelé effet *layover*. Pour de fortes pentes (angle de pente $>$ angle d'incidence local), il peut arriver que des points sur l'image radar soient

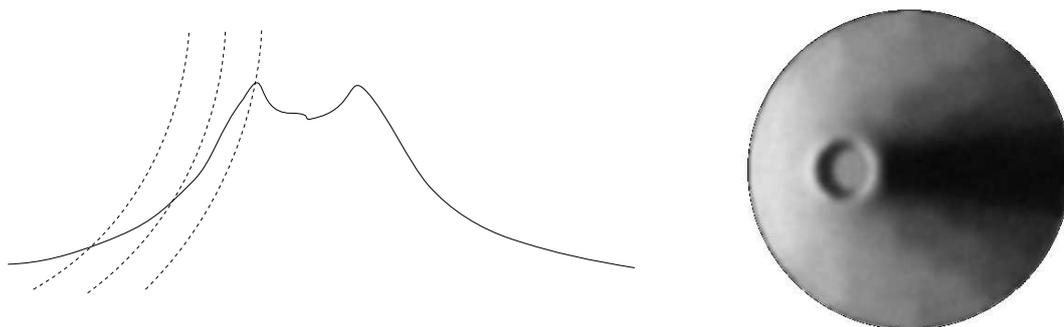


FIGURE 1.11 – Exemple de déformation due à la visée latérale d'un radar imageur.

inversés par rapport à leur géométrie sur le terrain (points C' et D' sur la figure 1.10). Si l'on prend l'exemple d'un immeuble, le sommet est plus proche du radar que sa base donc, dans le plan distance, le sommet sera imagé avant la base de l'immeuble, alors que ces deux points projetés physiquement au sol se situent au même endroit. On observe le même phénomène pour les falaises et plus globalement sur les reliefs avec de fortes pentes.

Tous ces phénomènes sont liés à l'angle d'incidence du signal émis, donc dépendants de l'orientation des surfaces et de l'angle de visée. Pour l'interprétation d'une image radar, il est nécessaire de tenir compte de ces effets. Par exemple, une montagne avec un profil bien symétrique apparaîtra dissymétrique sur l'image radar (voir figure 1.11) : le versant faisant face au radar sera imagé en distance sur une zone de compression très courte et claire tandis que l'autre versant conduira à une zone grisée plus longue en distance. Toutefois, si ces éléments de distorsions sont un problème pour l'interprétation des images radar, ils offrent également des indices sur l'orientation de l'image : une brève analyse des zones de compression permet facilement de repérer l'axe distance, l'axe azimuth et le point de vue du radar.

Nous voyons donc qu'il est fondamental de pouvoir relier les paramètres de vol avec la géométrie des images radar afin de pouvoir interpréter ces images. En particulier, il paraît nécessaire de bien connaître les phénomènes d'interaction onde-matière.

1.3.2 Modélisation géométrique de la prise de vue

La première opération qu'il convient d'effectuer sur une image radar est de pouvoir relier la position de chaque pixel de l'image à une réalité de terrain. En imagerie satellitaire ou aéroportée, la modélisation de l'orbite du porteur [13] est indispensable pour effectuer des traitements de rectification, recalage, superposition et de stéréoscopie nécessitant cette connaissance de position des pixels. La modélisation de la prise de vue (figure 1.12) consiste alors à mettre en correspondance le terrain et l'image. Pour cela, il est nécessaire de connaître :

- les caractéristiques du radar (fréquence, taille de l'antenne, angle d'incidence...),
- la géométrie du porteur radar avec les paramètres positions et vitesses instantanés,
- un modèle d'ellipsoïde pour représenter la Terre.

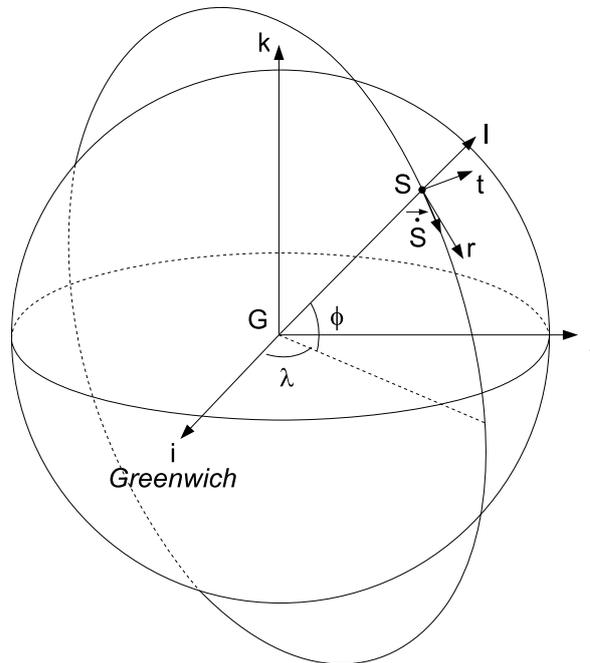


FIGURE 1.12 – Géométrie de la prise de vue satellitaire.

Sur la figure 1.12, nous indiquons que :

- les angles λ et ϕ correspondent respectivement à la longitude et à la latitude,
- le repère géocentrique (G, i, j, k) lié au référentiel terrestre est constitué de l'origine G , centre de la Terre, de l'axe i dirigé vers le méridien de Greenwich, de l'axe k , axe polaire dirigé vers le Nord et de l'axe j complétant le trièdre orthonormé direct,
- le repère satellitaire (S, l, r, t) lié au satellite est constitué de l'origine S , position du satellite, de l'axe l colinéaire à \vec{GS} , de l'axe t perpendiculaire à l et au vecteur vitesse \vec{S} du satellite et de l'axe r complétant le trièdre orthonormé direct.

L'application des traitements en stéréoscopie [14] nécessite la connaissance de certains paramètres caractéristiques du radar :

- λ_c , la longueur d'onde,
- δ_a et δ_d , les résolutions en azimuth et distance,
- f_D , la fréquence centrale du spectre Doppler du signal reçu,
- t_0 , temps pour lequel sont connues la position et la vitesse initiales du porteur,
- t_{init} , temps correspondant au début de l'image,
- r_0 , la distance en site pour une ligne référence de l'image, (pour la première ligne de l'image, cette distance correspond à la distance proximale ou *Near Slant Range*),
- φ , vecteur des paramètres permettant le calcul du vecteur d'état (position, orientation, vitesse) du satellite pour toute valeur temporelle correspondant à l'image.

Pour la géométrie du porteur radar, les paramètres de prise de vue ne sont généralement connus que de façon approchée. Les mesures effectuées en vol permettent d'obtenir les éphémérides, c'est à dire les positions échantillonnées de la position et de la vitesse du porteur au cours du temps. La trajectoire du satellite peut donc être

reconstruite en interpolant les points échantillonnés. Localement, les variations étant faibles, l'interpolation de la trajectoire par un polynôme de degré 2 suffit aux applications qui nous intéressent. Ce modèle ne se base sur aucune modélisation physique de l'orbite mais se justifie par une étude dynamique du mouvement du porteur. Pour raffiner le modèle, il est possible de se baser sur des points d'appui (ou points d'amer) qui sont facilement identifiables sur l'image radar et sur le terrain. Ce sont par exemple des intersections de route, des sommets de montagne... À partir des couples de points, une approximation aux moindres carrés aboutit au calcul plus précis des paramètres de prise de vue.

1.3.3 Informations géographiques d'une image radar

À partir de la connaissance des paramètres de prise de vue du radar, il est possible d'attribuer à chaque pixel de l'image radar une position de type cartographique. L'utilisation et l'exploitation des images radars pour la cartographie nécessitent plusieurs repères [15] :

- le repère global : ce repère est en général géodésique et le système spatial en vigueur est WGS84. Les éphémérides du porteur sont référencées en coordonnées géographiques : latitude, longitude. Le méridien de référence est celui de Greenwich et l'altitude est mesurée par rapport à la géode de référence,
- le repère local cartographique : il s'agit également d'un repère géodésique, avec un méridien et un ellipsoïde de référence. En France, le système géodésique local est la NFT qui divise le pays en quatre zones. Il existe aussi le système Lambert,
- le repère image : c'est le repère intrinsèque à l'image et décrit par les axes azimut et distance (u, v) .

Le repère local et le repère global sont liés par des relations simples car il s'agit souvent d'une simple conversion gradient/degré avec éventuellement un changement de méridien de référence. L'ellipsoïde International 1980 (associé au système WGS84) est définie par le demi grand axe $a = 6378137.0$ mètres et le demi petit axe $b = 6356752.3$ mètres comme indiqué sur la figure 1.13. Pour un point M de hauteur h par rapport à la surface terrestre et dont les coordonnées dans le repère (G, i, j, k) sont (x, y, z) , ces coordonnées respectent l'équation :

$$\frac{x^2 + y^2}{(a + h)^2} + \frac{z^2}{(b + h)^2} = 1 \quad (1.8)$$

1.3.3.1 Positions radar et positions image

Dans le repère lié au radar, chaque pixel de l'image nous apporte une information sur la distance radar-cible r ainsi que sur le temps écoulé t par rapport au début de la prise de vue grâce à l'information azimutale : coordonnées (t, r) . Chacun de ces pixels peut donc être associé à une zone restreinte et bien définie sur le sol terrestre. Il faut donc effectuer le passage entre coordonnées temps-distance (t, r) et coordonnées images (u, v) (u coordonnée azimut et v coordonnées distance). Ce passage se fait facilement [16], en connaissant le nombre N_f de vues (voir paragraphe 1.3.4.2) qui constitue l'image radar et la fréquence f_e d'échantillonnage en distance. Ainsi, la

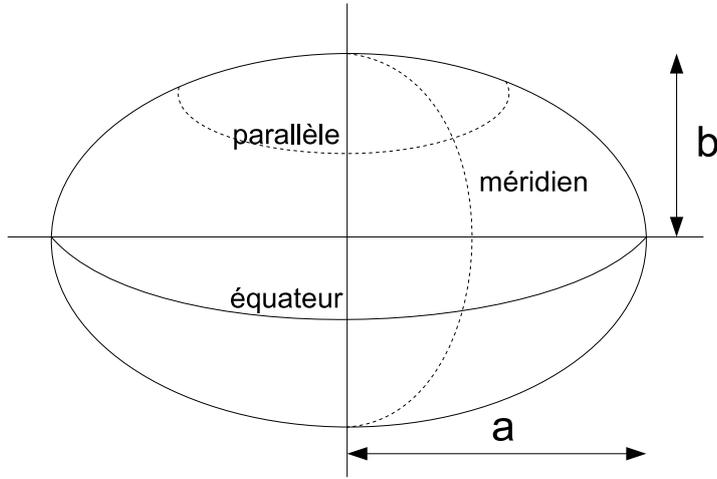


FIGURE 1.13 – Définition géométrique de l'ellipsoïde terrestre.

transformation entre les coordonnées (u, v) d'un point de l'image en coordonnées (t, r) (figure 1.12) du repère radar s'écrit avec :

$$\begin{cases} t &= \frac{N_f}{f_r} \cdot u + t_{init} \\ r &= \frac{c}{2f_e} \cdot v + r_0 \end{cases} \quad (1.9)$$

Il faut donc maintenant associer les coordonnées (t, r) au repère terrestre choisi.

1.3.3.2 Courbe d'iso-distance et cône Doppler

Si nous considérons un point de l'image par rapport au radar, celui-ci doit vérifier une équation en distance (iso-distance) et une équation du cône Doppler (iso-Doppler). Concernant la courbe d'iso-distance, un point M de la surface imagée et défini par sa distance r avec le radar vérifie :

$$|\vec{SM}| = r \quad (1.10)$$

Les points qui vérifient l'équation (1.10) décrivent une sphère, centrée sur la position du porteur et de rayon r . Avec le point M de coordonnées (x, y, z) et le point S de coordonnées (X_S, Y_S, Z_S) , l'équation (1.10) peut se reformuler ainsi :

$$(x - X_S)^2 + (y - Y_S)^2 + (z - Z_S)^2 = r^2 \quad (1.11)$$

Pour la courbe des iso-Doppler, le traitement de compression en azimuth effectué à la fréquence Doppler centrale f_D nous donne

$$f_D = \frac{2}{\lambda_c} \cdot \frac{\vec{S} \cdot \vec{SM}}{|\vec{SM}|} \quad (1.12)$$

En pratique, la fréquence Doppler centrale f_D est souvent nulle (angle de dépointage nul) donc le cône Doppler a un angle au sommet de 180° ce qui le transforme en plan perpendiculaire au vecteur vitesse du porteur.

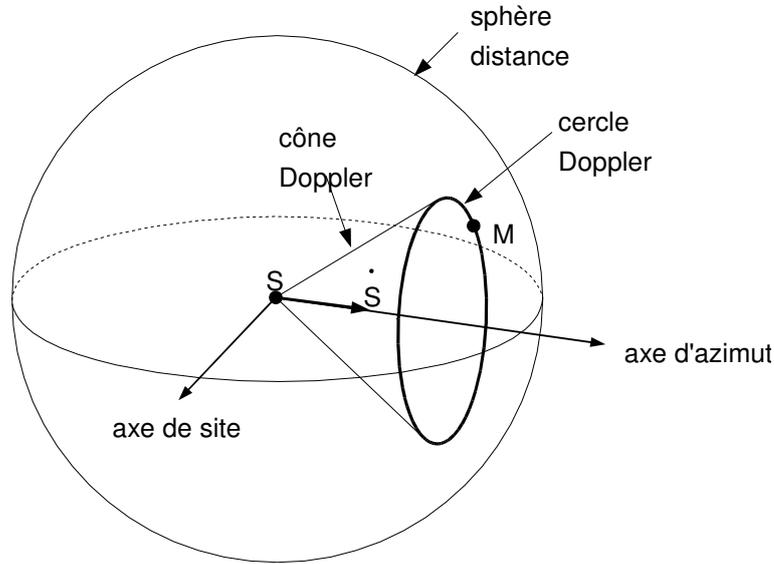


FIGURE 1.14 – Intersection de la sphère distance et le cône Doppler.

En considérant que le vecteur vitesse \vec{S} a pour coordonnées $(\dot{X}_S, \dot{Y}_S, \dot{Z}_S)$, l'équation (1.12) peut donc se transformer ainsi :

$$(x - X_S)\dot{X}_S + (y - Y_S)\dot{Y}_S + (z - Z_S)\dot{Z}_S = 0 \quad (1.13)$$

La solution au système d'équations formé par (1.11) et (1.13) contient les points de la scène se projetant au point image M . L'intersection entre la sphère distance et le cône Doppler définit un cercle appelé cercle Doppler (figure 1.14). Si l'on considère la Terre comme une géode parfaitement lisse, l'intersection de ce cercle et de la surface terrestre augmentée de l'estimation de la hauteur h_e , conduit à seulement deux solutions (figure 1.15) en utilisant le système régi par les trois équations : (1.8), (1.11) et (1.13)

L'une d'elle peut être éliminée grâce à la direction de visée du radar. Toutefois, la Terre ne se limite pas à une simple surface et les effets du relief conduisent à des solutions multiples, notamment dans les zones de compression.

1.3.4 Radiométrie des images ROS

Puisqu'une image radar est une organisation spatiale (géométrique) des niveaux d'énergie rétrodiffusée, cette information de radiométrie sert aussi à l'interprétation des images radar. On rappelle que l'information contenue dans les images ROS est enregistrée sous forme de nombres complexes : chaque pixel est caractérisé par une amplitude et une phase. La radiométrie complexe est constituée d'une partie réelle (notée I pour *In Phase*) et d'une partie imaginaire (notée Q pour *Quadrature*). L'information radiométrique peut donc être obtenue par détection linéaire ou quadratique :

- linéaire quand on travaille sur l'amplitude A : $A = \sqrt{I^2 + Q^2}$,
- quadratique quand on travaille sur la puissance P : $P = I^2 + Q^2 = A^2$.

La radiométrie de l'image dépend des propriétés de diffusion des surfaces illuminées que nous pouvons décrire sous la forme de mécanismes de rétrodiffusion.

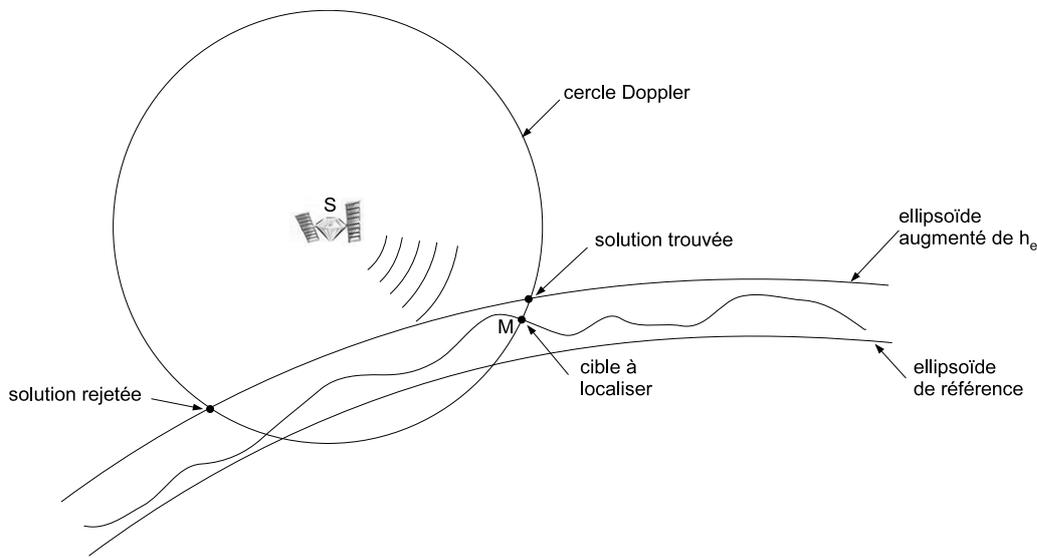


FIGURE 1.15 – Intersection du cercle Doppler et de la surface de la Terre.

1.3.4.1 Mécanismes de rétrodiffusion

Suivant l'orientation des surfaces réfléchissantes, les pixels associés présentent des niveaux radiométriques différents. Le relief a donc une influence sur la radiométrie : l'orientation des pentes influe sur l'angle d'incidence local. De plus, la nature des matériaux de surface et son environnement caractérisent la signature d'une cible sur l'image. Un autre paramètre dont l'influence est à prendre en compte dans les mécanismes de rétrodiffusion est la longueur d'onde du signal émis. Les longueurs d'onde utilisées sont de l'ordre du centimètre ou du mètre, ce qui correspond à des fréquences comprises entre 300 MHz et 30 GHz. Pour cette gamme de fréquence, l'interaction des ondes électromagnétiques avec les milieux naturels relève à la fois d'interactions de surface et de volume. Ainsi, on peut distinguer :

- les surfaces lisses renvoyant une onde dans une direction privilégiée : la réflexion est spéculaire. Quand la surface est orientée vers le radar, une grande partie de l'onde rétro-diffusée est renvoyée vers l'antenne, donc la surface apparaît très claire (exemple du versant d'une montagne). Dans le cas contraire, la surface peut apparaître très sombre (exemple des lacs),
- les surfaces rugueuses pour lesquelles l'onde est renvoyée dans toutes les directions : la réflexion est diffuse. L'intensité de l'onde rétro-diffusée dépend de l'angle d'incidence de l'onde, de la fréquence du signal, de la polarisation, des propriétés physiques de l'objet.

En effet, il convient donc de différencier les surfaces dites « rugueuses » des surfaces dites « lisses ». Pour cela, le critère de Rayleigh [17] [18] permet de définir une surface lisse en fonction de la hauteur moyenne h des irrégularités et de l'angle d'incidence local θ_i (figure 1.16) :

$$\begin{cases} h < \frac{\lambda_c}{8 \cos \theta_i} \text{ lorsque } \lambda_c \gg h \\ h < \frac{\lambda_c}{32 \cos \theta_i} \text{ lorsque } \lambda_c \simeq h \end{cases}$$

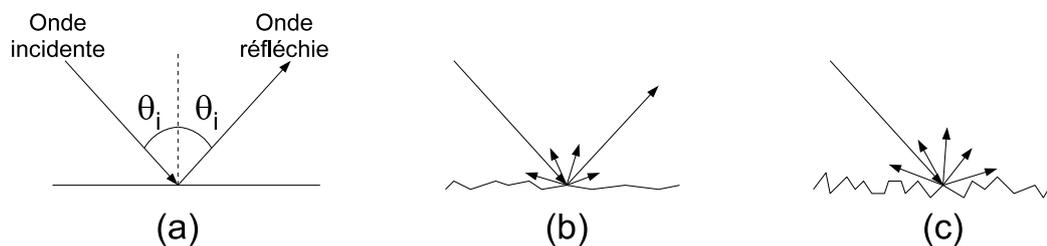


FIGURE 1.16 – Critère de Rayleigh : (a) surface lisse, (b) surface peu rugueuse et (c) surface très rugueuse.

Pour les surfaces naturelles, les mécanismes de rétrodiffusion sont complexes mais on peut distinguer trois types de surfaces :

- surfaces nues : il s’agit le plus souvent d’une simple réflexion. L’énergie des ondes renvoyées vers le radar est dépendante de la rugosité du sol. C’est aussi le cas des sols couverts de végétation basse illuminés par une grande longueur d’onde (bande L et plus),
- surfaces cultivées : la rétro-diffusion est plus complexe et dépend du type de culture, de l’orientation des parcelles, de l’hydrométrie. . . ,
- végétation : la longueur d’onde utilisée est déterminante. Pour la bande X par exemple, seul le haut de la canopée⁽¹⁾ peut imposer sa signature radar. Pour les autres fréquences, les interactions sont volumiques et dépendent de la hauteur et des dimensions de la végétation.

Enfin, il existe d’autres phénomènes de rétrodiffusion dont la réponse s’apparente plus à celle d’un diffuseur ponctuel. En particulier, les constructions urbaines sont propices à former des angles droits avec le sol. Le sol étant souvent lisse à proximité de ces constructions, il se présente alors des coins réflecteurs identifiés comme des dièdres ou des trièdres. Les trièdres et les angles droits orientés dans la direction du radar constituent des objets très rétrodiffusants : quel que soit l’angle d’incidence, les ondes sont réfléchies dans la direction d’émission (cas du dièdre exposé sur la figure 1.17). De plus, pour un faisceau d’ondes parallèles, la distance parcourue est identique : l’écho total renvoyé semble donc provenir d’un seul point, la base de l’objet. Les façades des bâtiments tournées vers le radar vont donc apparaître comme des bandes claires, là où se forme le double rebond des ondes. Pour les bâtiments orientés de manière quelconque par rapport à la trajectoire du radar, on observe généralement une image radar de ce bâtiment comme un « L » brillant. Il s’agit de l’image des deux façades qui sont vues par le radar (figure 1.18). Les zones d’ombre sont importantes du fait des angles d’observation radar (30° à 50° souvent). On observe également des réflexions multiples entre des objets artificiels (pont, pylône) et des surfaces d’eau. À titre d’information, des trièdres métalliques peuvent être posés au sol afin d’avoir sur l’image radar des points d’amers bien repérables [19].

On voit donc que, sur une image radar sans traitement, il est impossible de discerner les échos provenant d’une réflexion simple de ceux provenant d’une réflexion double. Toutefois, grâce aux informations polarimétriques, il est possible de classer

(1). La canopée désigne l’étage supérieur de la forêt, en contact direct avec l’atmosphère libre

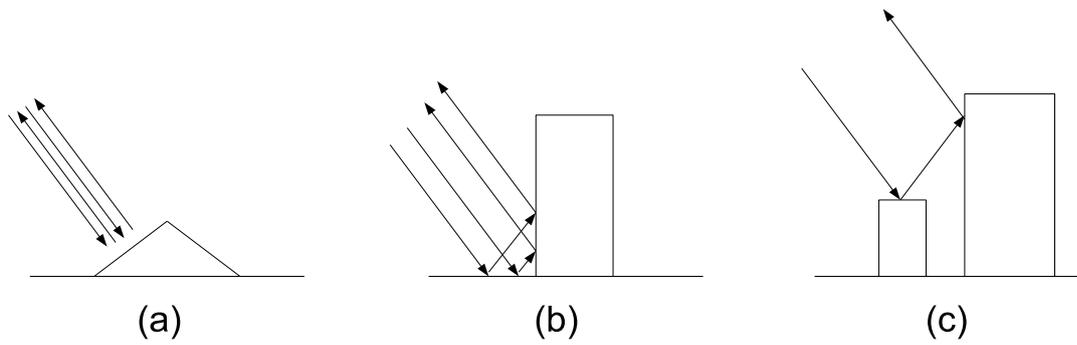


FIGURE 1.17 – Phénomène de rétrodiffusion : (a) sur une pente tournée vers le radar, (b) sur un coin formé entre le sol et une façade verticale et (c) multiple entre objets.

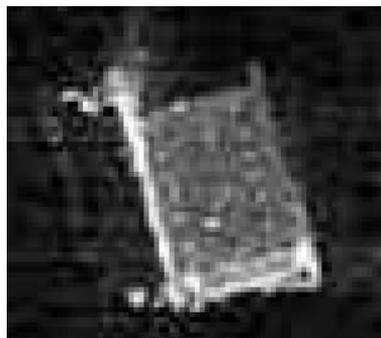


FIGURE 1.18 – Image radar d'un immeuble avec orientation quelconque.

ces différents modes de réflexion car le signal va subir des dépolarisations lors des différents rebonds. L'information de phase permet alors de différencier les rétrodiffusions faisant intervenir un nombre impair de réflexions de celles faisant intervenir un nombre pair de réflexions [20].

1.3.4.2 Phénomène de speckle

Il existe un autre phénomène de variation de radiométrie appelé *speckle* ou chatolement qui va donner aux images un aspect granuleux (phénomène non visible sur les images optiques). Le speckle apparaît comme un bruit chaotique et ne présente aucune relation évidente liée aux propriétés des objets observés. Les propriétés statistiques du speckle sont largement étudiées [21]. Si on considère la zone éclairée par l'onde incidente, cette zone peut être décrite par des diffuseurs élémentaires qui vont rétrodiffuser dans toutes les directions. Dans une cellule de résolution se trouvent un nombre fini N de réflecteurs élémentaires k dont les contributions $a_k e^{i\Phi_k}$ s'additionnent :

$$I = \sum_{k=1}^N |a_k e^{i\Phi_k}|^2 \quad (1.14)$$

Ces contributions peuvent donc se recombiner en phase ou en opposition de phase : le signal reçu par le radar est donc fluctuant à cause de ces différentes contributions. Ce phénomène de recombinaison est bien connu des utilisateurs de systèmes d'imagerie cohérente (laser, sonar, échographie). Du point de vue statistique, en considérant que les réponses des diffuseurs élémentaires sont indépendants et ont un comportement de type gaussien centré avec une variance σ , l'intensité I du *speckle* obéit à une loi du χ^2 à deux degrés de liberté [22] dont la densité de probabilité $p(I)$ s'écrit :

$$p(I) = \frac{1}{2N\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{I}{2N\sigma}\right) \quad (1.15)$$

Cette loi s'applique uniquement si la réponse entre les pixels est indépendante. Cependant, il est à noter qu'il existe une certaine corrélation spatiale entre pixels voisins d'une image radar. Cela s'explique par le fait que les pixels sont de forme rectangulaire et que la cellule de résolution radar (liée au diagramme de l'antenne) a une forme ovoïde (en excluant les lobes secondaires). Sur un même pixel, plusieurs cellules de résolution vont donc se chevaucher (figure 1.19).

Cette distinction entre cellule de résolution et pixel est importante à souligner car elle n'existe pas en imagerie optique. On voit donc qu'il est difficile, sans une adaptation particulière, d'appliquer des méthodes de traitement d'images optiques (onde non cohérente) aux images radar.

Ainsi, les opérations de filtrage de *speckle* sont primordiales afin d'améliorer l'interprétation des images radar. Ces opérations de filtrage restent délicates puisqu'il s'agit de supprimer le *speckle* tout en préservant l'information contenue dans les images (contours et textures). Pour cela, on peut dénombrer deux grandes catégories de méthodes de filtrage (qu'il est possible d'utiliser de façon complémentaire) :

- technique multi-vue (*multilook*) qui consiste à moyennner plusieurs images non-corrélées de la même région [23] : la bande de fréquence est divisée en N_f sous-bandes. Le filtrage est effectué par moyennage des N_f sous-images d'intensité.

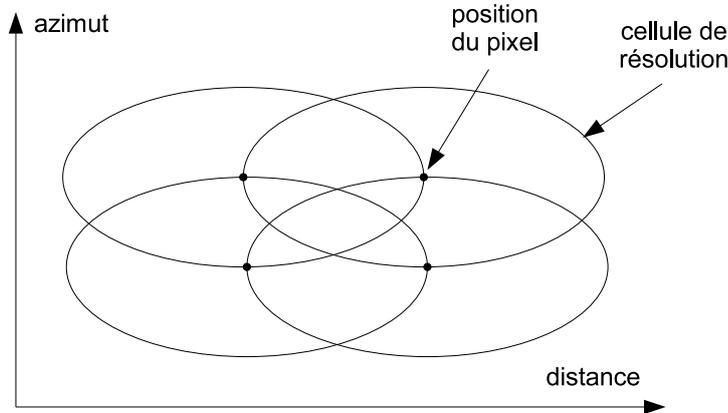


FIGURE 1.19 – Illustration du chevauchement des cellules de résolution.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle divise la résolution spatiale en azimut d'un facteur N_f . Cette technique appliquée lors de la formation de l'image ROS s'appelle également traitement par diversité de fréquence Doppler. Une variante de cette technique consiste à travailler directement sur l'image ROS formée en remplaçant la radiométrie de N_f pixels par leur moyenne,

- technique de filtrage sur l'image ROS formée. Les filtres les plus utilisés sont ceux de Frost [24], Lee [25], Kuan [26], Gamma MAP[27], Wu et Maître [28].

Enfin, il faut noter que le *speckle* est un bruit multiplicatif : il devient additif si l'on applique une transformation logarithmique à ce bruit. Ainsi, il est possible d'envisager d'autres techniques de traitement des images logarithmiques (basées sur le traitement des images optiques).

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons évoqué la plupart des grandeurs qui définissent une image radar. De plus, nous avons aussi introduit la notion de géométrie du porteur qui permet par la suite de définir les caractéristiques d'une image radar en termes d'interprétation. Nous nous sommes surtout intéressés aux défauts géométriques d'une image radar par rapport à une image optique. Enfin, nous avons introduit la notion de radiométrie d'une image radar et les défauts inhérents à la cohérence du signal radar à savoir le *speckle*. Toutes ces notions sont indispensables afin de pouvoir appréhender un autre degré d'interprétation appliqué à plusieurs images afin d'extraire une information de hauteur de chaque pixel de l'image radar. Les traitements associés à l'extraction de cette information de hauteur sont :

- l'interférométrie,
- la polarimétrie,
- la radarclinométrie,
- la stéréoscopie.

Nous allons essentiellement nous intéresser à la stéréoscopie, également appelée radargrammétrie.

Chapitre 2

Radargrammétrie

2.1 Méthodes d'extraction de relief en imagerie ROS

2.1.1 Définition

Maintenant que nous avons vu les mécanismes de formation d'images radar à synthèse d'ouverture, ainsi que leurs caractéristiques, nous allons nous intéresser au domaine d'application d'imagerie ROS qui nous intéresse dans notre étude : l'extraction du relief par radargrammétrie. La définition exacte de la radargrammétrie est donnée par Leberl [5] :

« Radargrammetry is the technology of extracting geometric information from radar images »

La radargrammétrie est donc la science qui englobe les techniques d'exploitation des images radar permettant de déterminer les caractéristiques géométriques du terrain et d'en représenter les formes ainsi que les détails. Historiquement, ce sont les méthodes stéréoscopiques qui ont émergé en premier pour déterminer la topographie à partir d'images radar. L'usage a donc voulu que la stéréoscopie en imagerie radar s'appelle radargrammétrie, par analogie avec la photogrammétrie en imagerie optique. La radargrammétrie se définit donc plus précisément comme une des techniques de reconstruction du relief à partir d'images radar.

2.1.2 Etat de l'art

Les travaux sur la radargrammétrie ont débuté après la seconde guerre mondiale pour des applications militaires dans un premier temps. Les premières bases de cette technique furent rapidement posées par La Prade [1] et amplement développées par Leberl [5]. Au fur et à mesure des études sur la restitution du relief à partir d'images radar, des états de l'art détaillés ont été établis par Rosenfield [29], Gracie et al. [30], Polidori [8], Toutin [31] ainsi que Maître et al. [11].

Toutefois, plusieurs techniques existent pour déterminer l'altimétrie à partir de données ROS :

- l'interférométrie,
- la polarimétrie,

- la radarclinométrie,
- la stéréoscopie (la radargrammétrie).

Le choix d'une technique dépend de la configuration des images et du type de relief. Par exemple, l'interférométrie et la stéréoscopie nécessitent absolument l'enregistrement d'au minimum deux images ROS tandis que la clinométrie peut s'utiliser sur une image seule. La polarimétrie quand à elle requiert l'enregistrement de plusieurs configurations de polarisation de l'onde : HH, VV, VH et HV.

2.1.2.1 Interférométrie

Les premières campagnes expérimentales avec un ROS aéroporté interférométrique pour des applications topographiques ont été menées par l'armée américaine au début des années 1970. Graham [2] fut le premier à publier les résultats avec cette nouvelle méthode interférométrique. L'intérêt de cette technique est allé croissant grâce aux données générées par SEASAT, SIR-B et ERS-1, ainsi que de nombreux systèmes aéroportés. Citons notamment les travaux de Zebker et Goldstein [32] [33] à la fin des années 1980. Depuis, de nouvelles missions satellitaires comme ENVISAT et RADARSAT ont permis de raffiner les méthodes utilisées. Le lecteur intéressé par les techniques interférométriques et leurs applications pourra se référer à Hanssen [34].

La méthode interférométrique (*InSAR*) nécessite l'utilisation au minimum d'un couple d'images mais il est possible d'en utiliser plus. Les images peuvent avoir été prises au même moment avec deux antennes distinctes (cas bistatique) ou à partir de deux passes espacées dans le temps d'un même porteur (cas monostatique), avec des trajectoires très proches. Dans ce dernier cas, il faut respecter un critère de base (distance entre les deux trajectoires) critique inférieure à 1 km [33] [35]. Les deux techniques sont utilisables pour la reconstruction de modèles numériques de terrain (MNT) [36]. Sur la figure 2.1, nous pouvons constater que dans le cas monostatique les trajectoires sont très proches et que la base interférométrique B_I est faible. Dans le cas bistatique, l'acquisition présente l'avantage d'éviter les problèmes de décorrélation de speckle, de décorrélation temporelle de surface, de décorrélation géométrique et de sensibilité aux mouvements de perturbations lors du vol du porteur. Par contre, la configuration monostatique avec orbites répétées permet d'étudier les variations topographiques (volcans, glaciers, séismes) [35] pour des prises de vue espacées dans le temps d'un même porteur : c'est l'interférométrie différentielle.

Le principe de la méthode interférométrique est d'exploiter la phase du signal : à partir des deux images ROS, un interférogramme est construit. Cet interférogramme contient des informations sur les différences de phase. Le MNT est alors calculé en déroulant les franges de l'interférogramme [35].

L'interférométrie permet d'avoir une très bonne précision sur la mesure de l'altitude car elle peut mettre en évidence de très faibles variations de terrain. La méthode interférométrique fait donc l'objet d'un grand intérêt pour la production de MNT et fournit des résultats opérationnels d'une grande précision : 3 à 30 m voire même inférieure à 3 m pour [37] par exemple. Un exemple de génération de MNT dans le cas bistatique est la mission SRTM (voir paragraphe 1.1.3) avec une précision altimétrique de 16 mètres. Malheureusement, l'interférométrie se trouve parfois en défaut à cause des sauts de phase (phase enregistrée à modulo 2π près) lors du déroulement de franges pour de forts reliefs ainsi qu'à cause des effets de propagation atmosphérique

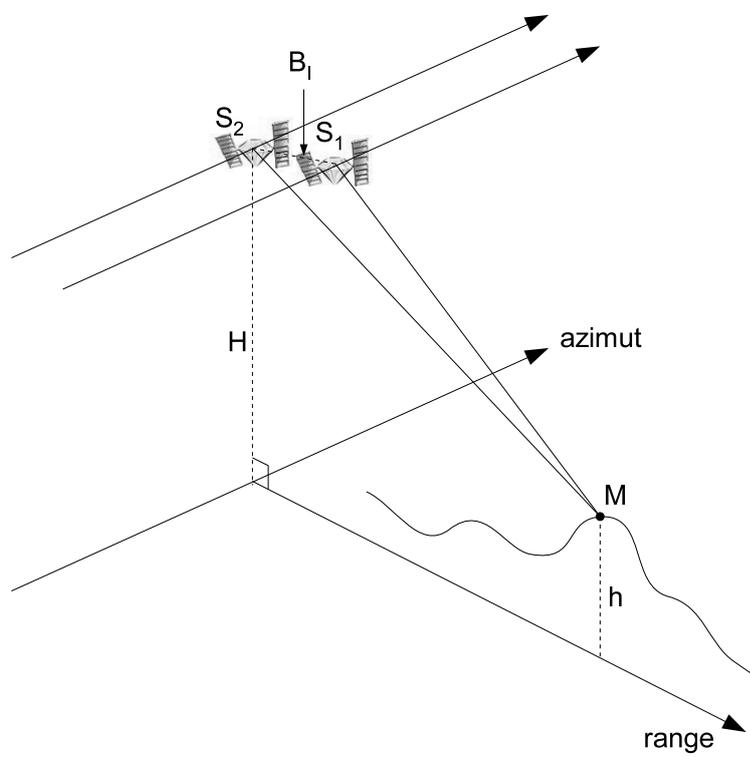


FIGURE 2.1 – Géométrie de prise de vue dans le cas d'une configuration interférométrique monostatique.

dans le cas de prises de vue espacées dans le temps.

2.1.2.2 Polarimétrie

La polarimétrie s'utilise avec succès pour faire de la classification des milieux naturels ou artificiels. Elle s'applique sur plusieurs images de la même zone, enregistrées avec des polarisations différentes. Une autre application de la polarimétrie est la mesure des pentes azimutales pour en extraire l'altitude du terrain [4]. La méthode s'appuie sur des comparaisons empiriques, corroborées par des analyses théoriques, entre la pente locale du terrain et le décalage co-polarisé de la signature.

Les radars ROS polarimétriques enregistrent l'amplitude et la phase des termes de la matrice complexe de rétrodiffusion. À partir d'un modèle théorique pour les surfaces peu rugueuses [38], les angles des pentes azimutales et les déplacements induits dans la signature par ces pentes sont proportionnels, dans une certaine plage de valeurs de pente. Schuler et al. [39] démontrent que les inclinaisons produisent des déplacements significatifs et prévisibles dans la signature polarimétriques de rétrodiffuseurs océaniques. L'altitude calculée est relative : un point de référence est nécessaire pour avoir une mesure absolue. Dans les zones forestières, les mécanismes de rétrodiffusion sont plus complexes et nécessitent d'utiliser un modèle adapté.

Il est possible d'obtenir une précision de 10 m à 40 m sur des terrains ouverts. L'utilisation de la polarimétrie est encore peu répandue pour la génération de MNT.

2.1.2.3 Radarclinométrie

Les méthodes radarclinométriques découlent de la photoclinométrie [40]. Elles s'appliquent généralement sur une image seule mais peuvent tirer profit de plusieurs images. Comme nous l'avons précisé dans la partie 1.3, l'interprétation des images ROS est difficile comparativement à celle des images optiques. Même si un observateur a la sensation de pouvoir discerner le relief grâce aux niveaux de gris, la réalité est tout autre à cause des distorsions dues aux principes de l'imagerie radar. Il est donc nécessaire de connaître ces mécanismes pour faire de la radarclinométrie.

Il existe plusieurs techniques de radarclinométrie, appelées *shape from X* [14] où X peut être *shading* ou *shadows*. Ces techniques existent aussi en imagerie optique.

Le *shape from shadows* ne peut être utilisé que localement sur les formes des objets. Bien que les zones d'ombre soient exemptes de toute information, les frontières avec les zones illuminées sont très nettes et peuvent alors être exploitées. Des mesures de distances permettent alors de déterminer par simple trigonométrie [41] la hauteur de structures verticales comme des bâtiments, des tours et des arbres.

Le *shape from shading* consiste à estimer la pente du terrain à partir du coefficient de rétrodiffusion. En s'appuyant sur des modèles de rétrodiffusion comme le modèle Lambertien, les valeurs d'intensité des pixels peuvent être reliées aux paramètres géométriques des surfaces correspondantes, notamment leur orientation. Widley [3] [42] a étudié le principe théorique. Celui-ci est utilisé par [14] et [43]. Cette méthode doit faire face à une difficulté majeure : pour un angle d'incidence donné correspond une infinité d'orientations de surface possibles, leurs normales décrivant un cône dont l'axe est la direction de visée et dont le demi-angle au sommet est égal à l'angle d'incidence (figure 2.2). À cause de cette ambiguïté, des contraintes comme des critères de conti-

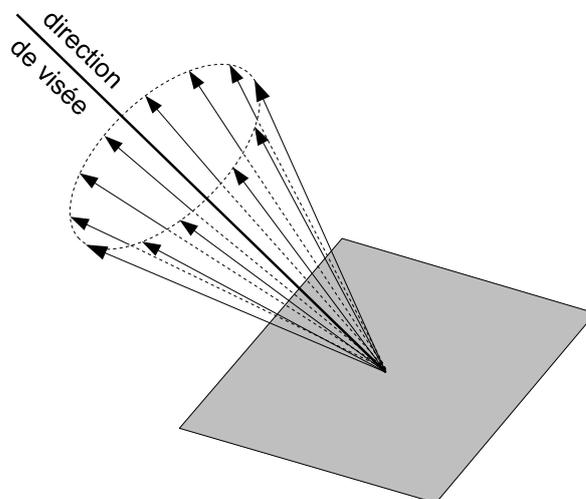


FIGURE 2.2 – Orientations possibles du vecteur normal à la surface locale étudiée.

nuité et de courbure locale doivent être rajoutées pour permettre la génération du MNT.

La méthode radarclinométrique se trouve vite limitée si la zone étudiée n'est pas homogène. Dans le cas contraire, pour obtenir une restitution la plus exacte possible, la radarclinométrie nécessite d'utiliser des modèles de rétrodiffusion pour chaque type de terrain (roche, végétation,...) et la grande diversité de comportement radiométrique sur les surfaces naturelles pose des difficultés pour l'élaboration de ces modèles. De plus, la radarclinométrie ne fournit que des altitudes relatives : elle nécessite donc des points de référence pour aboutir aux altitudes absolues et pour éviter de dévier en altitude.

La méthode est peu précise, ce qui conduit à des erreurs de calcul de pente de quelques degrés. Ces erreurs de pente conduisent à des erreurs altimétriques de l'ordre de la centaine de mètres dans les régions montagneuses. Par contre, on peut espérer des erreurs inférieures à 30 m pour des reliefs modérés. Elle s'applique cependant dans les situations difficiles lorsque l'on dispose seulement d'une seule image et d'aucune information cartographique. C'est le cas de sites tropicaux et de sites extra-terrestres.

2.1.2.4 Stéréoscopie - Radargrammétrie

La stéréoscopie à partir d'images ROS a fait l'objet de peu de travaux, comparé à l'engouement pour l'interférométrie. Pourtant, c'est déjà à partir des années 1960 que les méthodes stéréoscopiques de la photogrammétrie ont commencé à être appliquées aux images radar, conduisant au développement de la radargrammétrie [1]. À cause du manque de données radar prises en conditions stéréoscopiques, les premières études menées par Rosenfield [29], Gracie et al. [30] et Leberl [44] de 1968 à 1979 furent purement théoriques. Par la suite, des études furent conduites sur des images simulées par Kaupp et al. [45] ainsi que Domik [46]. Les lancements de SIR-B, ERS-1 et JERS-1 ont permis ensuite de développer les algorithmes d'appariement automatique sur données réelles [47]. À partir des années 90, les satellites SIR-C et RADARSAT

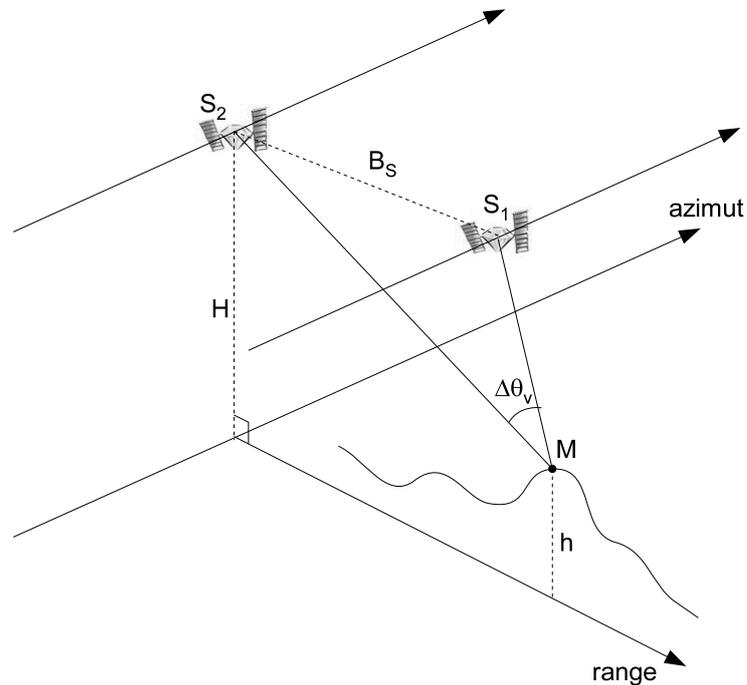


FIGURE 2.3 – Géométrie de prise de vue dans le cas d’une configuration stéréoscopique.

offrent une bibliothèque d’images multi-résolution et multi-incidence qui accroissent le développement des recherches dans le domaine stéréoscopique [48] [49]. La stéréoscopie obtient un regain d’intérêt suite aux limitations de l’interférométrie (sauts de phase lors du déroulement de franges) et la nouvelle disponibilité d’images prises avec des angles de vue différents. Cette technique a fait ses preuves lors de plusieurs études plus récentes : Nocera [14], Jacques [50], Paillou [51] et Oller [52].

On appelle couple stéréoscopique deux images d’une même scène mais prises sous deux angles de vue différents. La méthode stéréoscopique s’applique alors sur un couple d’images stéréoscopiques de la même zone. Ces images sont obtenues à partir de deux passes d’un même porteur mais avec des angles de visée différents. La différence de parallaxe entre les deux images, obtenue par la différence $\Delta\theta_v$ (figure 2.3) entre les angles de visée, apporte une information complémentaire et permet la reconstruction du relief. La base B_S entre les trajectoires est alors bien plus grande que dans le cas de l’interférométrie pour avoir une différence de parallaxe exploitable. Il est donc impossible de faire de la stéréoscopie avec deux antennes montées sur le même porteur : l’antenne du porteur unique doit donc être réglable en angle de visée pour imager la même zone en deux endroits différents.

La méthode stéréoscopique existe déjà en imagerie optique et est similaire au principe de vision humaine : l’écart entre les deux yeux offre une différence de point de vue qui permet au cerveau humain de percevoir les distances en profondeur. En imagerie radar, pour déterminer le relief, il est tout d’abord nécessaire d’identifier les points homologues entre les deux images : c’est l’appariement. Cette étape de mise en correspondance se fait souvent par corrélation entre les images. Une fois les points homologues identifiés, une carte de disparités est générée. La différence de parallaxe

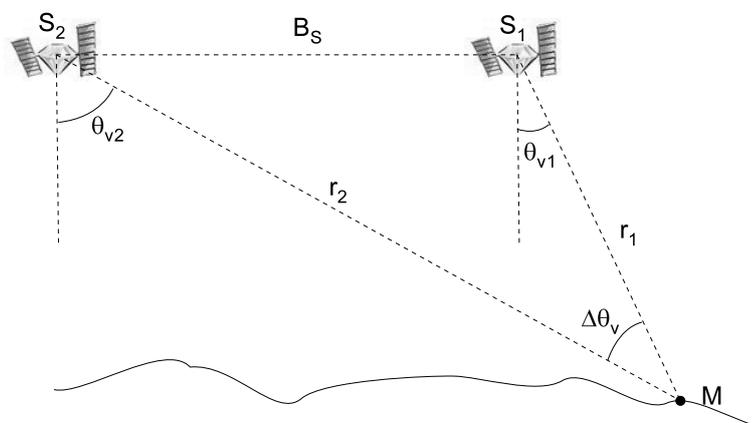


FIGURE 2.4 – Définitions des paramètres de prise de vue en stéréoscopie.

est obtenue grâce aux valeurs de ces disparités. La hauteur en chaque point peut alors être déterminée par simple calcul trigonométrique.

Au fur et à mesure des études, la stéréoscopie devient de plus en plus précise : la précision altimétrique était de l'ordre d'une centaine de mètres pour les premiers résultats. Depuis, les recherches ont permis d'aboutir à des précisions moyennes d'environ 10 m à 30 m selon la résolution du porteur, avec des erreurs isolées égales à 100 m maximum. Pour ces raisons, nous choisissons cette méthode pour notre étude et nous détaillons les principes dans la section 2.2.

2.2 Bases théoriques de la radargrammétrie

Que ce soit en imagerie optique ou radar, un couple d'images stéréoscopiques est une paire d'images de la même zone prise sous des angles différents. La stéréoscopie cherche à reconstruire l'information tridimensionnelle du terrain (le relief) en utilisant les différences de radiométrie entre les deux images.

La radargrammétrie découle de la stéréoscopie pour les images optiques, appelée photogrammétrie. Or, les images radars présentent des propriétés particulières (visée latérale, déformation distance, speckle décorrélé) et les techniques de photogrammétrie ne peuvent donc pas être appliquées directement.

2.2.1 Principe

Le système de prise de vue est placé en deux positions différentes et enregistre deux images de la même scène, avec des angles de visée différents. Cela peut être un satellite qui décrit deux orbites différentes ou une plate-forme aéroportée. On rappelle que l'écartement entre les deux trajectoires de prise de vue s'appelle la base. En mesurant le déplacement relatif des objets d'une image à l'autre (la parallaxe), il est possible de déterminer les mesures métriques. De plus, les informations concernant la localisation des capteurs lors de l'enregistrement des clichés est très importante : c'est la géométrie de prise de vue. Ces informations sur les positions et les angles sont indispensables pour estimer les distances tridimensionnelles par rapport aux objets.

Sur la figure 2.4, nous pouvons voir que les 2 satellites ont des angles de visée θ_{v1} et θ_{v2} différents. La différence $\Delta\theta_v = \theta_{v1} - \theta_{v2}$ s'appelle l'angle d'intersection. Ces 2 satellites sont espacés en distance par une base stéréoscopique B_S . La radargrammétrie implique plusieurs étapes indispensables : la mise en correspondance, la mesure de la différence de disparités et la reconstruction du relief.

2.2.1.1 La mise en correspondance

La mise en correspondance entre les images a pour but d'identifier les points homologues d'une image à l'autre. C'est ce qu'on appelle la phase d'appariement. La mise en correspondance des images est presque triviale à l'oeil nu : le cerveau humain parvient à comparer les zones et à identifier les points homologues. Pour automatiser le processus par voie informatique, l'étape de mise en correspondance peut se baser sur une ou plusieurs primitives :

- les pixels qui portent l'information radiométrique,
- les chaînes de contours ou les segments,
- les régions de l'image.

Pour obtenir une description dense, l'appariement est souvent basé sur une corrélation [11] [31] entre images, qui utilise donc l'information radiométrique des pixels. La méthode, décrite en 2.3.1 est par contre coûteuse en temps de calcul. Pour une description locale rapide et précise, les parties de l'image contenant des contours ou des segments sont intéressantes à utiliser. Il faut remarquer que le nombre de contours définis sur une image radar est insuffisant quand le relief est trop homogène [14], [44]. La faible quantité de contours ne permet pas d'opérer un appariement dense et l'information n'est donc pas assez pertinente.

Dans tous les cas, pour des images radar, les distorsions citées dans le paragraphe 1.3.1 sont à prendre en compte pour analyser et comprendre les différences d'une image à l'autre. La précision lors de cette étape est cruciale pour la qualité finale de la reconstruction.

2.2.1.2 La mesure de la différence de disparités

Pour l'imagerie radar, nous retrouvons des disparités en azimuth et des disparités en range. Dans le cas idéal d'une Terre plate et de porteurs avec des vols parallèles au sol, les disparités en azimuth seraient nulles. Comme il existe des imprécisions sur les trajectoires des porteurs et que la Terre est une géode, les disparités en azimuth existent. Elles peuvent être annulées en utilisant la contrainte épipolaire car cette méthode permet de situer les pixels homologues sur la même ligne azimuth d'une image à l'autre (voir paragraphe 2.3.2.1). Il ne reste ainsi plus qu'à déterminer les disparités en distance.

Les disparités en azimuth et distance déterminées pour chaque paire de points homologues permettent de réaliser une carte des disparités d'une image à l'autre.

2.2.1.3 La reconstruction du relief

À partir de la carte de disparités et de la géométrie de prise de vue, il est possible d'accéder à l'information altimétrique et de générer une carte de relief (MNT). Ce

MNT comporte des erreurs : il est donc filtré et régularisé pour éliminer les aberrations physiques (surfaces d'eau douces non planes, pic de relief trop abrupt ...).

Les principes de base de la radargrammétrie ayant été détaillés, nous allons maintenant pouvoir nous intéresser aux différentes configurations de prise de vue, en expliquant leurs avantages et défauts pour une application radargrammétrique.

2.2.2 Configurations de prise de vue

Les configurations où les trajectoires sont quelconques, sont très peu utilisées car les transformations géométriques sont complexes et l'appariement rendu difficile. Mais d'un point de vue géométrique, on obtient la même précision avec des trajectoires croisées ou des trajectoires parallèles. Pour des trajectoires parallèles, la zone imagée peut se situer entre ces deux trajectoires : on parle alors de système en *opposite-side*. Mais les trajectoires peuvent être situées du même côté de la zone imagée : c'est le système en *same-side*. Pour un satellite, ces configurations seront déterminées par la sélection de deux orbites montantes ou descendantes du porteur.

En *same-side* (voir figure 2.5), il est difficile d'utiliser une forte base stéréoscopique car dans ce cas, les images du couple sont très différentes et les distorsions d'une image à l'autre rendent l'appariement difficile. Pourtant, plus la base est grande avec des traces de satellites éloignés, plus la précision de la reconstruction est meilleure.

En *opposite-side* (voir figure 2.6), comme les satellites se trouvent de part et d'autre de la zone, il est aisé d'avoir une forte base stéréoscopique. Par contre, faire un appariement entre deux images prises en *opposite-side* est délicat : les zones d'ombre ne sont pas du tout les mêmes et les distorsions sont amplifiées du fait que les zones de compression (zones claires) et les zones de dilatations (zones sombres) sont permutées. D'ailleurs, une technique en *opposite-side* consiste entre autres à prendre le négatif d'une image [53] [54].

Si l'on compare les figures 2.5 et 2.6, nous constatons que pour une base stéréoscopique B_S identique, une erreur de Δr_1 sur la mesure de r_1 en distance entraîne une plus grande erreur de localisation (point M qui migre en M_e) en *same-side* qu'en *opposite-side*. Du point de vue géométrique, une configuration en *opposite-side* est donc intéressante de part sa robustesse face aux erreurs de localisation.

L'angle d'intersection $\Delta\theta_v$ et l'écartement B_S entre les porteurs jouent un rôle important pour la qualité et la précision de la restitution du relief. Toutin [31] signale que les études sur les images ne concordent pas toujours avec les études théoriques. En effet, dans les études théoriques, on ne prend en compte que l'aspect géométrique du problème en négligeant l'aspect radiométrique. Par exemple, même si l'on obtient une meilleure précision géométrique de localisation avec un angle d'intersection élevé, les différences radiométriques induisent des erreurs qui viennent dégrader cette précision. Le constat est identique pour une configuration en *opposite-side* : la précision de localisation géométrique est annihilée par les différences importantes de radiométrie d'une image à l'autre. Cela pose le problème de la détermination de la qualité du couple stéréoscopique : il faut trouver le bon compromis entre facilité de mise en correspondance et précision de la reconstitution altimétrique. Un critère utile pour déterminer ce compromis est le rapport B/H (Base/Hauteur). Ce rapport varie de 0.25 à 2 environ [11]. [55] précise que Sylvander propose une différence d'angle d'incidence de minimum égale à 8° (correspondant à un rapport B/H supérieur ou égal à 0.3) pour

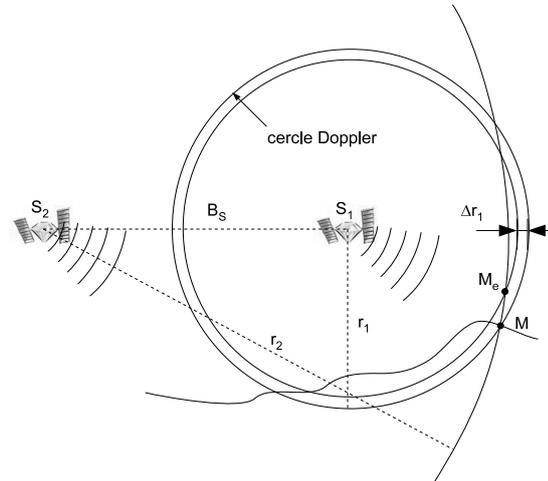


FIGURE 2.5 – Configuration *same-side* et effet d'une erreur en distance.

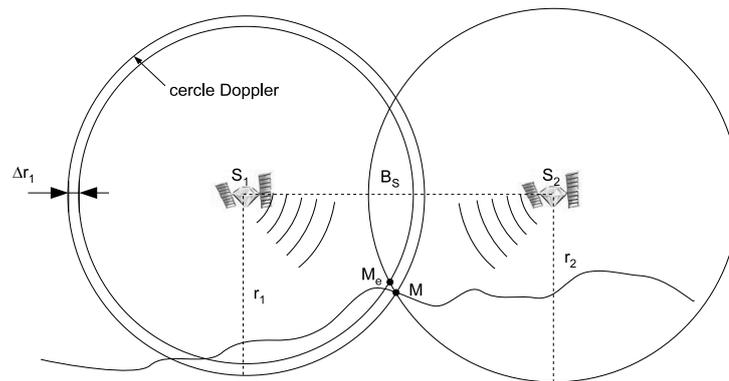


FIGURE 2.6 – Configuration *opposite-side* et effet d'une erreur en distance.

obtenir des MNT de précision altimétrique correcte.

Pour ces raisons, le choix d'une configuration *same-side* est plus judicieux pour commencer des études sur la radargrammétrie. Avec deux porteurs (ou le même porteur qui passe sur deux orbites différentes), si l'on veut obtenir un bon couple stéréoscopique d'une zone, il est donc préférable que les trajectoires soient les plus parallèles possibles.

2.2.3 Localisation mono-scène et multi-scènes

Sous cette appellation, nous désignons la localisation d'un point à partir de coordonnées (position et vitesse) du ou des satellites (suivant la configuration mono ou multi-scènes. Quelle que soit la configuration choisie, la localisation d'un point consiste à obtenir les coordonnées (x, y, z) d'un point d'une image radar. Dans une configuration mono-scène⁽¹⁾, nous avons la hauteur h d'un point pour retrouver sa localisation. Dans une configuration multi-scènes, nous utilisons la diversité de position pour obtenir les coordonnées d'un point de l'image principale. C'est le principe de la stéréoscopie radar.

2.2.3.1 Principe

Le principe central de la stéréoscopie est de localiser les points de la scène imagée grâce à deux trajectoires différentes de prise de vue.

Pour chaque pixel d'une image, les informations de distance et d'azimut vont permettre ensuite de localiser ce point sur la surface terrestre. La distance porteur-cible (*range*) permet de situer le point sur une sphère dont le centre est le porteur à un instant donné : c'est la sphère distance. L'azimut permet de situer le point sur un cône Doppler dont le sommet est le porteur à un instant donné. Pour la majorité des images ROS, la fréquence Doppler f_D est nulle et l'angle au sommet du cône est donc de 180° , ce qui transforme le cône en un plan : c'est le plan azimut, perpendiculaire à la trajectoire du porteur.

L'intersection entre la sphère distance et le plan azimut forme un cercle que l'on appelle cercle distance. La cible imagée se situe sur ce cercle et sans information supplémentaire, il est impossible de la situer plus précisément. Sur la deuxième image, les valeurs de distance et d'azimut du pixel homologue vont apporter les informations nécessaires à la localisation grâce à un autre cercle distance.

L'intersection entre les deux cercles distance est constituée de deux points. L'un des deux points se situe toujours, et de loin, hors de la zone observée [8] [55]. Ce point peut donc être éliminé en connaissant, par exemple, la direction de visée du porteur ou en isolant seulement les points de la zone observée. L'autre point correspond donc à la position dans l'espace du couple de pixels homologues.

2.2.3.2 Équations

L'analyse de la géométrie de prise de vue nous permet d'établir les équations de localisation (voir 1.3.2). Pour chaque image, nous établissons alors les équations de la sphère distance et du cône Doppler. Comme nous l'avons signalé précédemment,

(1). Cette configuration sera détaillée dans le paragraphe 4.3.2

à fréquence Doppler nulle, l'équation du cône se ramène à l'équation d'un plan, perpendiculaire au vecteur vitesse du porteur. Grâce aux équations (1.11) et (1.13), nous obtenons donc le système suivant :

$$\begin{cases} (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 & = r_1^2 \\ (x - X_1)\dot{X}_1 + (y - Y_1)\dot{Y}_1 + (z - Z_1)\dot{Z}_1 & = 0 \\ (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 & = r_2^2 \\ (x - X_2)\dot{X}_2 + (y - Y_2)\dot{Y}_2 + (z - Z_2)\dot{Z}_2 & = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

où nous rappelons que les coordonnées (x, y, z) sont les coordonnées du point M recherché. La position des porteurs (X_1, Y_1, Z_1) et (X_2, Y_2, Z_2) ainsi leur vitesse $(\dot{X}_1, \dot{Y}_1, \dot{Z}_1)$ et $(\dot{X}_2, \dot{Y}_2, \dot{Z}_2)$ en chaque point sont donc requises afin de résoudre ce système d'équations.

D'un point de vue mathématique, le système proposé est surdimensionné puisque nous avons quatre équations (iso-distance et iso-doppler par capteur radar) et trois inconnues (x, y et z). Dans notre cas (dégénéré puisque les fréquences doppler sont nulles), nous avons affaire à l'intersection de deux cercles coplanaires (iso-doppler) ce qui donne deux solutions possibles. Une seule des deux solutions satisfait la contrainte apportée par l'une des directions de visée du radar (iso-distance). Ainsi, l'autre direction de visée semble inutile pour le choix de la solution puisque l'analyse du problème en tenant compte de cette direction doit aboutir à la même solution. Toutefois, d'un point de vue physique, un pixel sur une image radar représente un volume dimensionné par les résolutions en distance et en azimuth et défini dans l'espace (figure 1.5). Avec le système d'équations décrit par (2.1) utilisé, le volume d'un pixel n'est pas pris en compte et ce pixel est représenté par un point situé au centre de ce volume. À moins d'une coïncidence heureuse (point étudié situé au centre de chacun des volumes), il est fort probable que le système d'équations (2.1) soit sans solution exacte si nous tentons de résoudre simultanément les quatre équations. Une approche rigoureuse et mathématique serait de déterminer l'intersection entre les deux volumes, ce qui augmente le nombre d'équations. Devant la complexité de la tâche, il est préférable de conserver le système d'équations précédent et de calculer une solution qui réponde au mieux à chacune des équations. Ce point particulier est abordé dans le paragraphe 4.4.2.

2.2.3.3 Résolution d'un système d'équations non-linéaires

Dans notre travail, nous sommes confrontés à la résolution d'équations non-linéaires que ce soit pour la configuration mono-scène ou la configuration multi-scènes. Cette résolution est un problème relativement bien maîtrisé et notre proposition de résolutions est basée sur une approche numérique. Cette approche est celle développée, entre autres, par MAPLE[®] et s'occupe de déterminer une solution numérique d'un problème dimensionné par des équations non-linéaires. Les méthodes numériques associées à MAPLE[®] sont décrites dans A et sont utilisées, par l'intermédiaire de la commande *solve* à chaque résolution d'un système dans le cas d'une localisation mono-scène ou multi-scènes.

2.2.4 Reconstruction géométrique à partir des disparités

La reconstruction se décompose en deux étapes de traitement :

- une phase de calibration géométrique où l'on calcule les paramètres de prise de vue et où l'on établit le modèle géométrique de prise de vue (voir paragraphe 1.3.2),
- une phase de reconstruction du MNT que nous décrivons ici.

Dans le cas de trajectoires parallèles avec altitude constante (voir [5] pour le cas général), la hauteur s'exprime avec la parallaxe p et les paramètres géométriques de prise de vue :

$$h = \frac{2HB_S + 2Hp - \sqrt{4H^2B_S^2 + p\Delta}}{p + B_S} \quad (2.2)$$

en écrivant que :

$$\Delta = 8B_S(H^2 - x_{sol}^2 + x_{sol}B_S) + p(4B_S^2 + p^2 + 4pB_S) + 4p(H^2 - x_{sol}^2 + x_{sol}B_S) \quad (2.3)$$

Cette équation se simplifie si l'on considère des fronts d'onde plans et non sphériques et cette approximation est applicable en imagerie satellitaire [11]. L'expression de la hauteur est alors fonction de la disparité et des angles de visée :

- en *ground range* :

$$h = \frac{p}{\cot \theta_{v1} \pm \cot \theta_{v2}} \quad (2.4)$$

- en *slant range* :

$$h = \frac{p}{\cos \theta_{v1} \pm \cos \theta_{v2}} \quad (2.5)$$

avec au dénominateur un signe (-) en configuration *same-side* ou un signe (+) en configuration *opposite-side*

Ces formules sont adoptées dans la plupart des travaux menés avec ERS, RADAR-SAT et SIR-B/SIR-C. Elles sont valables pour des différences d'altitude inférieures à 3000 mètres. Une fois l'altitude extraite pour chaque pixel de l'image, les équations de la géométrie de prise de vue permettent de situer ensuite ces points sur la surface terrestre. Nous avons énuméré les différents principes de base intervenant en radargrammétrie. Dans la section suivante, nous allons détailler ces principes pour la mise en œuvre d'une chaîne radargrammétrique.

2.3 Chaîne radargrammétrique

Une chaîne de traitement radargrammétrique permet d'aboutir à la génération d'un MNT à partir d'un couple d'images stéréoscopiques. Les processus peuvent être décomposés en étapes successives relativement indépendantes les unes des autres. Certaines de ces étapes sont incontournables comme l'appariement et la reconstruction. D'autres sont optionnelles comme l'approche pyramidale, le filtrage du speckle et l'interpolation du MNT. Mais elles contribuent plus ou moins fortement à améliorer la qualité finale du MNT.

2.3.1 Appariement par corrélation

2.3.1.1 Principe

L'appariement se fait le plus souvent par des techniques de corrélation dense [11] [31]. La mise en correspondance par corrélation nécessite de définir une fenêtre autour du pixel dont on cherchera le point homologue : cette fenêtre définit le motif à rechercher. Dans l'autre image, une fenêtre identique est déplacée dans une zone de recherche. Pour chaque décalage, on mesure la corrélation entre les deux fenêtres. La fenêtre utilisée est souvent centrée et carrée, de taille $(2n + 1) \times (2n + 1)$ pixels. En imagerie optique, n est de l'ordre de 2 ou 3 tandis qu'en imagerie radar, n varie souvent entre 5 et 10 [11] ce qui donne une taille de fenêtre comprise entre 11 et 21 pixels. On trouve cependant des études où la taille de la fenêtre peut aller de 9 à 41 [14] [56].

En imagerie radar, il est courant d'utiliser une corrélation croisée normalisée centrée (CCNC), en anglais *Zero-mean Normalized Cross-Correlation* (ZNCC), moins sensible aux variations du niveau moyen de la zone étudiée. Elle se calcule ainsi entre deux extraits d'image I_1 et I_2 :

$$\rho = \frac{E[I_1 I_2] - E[I_1]E[I_2]}{\sqrt{V(I_1)V(I_2)}} \quad (2.6)$$

L'espérance ou moyenne des intensités est calculée localement :

$$E[I_{1,2}] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{1,2}^k \quad (2.7)$$

avec N le nombre d'échantillons dans la fenêtre de corrélation, la fenêtre étant supposée de même taille sur les deux images.

La variance s'exprime par :

$$V(I_{1,2}) = E[(I_{1,2} - E[I_{1,2}])^2] \quad (2.8)$$

La valeur de ρ est comprise entre -1 et +1 : la plus forte ressemblance entre les fenêtres de corrélation s'obtient en cherchant la valeur de ρ maximum.

2.3.1.2 Mise en défaut de la corrélation

En rappelant les effets de déformation des images radars décrits dans la section 1.3, il est clair que la corrélation va échouer dans des zones où certaines parties du terrain n'apparaissent pas dans les deux images à la fois (zones d'ombre par exemple). La corrélation peut également échouer quand les structures n'ont pas les mêmes dimensions ou les mêmes formes (compression ou *layover*). C'est pourquoi il est important de bien définir la base stéréoscopique comme abordé en section 2.2. Malgré cela il reste dans les images une proportion de pixels difficiles à apparier, surtout pour des images de régions montagneuses où le relief élevé entraîne de fortes dissimilarités entre les deux clichés. En effet, non seulement la différence entre les angles de visée d'une image à

l'autre va entraîner des migrations en distance différentes, mais aussi une différence de radiométrie. En tenant compte de ces difficultés d'appariement, il faut alors éliminer les résultats de faux appariements et cela conduit à un MNT non complet.

Le choix du coefficient maximum de corrélation n'est donc pas optimum car ce coefficient n'est pas toujours garant d'un bon appariement [11] [16]. En effet, le coefficient maximum de corrélation n'est pas toujours situé sur le pixel homologue, particulièrement dans les zones homogènes [56] ou à répétition de motifs. Le pixel homologue est donc situé sur un maximum local du coefficient de corrélation mais ce pixel n'est pas détecté car le maximum de corrélation associé n'est pas forcément global.

2.3.2 Améliorations de la corrélation

Pour améliorer les résultats de l'appariement par corrélation, il existe plusieurs méthodes complémentaires ou de substitution.

2.3.2.1 Réduction de la zone de recherche

La zone de recherche peut être réduite en azimuth et en distance. Cela permet tout d'abord un gain en temps de traitement car il y a moins de calculs de corrélation à effectuer. Mais cela limite aussi le nombre de candidats à l'appariement, ce qui facilite le choix du meilleur candidat.

- l'utilisation des courbes épipolaires permet de limiter la recherche en azimuth. Tannous [13] montre l'existence des épipolaires en imagerie radar et on retrouve dans [55] [56] [52] la méthodologie pour ces opérations. Dans le cas idéal où les images sont parfaitement recalées, il suffit de ne rechercher que sur une ligne azimuth donnée mais il en pratique est préférable de faire une recherche sur une bande d'au minimum 3 lignes [55] [56] à cause des imprécisions sur le recalage,
- la connaissance a priori sur les hauteurs minimales et maximales de la zone étudiée permet de limiter la zone de recherche en distance. En effet, la formule (2.5) permet de calculer les disparités maximum en distance à partir de ces hauteurs et ainsi de limiter la zone de recherche en conséquence,
- la technique d'approche pyramidale (voir paragraphe 2.3.3) permet également de restreindre la zone de recherche.

La réduction de la zone de recherche permet alors de limiter le nombre de candidats à l'appariement et ainsi d'éliminer les candidats qui se trouvent en dehors de cette zone. Cela minimise alors les erreurs de disparités.

2.3.2.2 Critère de corrélation adapté aux images radar

Pour remédier aux erreurs de la ZNCC, il est possible d'utiliser une corrélation adaptée aux images radar en rajoutant des critères pour isoler les candidats : par exemple, ne prendre que ceux dont le coefficient est supérieur à un seuil, avec un pic de corrélation suffisamment étroit et distinct des autres candidats à l'appariement [11]. Il peut être également intéressant de rechercher d'autres types de critères. Par exemple, plusieurs types de corrélations ont été étudiés par Hervet [56] : la ZNCC, l'estimation de la corrélation sur les intensités et l'estimation de la corrélation sur les réflectivités. L'utilisation de l'estimation de la corrélation sur les intensités améliore les résultats par rapport à la ZNCC.

2.3.2.3 Modélisation d'un problème sous contraintes

Il existe plusieurs méthodes de résolution face à un problème d'optimisation combinatoire dont voici les principales : recuit simulé [57], algorithmes génétiques [58] [59], recherche tabou [56]. Ces trois méthodes présentées de façon détaillée dans [56] donnent de bons résultats mais restent coûteuses en temps de calcul.

Hervet [56] utilise par exemple une optimisation combinatoire grâce à une recherche tabou. Cette dernière consiste en une technique itérative d'optimisation des configurations locales pour minimiser un coût global associé aux disparités du couple d'images. La minimisation du coût se base sur la valeur de corrélation, sur le gradient de disparité et sur le nombre de point appariés. Un coefficient de pondération est appliqué sur chacun de ces trois paramètres pour maîtriser leur influence sur le coût global. Le but à atteindre est d'obtenir la valeur de corrélation la plus grande possible pour une carte de disparités la plus continue possible.

2.3.2.4 Autres pistes d'amélioration

Nous avons abordé plusieurs méthodes pour améliorer l'appariement, que ce soit en réduisant la zone de recherche ou en affinant les critères de sélection du meilleur candidat à l'appariement. Certaines sont relativement aisées à mettre en oeuvre, comme le filtrage des disparités ou l'approche bijective, bien que cette dernière soit coûteuse en temps de calcul. D'autres méthodes nécessitent de repenser entièrement la mise en correspondance :

- approche bijective ou croisée [60]. Cette approche consiste à mettre en place un algorithme qui effectue une recherche aller et une recherche retour : l'appariement est alors validé s'il conduit à relier deux pixels identiques. Les extrêmes douteux sont donc écartés et les pixels avec des conditions non remplies ne sont pas appariés. Par la suite, il faut interpoler pour combler les vides,
- filtrage des disparités [14]. Il est également proposé de filtrer la carte de disparités en utilisant un filtre moyen sur un voisinage de 3×3 , 5×5 ou 7×7 . Cela permet d'éliminer les erreurs locales de disparités, donc d'éliminer les faux appariements,
- appariement d'objets de haut niveau c'est à dire des formes ou contours plutôt que des points [61] [62] [63]. Il est également possible de faire une décomposition en splines ou ondelettes [56] [64]. Ce type d'appariement reste peu utilisé en radargrammétrie car il ne permet pas d'obtenir une carte de disparités dense et l'extraction de structures significatives en présence de speckle est délicate. Mais des nouveaux opérateurs de détection de contours ont été développés pour aboutir à une carte de disparité la plus dense possible, [50] [51] [65] [52],
- utilisation de plus de deux images pour lever les ambiguïtés : cette méthode décrite notamment par [55] utilise par exemple une image en *opposite-side* (avec une trajectoire non-parallèle) en complément d'un couple d'images prises en *same-side*,
- mesure d'autocorrélation. En faisant l'autocorrélation de la fenêtre de recherche, on peut avoir un aperçu de la surface d'autocorrélation et prévoir si la corrélation sera suffisamment fine (forme de pic) ou pas. Si les mesures d'autocorrélation mettent en évidence un voisinage susceptible d'être candidat à l'appariement, on peut le prendre en compte pour pondérer les résultats de la corrélation entre

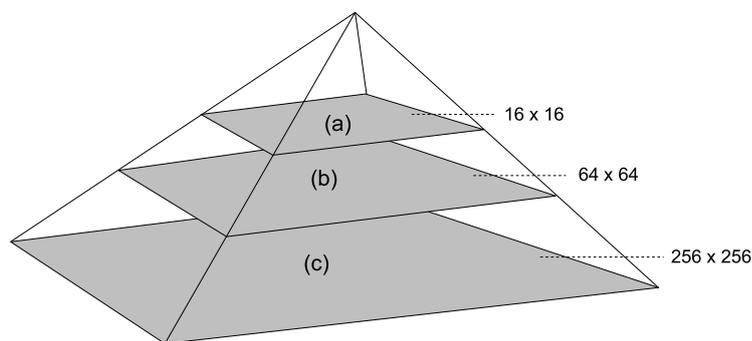


FIGURE 2.7 – Principe de l’approche pyramidale : (a) étape initiale, (b) étape intermédiaire, (c) étape finale.

les deux fenêtres,

- utilisation combinée avec d’autres techniques : clinométrie ou interférométrie. Ces autres méthodes permettent de fournir un MNT, même grossier, qui sera pris en compte pour prédire les disparités.

Toutes ces méthodes sont des pistes intéressantes à utiliser de façon complémentaire. Nous allons maintenant revenir sur une des méthodes de réduction de la zone de recherche : l’approche pyramidale.

2.3.3 L’approche pyramidale

L’approche pyramidale ou multi-échelle est une technique de mise en correspondance hiérarchique utilisée en imagerie optique et qui peut s’appliquer aussi sur les images radar [47] [66] [50] [16] [56]. Le principe est simple : à partir des images originales, on constitue une pyramide d’images de résolutions croissantes. Pour une image d’origine $I(u, v)$ de taille $M \times N$, avec un facteur de réduction maximum $2^{k_{max}}$, l’itération d’ordre i génère une image de taille $\frac{M}{2^k} \times \frac{N}{2^k}$, avec $k = k_{max} + 1 - i$. Sur les figures 2.7 et 2.8 sont représentées 3 des 5 images générées pour une taille d’origine 256×256 pixels avec un facteur de réduction maximum égal à 2^4 .

La valeur de k_{max} étant de l’ordre de 4 à 8 [11], on démarre alors l’appariement à l’étape $i = 1$. Cette première étape permet d’obtenir une première carte de disparités grossière mais fiable. On passe alors à l’étape $(i + 1)$ et pour chaque pixel, on dispose d’une information approximative sur la disparité. Cela permet de réduire considérablement le domaine de recherche pour l’étape suivante : la zone de recherche ne sera donc limitée qu’aux pixels situés autour de la disparité calculée précédemment. Le procédé est répété jusqu’à l’étape $(i = k - 1)$ de résolution maximum.

Pour les premières étapes, l’appariement est facilité car les images sont plus lisses, les zones homogènes sont réduites et les disparités sont moins importantes. La similarité entre les deux images est donc plus forte, ce qui est favorable à un appariement par corrélation.

La mise en oeuvre la plus simple est la pyramide par consolidation [14] qui consiste à passer à la résolution inférieure en effectuant la moyenne sur une fenêtre 2×2 pixels. Un meilleur outil de génération d’images à résolutions réduites est le filtre gaussien [67] [14] [11] de réponse impulsionnelle $w_k(u, v)$:

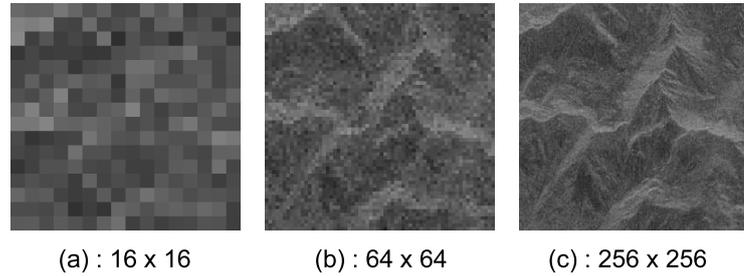


FIGURE 2.8 – Images radar à résolutions croissantes : (a) étape initiale, (b) étape intermédiaire, (c) étape finale.

$$w_k(u, v) = \frac{1}{2^k \sigma_I \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2^{2k} \sigma_I^2}\right) \quad (2.9)$$

avec σ_I l'écart-type de l'image $I(u, v)$.

Ce processus est largement employé pour obtenir des MNT sur de très grandes scènes comme par exemple des images RADARSAT 8000×8000 pixels. Cette méthode est efficace car elle permet de gagner en temps de calcul grâce à la réduction du domaine de recherche à chaque étape. De plus, l'intérêt de l'approche pyramidale réduit l'effet du speckle sur l'étape d'appariement.

2.3.4 Effets du speckle

Le speckle a une influence sur l'appariement car le chatoiement induit vient perturber la corrélation. La difficulté vient du fait que le speckle est totalement décorrélé entre les deux prises de vue à cause de la différence d'angle d'observation ainsi que l'espacement dans le temps des acquisitions. On ne peut donc pas utiliser les mêmes traitements qu'en interférométrie, où le speckle est souvent corrélé.

On peut limiter les effets du speckle lors de l'appariement par deux procédés :

- en augmentant la taille $(2n + 1) \times (2n + 1)$ de la fenêtre de corrélation. Par contre, le temps de calcul est plus conséquent. La précision de l'appariement est affectée dans le sens où l'on ne fait plus l'appariement sur un pixel et son voisinage proche mais sur un ensemble conséquent de pixels,
- en filtrant les images avant la corrélation comme expliqué dans 1.3.4.2.

L'intérêt du filtrage est difficile à démontrer car plusieurs études conduisent à des résultats contradictoires. Denos [66] et Jacquis [50] prouvent que le filtrage est bénéfique tandis que Dowman et al. [68] ont conclu le contraire après avoir testé douze filtres. Les filtres généralement retenus [69] sont les filtres de Frost, GammaMAP, médian ou moyennage. Le simple moyennage est le plus utilisé pour la mise en correspondance [14]. Dans [16], on signale que le type de filtre à choisir dépend de la zone étudiée : zones à textures ou zones à relief. Dans [50], il est fait également une comparaison de plusieurs filtres (filtres classiques, filtres locaux statistiques et adaptatifs, filtres morphologiques, filtres d'ordre adaptatifs). Pour l'application qui nous concerne (l'appariement par corrélation) et en se reportant toujours à [50], les filtres moyen, médian et médian à fenêtre directionnelle peuvent nous apporter une amélioration.

Dans cette étude, pour ces trois filtres, il y a une amélioration significative (10 %) du nombre de points bien appariés en comparaison avec une corrélation sur les images originales. Le filtrage aurait pour effet de maximiser les coefficients de corrélation et de réduire le nombre de candidats secondaires : la corrélation est fiabilisée. En revanche, si l'on s'intéresse plutôt à l'extraction de structures, il vaut mieux utiliser un filtre morphologique comparatif [70]. Même si ce filtre est moins efficace pour réduire le speckle, il préserve les détails des structures.

En conclusion, l'étape de filtrage du speckle n'est pas indispensable pour commencer à mettre en place une chaîne radargrammétrique [31]. Toutefois, l'utilisation d'un filtre en fonction de la zone étudiée peut se révéler bénéfique pour limiter les faux appariements.

2.3.5 Interpolation du MNT

Comme nous l'avons signalé dans la partie 2.3.1.2, les MNT obtenus ne sont pas complets. Il y a des vides dus aux pixels non appariés, soit parce que la corrélation a échoué soit parce que les pixels sont situés dans des zones d'ombre. Une technique d'interpolation permet alors de rajouter l'information nécessaire pour assurer la continuité du MNT. C'est une méthode qui donne des résultats réalistes du point de vue géomorphologique.

Par contre, si les zones où l'information manque sont étendues, comme dans le cas de vastes zones d'ombre, l'interpolation donnera des résultats éloignés de la vérité physique. Si l'on cherche absolument à avoir un MNT complet, il est possible :

- d'utiliser les informations de disparités calculées pour des images de faible résolution lors des étapes précédentes,
- de diffuser l'information connue pour les points situés à la frontière de la zone vide. On procède alors de façon itérative de façon à assurer une continuité de surface sur la frontière [14] [50],
- d'insérer des contraintes comme forcer l'horizontalité d'un plan d'eau, favoriser les plans verticaux ou horizontaux quand on connaît la géomorphologie des paysages de la zone.

Une fois le MNT interpolé, il est exploitable et peut donc être comparé avec un MNT de référence ou ré-échantillonné pour des applications topographiques.

2.4 Conclusion

Nous avons effectué une revue de toutes les méthodes de restitution du relief avant de nous intéresser plus précisément à la radargrammétrie. Les mécanismes de la radargrammétrie ont été décrits en détail afin d'introduire nos travaux dans ce domaine dans la partie suivante. Nous avons décrit en détail les différentes étapes du processus de traitement radargrammétrique qu'il faut appliquer à deux images radar obtenues sous deux angles de vue différents (effet de stéréoscopie). Les traitements et résultats associés sont connus comme le montre la littérature traitant de ce sujet. Toutefois, nous pouvons remarquer que chaque cas de prise de vue est unique et qu'il n'existe pas une seule méthodologie applicable à toutes les situations. Au contraire, il est nécessaire d'adapter les étapes de radargrammétrie suivant le type de la zone imagée.

Dans la suite du document, nous présentons donc le choix de nos traitements par rapport à la zone choisie.

Deuxième partie

Analyse et développement d'une
chaîne radargrammétrique

Chapitre 3

Précision de la reconstruction stéréoscopique

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé le principe de la stéréoscopie en imagerie radar afin de comprendre les mécanismes associés au traitement stéréoscopique des images radar. En particulier, nous avons souligné que l'importance du choix de la configuration de la prise de vue (base stéréoscopique, angle d'intersection, configuration « same-side » ou « opposite-side »). Cette configuration est aussi déterminante pour la mise en correspondance des images radar et la précision de reconstruction du relief. En particulier, cette précision correspond à la performance des algorithmes de radargrammétrie et cette performance peut se mesurer en termes d'erreurs de reconstruction en planimétrie (longitude et latitude) et en altimétrie. Ces erreurs ont un impact sur le modèle numérique de terrain obtenu à la sortie de la chaîne de radargrammétrie. Il est donc fondamental d'avoir un ordre de grandeur concernant ces erreurs en fonction de la configuration choisie pour le traitement radargrammétrique. Ainsi, afin d'estimer cet ordre de grandeur et pour une configuration donnée, l'outil de simulation peut s'avérer très riche en renseignement. Nous consacrons donc ce chapitre à la précision d'un traitement stéréoscopique.

Dans un premier temps, nous faisons un point sur les différentes études qui ont été menées à propos de la comparaison des études théoriques de précision de reconstruction et celles obtenues avec différentes missions d'imagerie radar. Puis, nous effectuons un rappel théorique concernant les erreurs de reconstruction et nous comparons les résultats de cette étude avec ceux obtenus par l'intermédiaire de notre simulateur d'images ROS. Enfin, nous concluons quant aux relations qui existent entre la précision d'une reconstruction stéréoscopique, le choix d'une configuration et le type de zone étudiée (relief).

3.2 Études sur les précisions en radargrammétrie

Nous présentons succinctement ici les différents travaux concernant ce domaine de la précision de modèle numérique de terrain. Nous nous attardons surtout sur les

| $\Delta\theta_v$ (°) | $\sigma_{x_{sol}}$ (m) | $\sigma_{y_{sol}}$ (m) | σ_z (m) |
|----------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| 6 | 106 | 106 | 125 |
| 23 | 75 | 44 | 53 |
| 28 | 100 | 91 | 73 |

TABLE 3.1 – Erreurs déterminées par F.Leberl sur le site de Cordon la Graza avec différents couples d’images SIR-B.

| $\Delta\theta_v$ (°) | $\sigma_{x_{sol}}$ (m) | $\sigma_{y_{sol}}$ (m) | σ_z (m) |
|----------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| 5 | 78 | 67 | 86 |
| 8 | 70 | 78 | 110 |
| 10 | 85 | 65 | 67 |
| 13 | 73 | 77 | 65 |
| 18 | 74 | 59 | 59 |
| 23 | 49 | 62 | 62 |

TABLE 3.2 – Erreurs déterminées par Leberl sur le site du Mont Shasta avec différents couples d’images SIR-B.

analyses de cette précision dont les résultats sont résumés dans [8], [5] et [71]. Ces travaux s’appuient essentiellement sur des données expérimentales.

La mission SIR-B, entres autres, a permis de générer quelques couples stéréoscopiques qui ont été étudiés et synthétisés notamment par F.Leberl [5]. Nous nous intéressons alors aux études reprises dans [8] et décrivant certains résultats (tableaux 3.1 et 3.2) sur deux sites différents : Cordon la Graza, Argentine et le Mont Shasta, États-Unis. En planimétrie, les erreurs de reconstruction sont décrites par $\sigma_{x_{sol}}$ selon l’axe distance (perpendiculaire à la trajectoire du radar), par $\sigma_{y_{sol}}$ selon l’axe azimut (parallèle à la trajectoire du radar) et, en altimétrie, l’erreur est décrite par σ_h . Nous rappelons que l’angle $\Delta\theta_v$ représente la différence de parallaxe entre les deux prises de vue (ou angle d’intersection - figure 2.3). Les valeurs obtenues montrent que la précision de la reconstruction est sensible à la différence d’angles de visée $\Delta\theta_v$. Pour $\Delta\theta_v < 10^\circ$, les erreurs sont de l’ordre de la centaine de mètres. Et pour $\Delta\theta_v$ proche de 20° , les erreurs avoisinent plutôt la soixantaine de mètres. Il semble donc difficile de trouver une relation entre les erreurs de reconstruction et l’angle d’interception.

Dans une autre étude, T. Toutin [71] dresse le bilan de quelques missions en imagerie radar en termes de précision de reconstruction. En particulier, il indique que la plupart des résultats expérimentaux invalident certaines études théoriques. En effet, il n’y a pas de lien significatif entre la précision du MNT reconstruit et l’angle d’intersection comme ont pu le montrer les études théoriques. La raison principale est que la radiométrie n’est pas prise en compte dans la plupart des études théoriques. Or la radiométrie est sensible au relief et au temps qui sépare deux acquisitions d’image (changement de végétation, modification de l’humidité, etc). Ces considérations, non prises en compte dans l’analyse théorique, viennent perturber la reconstruction avec des images ROS réelles. Ainsi, il est souvent impossible d’établir une relation claire

entre la précision des résultats et l'angle d'intersection. Toujours selon T. Toutin, le facteur le plus déterminant pour la qualité de la reconstruction est le type de relief de la zone étudiée. En effet, le relief a une influence très importante sur la précision des résultats car dans des zones de haute altitude, l'appariement est rendu difficile à cause des différences radiométriques importantes entre les deux images ce qui entraîne des imprécisions de mise en correspondance. Toutefois, on constate majoritairement que les erreurs de reconstruction sont de l'ordre de la résolution en distance. Selon les analyses de [71] sur les missions SIR-B et ERS, on obtient une précision légèrement inférieure à la résolution en distance (20 mètres) en configuration *opposite-side* et une précision légèrement supérieure à la résolution en distance (40 mètres) en configuration *same-side*. De manière similaire sur la mission RADARSAT, la précision est du même ordre de grandeur que la cellule de résolution en distance : la précision est légèrement supérieure à δ_d en mode fin (12 mètres) et elle est légèrement inférieure à δ_d en mode standard (20 mètres).

Finalement, nous retenons qu'il semble impossible de déterminer une relation mathématique entre les erreurs de reconstruction et l'angle d'intersection $\Delta\theta_v$ pour les images ROS réelles. Toutefois, afin de déterminer la configuration la plus optimale, nous allons étudier le principe de reconstruction stéréoscopique et les erreurs associées en ne s'attachant qu'à l'aspect géométrique du problème.

3.3 Reconstruction et précision

En faisant abstraction des problèmes de radiométrie liés aux images radar réelles, nous proposons d'utiliser un simulateur d'images ROS afin d'évaluer sur une image constituée de points brillants les ordres de grandeurs des erreurs de planimétrie et d'altimétrie sur des critères uniquement géométriques.

3.3.1 Formules de reconstruction

Nous allons nous intéresser essentiellement, dans cette partie, à la configuration « same-side ». Nous décrivons alors les deux positions du porteur du radar (ici représenté par un satellite) par les coordonnées (X_1, Y_1, Z_1) et (X_2, Y_2, Z_2) . Chacune de ces positions correspond à un passage du porteur au-dessus de la zone étudiée (voir figure 3.1). De plus, nous considérons un point M de cette zone dont la position en planimétrie est décrite par x_{sol} (le long de l'axe distance) et y_{sol} (le long de l'axe azimut) et la hauteur est décrite par h . Dans le cas d'une zone étudiée plane et en considérant des trajectoires de porteurs parallèles, la reconstruction tridimensionnelle décrite dans [5] nous permet de retrouver x_{sol} , y_{sol} et h avec :

$$\begin{cases} x_{sol} &= \frac{r_2^2 - r_1^2 + B_S^2}{2B_S} \\ y_{sol} &= Y_1 \\ h &= H - \frac{\sqrt{r_2^2 - x_{sol}^2} + \sqrt{r_1^2 - (B_S - x_{sol})^2}}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

La position azimutale y_{sol} ne dépend donc que de la position azimutale des satellites (Y_1 ou Y_2 puisque $Y_1 = Y_2$). Cette position se calcule donc à partir de la position du pixel sur l'image et de la résolution en azimut δ_a .

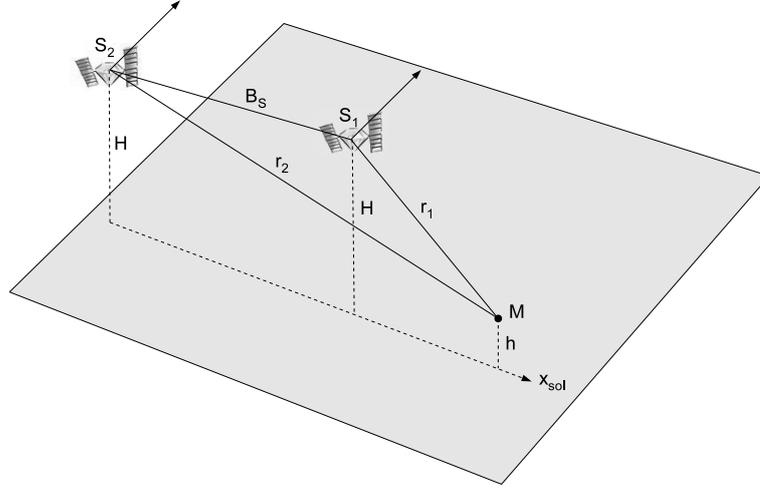


FIGURE 3.1 – Configuration same-side - rappel des variables utilisées

3.3.2 Erreurs de reconstruction

Afin d'exprimer les erreurs de reconstruction en fonction des paramètres de prise de vue, nous rappelons que les grandeurs θ_{v1} , θ_{v2} et θ_v , définies sur la figure 2.4, sont liées aux positions respectives du porteur. Dans une image radar à ouverture synthétique, un pixel représente un volume défini dans l'espace (voir figure 1.5). Chaque volume élémentaire est donc représenté par un point (exemple du point M dans notre développement). Cette approximation entraîne donc des imprécisions qu'il est possible de quantifier (voir [5]). Ces imprécisions donnent lieu à des erreurs qui sont données par l'intermédiaire d'une déviation standard en distance σ_d :

$$\begin{cases} \sigma_{x_{sol}} &= \sigma_d \frac{\sqrt{\cos^2(\theta_{v1}) + \cos^2(\theta_{v2})}}{\sin(\Delta\theta_v)} \\ \sigma_h &= \sigma_d \frac{\sqrt{\sin^2(\theta_{v1}) + \sin^2(\theta_{v2})}}{\sin(\Delta\theta_v)} \end{cases}$$

Il est aussi possible d'écrire les erreurs de construction en fonction des résolutions des images radar (δ_a en azimut et δ_d en distance) et d'un facteur k indiquant la relation de proportionnalité entre les erreurs de planimétrie et les angles de visée [8] :

$$\begin{cases} \sigma_{x_{sol}} &= k\delta_d \frac{\cos(\theta_{v1}) + \cos(\theta_{v2})}{\sin(\Delta\theta_v)} \\ \sigma_{y_{sol}} &= k\delta_a \\ \sigma_h &= k\delta_d \frac{\sin(\theta_{v1}) + \sin(\theta_{v2})}{\sin(\Delta\theta_v)} \end{cases} \quad (3.2)$$

Le système décrit par (3.2) nous permet d'établir quelques conséquences de la géométrie de prise de vue sur les erreurs de planimétrie et d'altimétrie.

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que l'erreur de planimétrie dans l'axe azimut est indépendante des angles de visée. Cette remarque est prévisible dans le sens où les images qui sont comparées pour la mise en correspondance sont dans une configuration épipolaire (même référence azimutale pour les 2 images).

Ensuite, les expressions de l'erreur de planimétrie $\sigma_{x_{sol}}$ et de l'erreur d'altimétrie σ_h sont inversement proportionnelles à la valeur de $\sin(\Delta_v)$. Ainsi, pour avoir des erreurs de reconstruction faibles, il est nécessaire d'avoir un angle d'intersection important (proche de 90°). Cet angle d'intersection Δ_v est d'autant plus grand que la base stéréoscopique B_S est grande.

Enfin, nous pouvons aussi indiquer que l'erreur de planimétrie $\sigma_{x_{sol}}$ diminue quand les angles θ_{v1} et θ_{v2} sont proches de 90° ce qui correspond à une visée rasante. Quant à l'erreur d'altimétrie σ_h , elle diminue lorsque les angles θ_{v1} et θ_{v2} sont proches de 0 c'est à dire pour une configuration en visée plongeante.

Donc, si nous nous en tenons à une approche théorique des erreurs de reconstruction stéréoscopique, nous avons une contradiction entre les exigences liées à une erreur minimale en planimétrie et une erreur minimale en altimétrie. Aussi, afin d'avoir une idée plus précise sur les valeurs des angles de visée aboutissant à un compromis sur les valeurs minimales d'erreur de reconstruction, nous proposons de faire une étude quantitative de ces erreurs par l'intermédiaire d'un simulateur d'images radar.

3.4 Simulation d'images ROS

3.4.1 Description des paramètres de mission

Le simulateur⁽¹⁾ que nous utilisons pour notre étude est un simulateur permettant de créer des images radar à partir d'une scène constituée de points brillants. La simulation est basée sur la réponse temporelle des points brillants établie avec les paramètres de vol (altitude, vitesse, angles de dépointage et de visée, etc) et du système radar (fréquence d'émission, bande passante, etc). L'intérêt évident de la simulation dans les études de radargrammétrie [72] est de pouvoir obtenir de nombreux couples stéréoscopiques afin simuler des acquisitions différentes en termes de configuration de vol (« same side » ou « opposite side »), de direction de trajectoire (parallèle ou quelconque) et d'angles de visée (paramètre important pour l'étude de leur influence sur les erreurs de planimétrie et d'altimétrie).

Ainsi, afin de pouvoir faire des comparaisons avec l'étude qui est faite dans le chapitre suivant, nous choisissons les paramètres de vol et de système radar associés à la mission SIR-C. Les paramètres de vol sont donc :

- altitude du porteur $H = 228273$ mètres,
- vitesse du porteur $v = 7253$ mètres/seconde,
- angle d'ouverture en azimut $\theta_L = 0.27^\circ$,
- angle d'ouverture en distance $\theta_l = 5.31^\circ$,
- l'angle de dépointage est nul et l'angle de visée est réglable de 20° à 80° .

et les paramètres du système radar :

- fréquence de récurrence $f_r = 1736$ Hz,
- durée de l'impulsion $\tau = 16.9 \mu s$,
- fréquence d'émission $f_c = 5.3$ GHz,
- bande de modulation $B_p = 11.2$ MHz.

À titre d'information, à l'aide des paramètres décrits ci-avant, il est possible via le simulateur de calculer des caractéristiques intermédiaires comme la résolution et la

(1). Ce simulateur est développé par Laurent Ferro-Famil, Saphir Team, IETR.

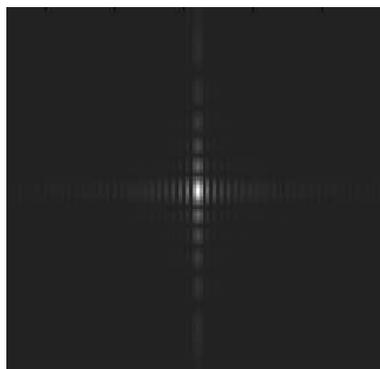


FIGURE 3.2 – Point brillant imagé par le simulateur d’images ROS.

taille d’un pixel. Nous retrouvons donc les paramètres de la mission SIR-C à savoir :

- résolution en azimuth $\delta_a = 6$ mètres,
- résolution en distance projetée au sol $\delta_s = 27$ mètres,
- taille d’un pixel en azimuth : 4.2 mètres,
- taille d’un pixel en distance : 13.3 mètres.

Avec ces conditions de prise de vue et de paramétrage du capteur, la réponse d’une scène constituée d’un unique point brillant est présentée sur la figure 3.2. Nous pouvons donc vérifier une réponse de type sinus cardinal dans les axes azimuth et distance et une amplitude importante pour le pixel représentant la position du point brillant.

3.4.2 Description de la scène radar

Les caractéristiques du vol et du radar étant définies, il nous reste à décrire la scène radar d’intérêt. La scène radar que nous définissons doit nous permettre de réaliser une étude systématique sur les erreurs de planimétrie et d’altimétrie. Pour cela, cette scène correspond à une zone de 1000 mètres \times 2000 mètres⁽²⁾ contenant 123 points brillants disposés sur une grille régulière de 41 points en azimuth \times 3 points en distance avec un décalage en azimuth régulier des lignes de points brillants (voir figure 3.3 pour un angle de visée de 35° ⁽³⁾). Ainsi, dans cette configuration, nous avons peu d’influence d’une réponse d’un point brillant sur celle d’un point brillant voisin.

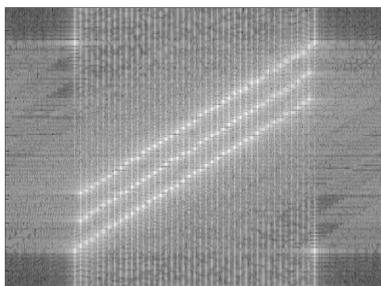
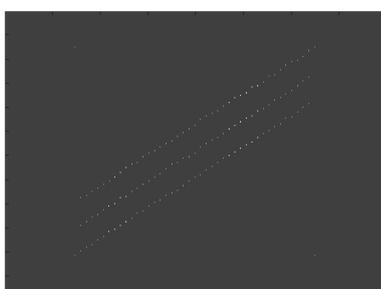
Enfin, pour recouper avec des résultats que nous obtenons dans le chapitre suivant, nous choisissons une altitude de ces points, constituant la scène radar, comprise entre 1000 mètres et 3000 mètres (zone montagneuse)⁽⁴⁾. Pour chaque point brillant, la distribution des hauteurs se fait par incrémentation de 50 mètres dans la direction azimuth avec ajout aléatoire d’une hauteur comprise entre -20 mètres et +20 mètres.

Puisque nous souhaitons effectuer une étude de l’influence des conditions de prise de vue uniquement sur les erreurs de planimétrie et d’altimétrie, nous appliquons un traitement sur les images simulées afin d’extraire les maximums locaux de cette image (voir figure 3.4).

(2). Ce sont les tailles de scènes extraites de la mission SIR-C du chapitre suivant donnant un temps de calcul raisonnable pour l’appariement.

(3). Cette valeur d’angle de visée est celui de la mission SIR-C étudiée.

(4). Dans cette simulation, la courbure terrestre n’intervient pas.

FIGURE 3.3 – Image ROS simulée pour un angle de visée θ_v de 35° .FIGURE 3.4 – Image ROS simulée puis seuillée pour un angle de visée θ_v de 35° .

Ce traitement nous permet de simplifier l'étape d'appariement (opération de corrélation) car l'image est alors constituée de « zéro » (pas de point brillant) et de « un » (présence d'un point brillant). En outre, il faut indiquer que l'utilisation du simulateur dans une configuration de porteurs avec trajectoires parallèles (configuration *same side*) et horizontales (hauteur du porteur constante) nous permet d'obtenir directement des couples d'images ROS en géométrie épipolaire : chaque pixel d'une image trouve son homologue dans la même ligne « azimutale » de l'autre image (ce qui induit aussi une simplification de l'étape d'appariement).

3.5 Précision de reconstruction sur images simulées

Nous allons maintenant utiliser les résultats des simulations pour exposer les erreurs planimétriques et altimétriques dans différentes configurations de prise de vue, en faisant varier les angles de visée θ_{v1} et/ou θ_{v2} des porteurs. Les images étant en géométrie épipolaire, l'opération de corrélation effectue une recherche des maximums en utilisant une fenêtre de corrélation de 3 pixels en azimut et 3 pixels en distance. Les formules (3.1) sont utilisées pour la reconstruction du relief puisque la configuration de prise de vue répond aux hypothèses d'une scène étudiée parfaitement horizontale, avec des trajectoires de porteurs parallèles (géométrie épipolaire). Pour le calcul des erreurs, nous effectuons la différence entre la reconstruction effectuée après appariement et la scène radar utilisée pour la simulation. Les erreurs de planimétrie sont obtenues en prenant les erreurs de reconstruction en azimut σ_{az} et en distance σ_{rg} après reconstruction et en associant la valeur associée à $\sqrt{\sigma_{az}^2 + \sigma_{rg}^2}$. Pour l'ensemble de cette étude, nous nous limitons à une configuration *same-side* puisque cette configuration

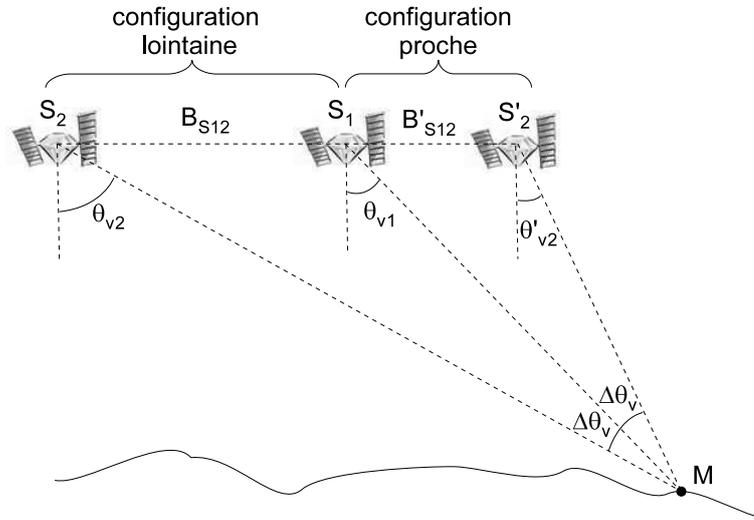


FIGURE 3.5 – Deux types de configuration pour un angle θ_{v1} intermédiaire.

est celle retenue pour notre application dans le chapitre suivant.

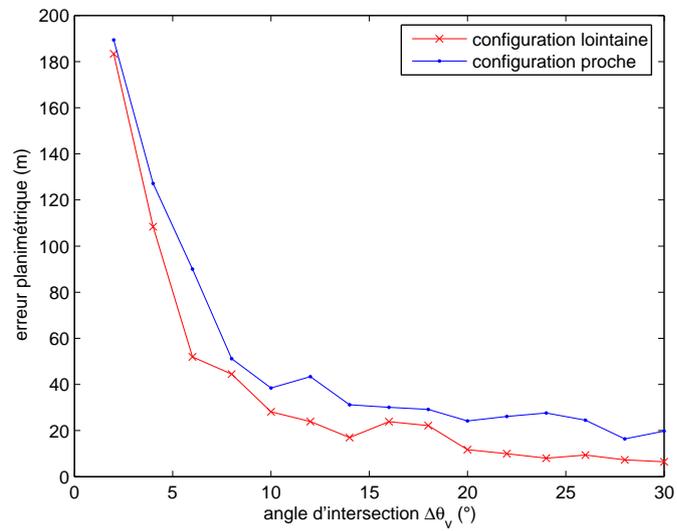
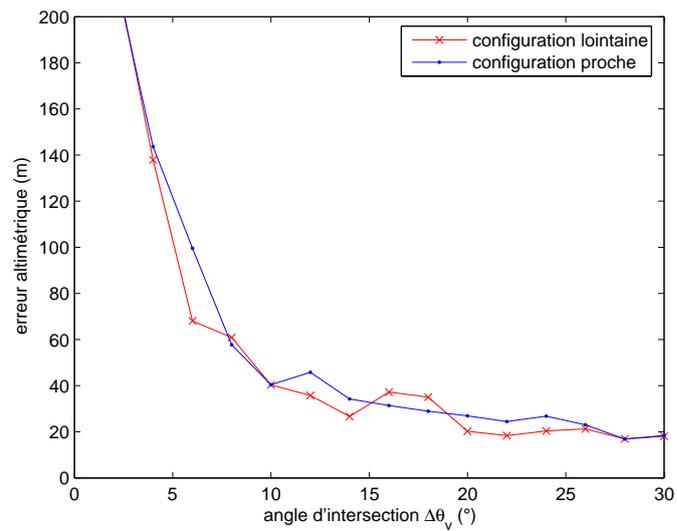
3.5.1 Angle de visée de référence fixe

Le but de cette première étude concerne la variation des erreurs de reconstruction selon la configuration de prise de vue des porteurs. Par rapport à la scène radar, nous fixons donc la position du premier porteur en S_1 (voir figure 3.5), avec un angle de visée de référence $\theta_{v1} = 50^\circ$. Les angles de visée pour θ_{v2} sont variables entre 20° et 80° . Il existe alors deux positions du porteur (position S_2 et position S'_2) qui donnent le même angle d'intersection $\Delta\theta_v$ à partir de la position S_1 . Nous considérons donc une configuration dite lointaine (angle de visée θ_{v2} rasant) avec le couple de positions S_1 et S_2 ainsi qu'une configuration dite proche (angle de visée θ'_{v2} plongeant) avec le couple de positions S_1 et S'_2 .

Ainsi, nous faisons varier θ_{v2} de 20° à 48° (configuration proche) puis de 52° à 80° (configuration lointaine). Les angles d'intersection $\Delta\theta_v$ sont donc compris entre 2° et 30° (et ce quelque soit la configuration dite proche ou lointaine). Nous présentons les erreurs de reconstruction (planimétrie et altimétrie) sur les figures 3.6 et 3.7.

Tout d'abord, les résultats montrent clairement que les erreurs d'altimétrie et de planimétrie sont inversement proportionnelle à l'angle d'intersection $\Delta\theta_v$. Ces résultats sont conformes aux formules (3.2) décrivant l'erreur de reconstruction : les grandeurs σ_x et σ_h sont inversement proportionnelles à $\Delta\theta_v$. D'un point de vue quantitatif, les erreurs de reconstruction (planimétrie ou altimétrie) sont de l'ordre de la centaine de mètres pour $\Delta\theta_v < 5^\circ$. En d'autres termes, nous pouvons dire aussi que les erreurs de reconstruction sont inversement proportionnelles à la base stéréoscopique B_S .

Ensuite, nous constatons que la configuration lointaine offre moins d'erreurs de reconstruction que la configuration proche. En moyenne, les erreurs planimétriques en configuration lointaine sont supérieures de 14 mètres par rapport à la configuration proche. En ce qui concerne les erreurs altimétriques, les différences ne sont pas notables.

FIGURE 3.6 – Erreurs planimétriques pour $\theta_{v1} = 50^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 30° .FIGURE 3.7 – Erreurs altimétriques pour $\theta_{v1} = 50^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 30° .

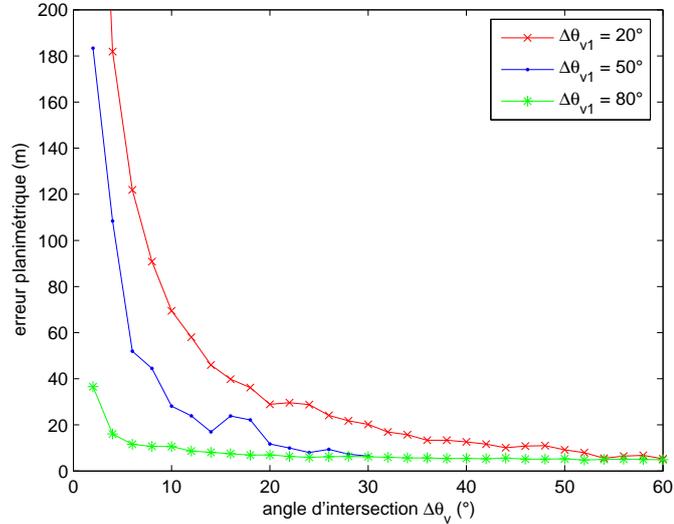


FIGURE 3.8 – Erreurs planimétriques pour $\theta_{v1} = 20^\circ, 50^\circ, 80^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 60° .

3.5.2 Variation de l'angle de visée de référence

Afin d'étudier plusieurs configurations possibles, nous faisons évoluer l'angle de visée de référence : $\theta_{v1} = 20^\circ$ et $\theta_{v1} = 80^\circ$. Avec ces valeurs d'angle, nous couvrons une large gamme de valeurs pour $\Delta\theta_v$ qui peut donc varier de 2° à 60° . Les erreurs de reconstruction sont présentées sur les figures 3.8 pour les erreurs de planimétrie et 3.9 pour les erreurs d'altimétrie. Afin de pouvoir comparer avec les résultats au paragraphe précédent, nous ajoutons sur les courbes des figures 3.8 et 3.9, la courbe correspondant à une configuration lointaine pour $\theta_{v1} = 50^\circ$.

Ces résultats confirment qu'une configuration lointaine ($\theta_{v1} = 80^\circ$) offre une meilleure précision de reconstruction qu'une configuration proche ($\theta_{v1} = 20^\circ$). En effet, pour $\theta_{v1} = 80^\circ$, la précision planimétrique est inférieure à 10 mètres dès que $\Delta\theta_v$ est supérieur à 10° tandis que pour $\theta_{v1} = 20^\circ$, un angle d'intersection $\Delta\theta_v$ supérieur à 50° est nécessaire pour atteindre cette précision.

Nous rappelons que la résolution en distance δ_d est égale à 27 mètres. Ainsi, d'après notre étude, les erreurs de reconstruction planimétriques peuvent être inférieures à cette résolution en distance (figure 3.8). Quant aux erreurs altimétriques, elles sont beaucoup moins sensibles aux variations de l'angle de visée θ_{v1} puisque les résultats sont très similaires quelque soit la configuration choisie (figure 3.9). En première approximation, les erreurs en altimétrie deviennent inférieures à la résolution en distance δ_d lorsque l'angle d'intersection $\Delta\theta_v$ est supérieur à 20° .

3.5.3 Conclusion sur le choix d'une configuration

Comme nous l'avons évoqué en section 2.2.2, nous rappelons que pour une bonne reconstruction du relief, il est nécessaire de trouver un compromis entre la facilité d'appariement et la précision de la reconstruction. Cette première étude permet de

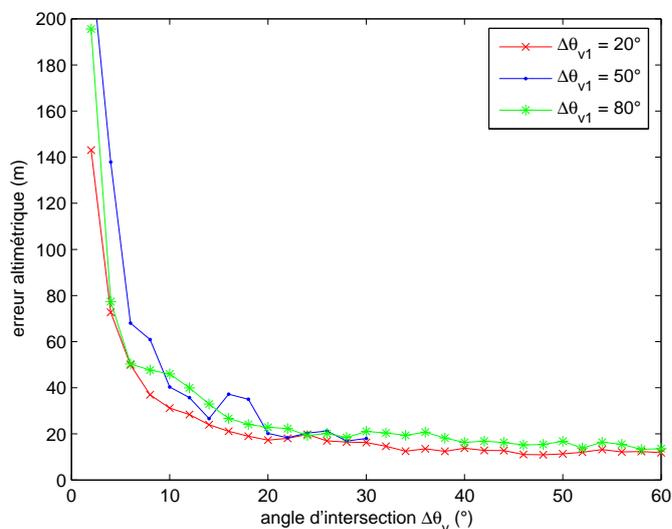


FIGURE 3.9 – Erreurs altimétriques pour $\theta_{v1} = 20^\circ, 50^\circ, 80^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 60° .

constater qu'un angle $\Delta\theta_v$ trop faible entraîne des erreurs importantes tant sur l'altimétrie que sur la planimétrie. De plus, il est préférable de se positionner en configuration lointaine plutôt qu'en configuration proche pour améliorer la précision des résultats.

Si l'on se place dans la configuration des images réelles de la mission SIRC que nous étudions au chapitre suivant, nous avons alors $\theta_{v1} = 35^\circ$ et $\theta_{v2} = 50^\circ$. La moyenne de la précision planimétrique est donc de 32 mètres et la précision altimétrique de 35 mètres. Dans ces conditions idéales d'appariement et de calcul de reconstruction du relief, nous ne pouvons donc pas prétendre obtenir un MNT de précision inférieure à la trentaine de mètres.

3.6 Conclusion

La reconstruction stéréoscopique pose le problème de la précision du MNT obtenu à partir du couple d'images radar stéréo (précision altimétrique et planimétrique). Les résultats de plusieurs études expérimentales en radargrammétrie ne valident pas le comportement théorique attendu. Cela s'explique par le fait que les différences radiométriques viennent perturber la mise en correspondance des images, surtout dans des régions de haut relief. Toutefois, les résultats expérimentaux présentés indiquent que la précision de reconstruction est généralement de l'ordre de grandeur de la résolution en distance δ_d .

Aussi, afin de valider la trame de notre chaîne radargrammétrique et de retrouver les résultats en reconstruction radargrammétrique en n'abordant que l'aspect géométrique, nos premières études portent sur des images simulées à partir de points brillants. L'utilisation d'images simulées permet de simplifier la configuration de prise de vue, de maîtriser les différents paramètres d'entrée et s'affranchir de certaines étapes de la chaîne radargrammétrique (mise en géométrie épipolaire, filtrage du spe-

ckle, approche pyramidale). Plusieurs simulations avec des configurations de prise de vue différentes nous permettent de déterminer la précision des résultats en planimétrie et en altimétrie en fonction de l'angle d'intersection $\Delta\theta_v$. Les résultats obtenus se trouvent alors en accord avec les relations théoriques (3.2). En effet, les images simulées constituées de points brillants permettent une focalisation géométrique insensible aux variations de radiométrie entre les deux images. Cette étude nous a également permis d'estimer les précisions que l'on devrait obtenir lors de l'étude d'images réelles obtenues lors de la mission SIR-C. De plus, l'étude sur images simulées a permis également de poser les bases de la chaîne de traitement radargrammétrique sur laquelle nous allons ajouter d'autres modules, notamment la géométrie épipolaire, le filtrage du speckle et l'approche pyramidale.

Chapitre 4

Développement d'une chaîne radargrammétrique

4.1 Introduction

Le premier chapitre de cette partie consacrée à l'étude d'une chaîne radargrammétrique a abordé de manière succincte la notion de précision de la reconstruction stéréoscopique. À partir des formules de reconstruction, nous avons décrit de manière théorique les erreurs apportées par le choix de certains paramètres géométriques et, entre autres, le paramètre concernant l'angle d'intersection $\Delta\theta_v$. Aussi, les résultats de cette approche nous permettent d'appréhender les erreurs de reconstruction par rapport aux types d'images utilisées.

Dans ce chapitre, nous décrivons la chaîne radargrammétrique que nous avons développée pour des images décrivant des zones montagneuses. Ces images, obtenues à partir d'un capteur existant (SIRC), sont présentées dans la première partie de ce chapitre. En particulier, nous décrivons l'ensemble des paramètres qui constituent la caractérisation des images utilisées pour la chaîne radargrammétrique développée.

Dans un premier temps, nous abordons une partie délicate qui consiste mettre en forme les images radar pour réaliser les opérations d'appariement des images. Dans le chapitre précédent, les images obtenues proviennent d'un simulateur. Ainsi, les paramètres de ces images simulées sont parfaitement connus et maîtrisés. En particulier, nous avons une référence commune entre les deux images constituant la paire stéréoscopique. Dans le cas d'images radar obtenues par l'intermédiaire d'un satellite (au moins deux passes), il est nécessaire de retrouver une référence commune aux deux images. Cette référence est utilisée pour réaliser l'étape d'épipolarité. Cette étape est essentielle avant la recherche des points homologues. Il s'agit donc de décrire, à partir d'un point de l'image dite de « référence », la zone de recherche de l'image dite « secondaire ». Cette étape permet de limiter le temps de recherche pendant l'opération d'appariement des images stéréoscopiques.

Dans un deuxième temps, nous présentons l'étape cruciale de mise en correspondance, qui permet la génération d'une carte de disparités entre les deux images. L'appariement se fait par corrélation et les valeurs des coefficients de corrélation permettent de déterminer les pixels homologues, meilleurs candidats pour la correspondance. Pour optimiser cette étape, nous avons recours au filtrage du speckle et à la mise en place

d'une technique multi-échelle.

Enfin, nous traitons la résolution de la localisation multi-scènes afin de pouvoir générer un MNT à partir de la carte de disparité. La bonne connaissance des trajectoires des porteurs est indispensable dans cette dernière étape. Toutes ces étapes conduisent à la génération d'un MNT. Ce MNT généré est analysé qualitativement, notamment par comparaison avec des études similaires réalisées par [52] et [56].

4.2 Description des images SIR-C

Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe 1.1.3, la navette Endeavour est lancée deux fois pour le programme SIR-C et pour deux vols de 10 jours : le premier vol est effectué en avril 1994 et le second vol en octobre 2004. Les capteurs SIR-C et X-SAR sont présents à son bord. Le capteur SIR-C est multi-fréquences (bandes C et L) et multi-polarisations. De plus, ce capteur présente aussi la possibilité d'un fonctionnement en multi-incidences mais avec une plage d'angles d'incidence plus petite : de 20° à 55° .

Pour notre étude, nous disposons de plusieurs images enregistrées lors de ces deux missions. La zone d'intérêt de ces images se situe dans les Alpes, à la fois sur le terroir français et sur le territoire italien. La plupart des enregistrements de la mission SIR-C permettent de former des couples stéréoscopiques mais nous n'avons sélectionné qu'un seul couple d'images pour la suite de nos travaux. En effet, puisque l'étude porte sur la reconstruction du relief, certaines zones comportant des zones de lacs (Lac de Serre-Ponçon) ou de grandes villes (Turin) ne sont pas intéressantes pour exploiter l'information altimétrique. La paire d'images retenue est donc constituée des enregistrements dénommés « PR17310 » et « PR17429 ». La zone commune aux deux images est visible sur la figure 4.1.

Cette zone commune est majoritairement située sur le sol français. Et cette caractéristique permet de trouver plus facilement des informations altimétriques grâce aux cartes IGN (Institut Géographique National). Cette zone s'étale sur environ 38 km en azimuth et 18 km en distance au sol. L'examen des cartes IGN de la région nous indique que l'altitude y varie entre 900 mètres et 3100 mètres : le relief est donc bien diversifié, alternant monts et vallées. Les images ont été enregistrées le 10 avril 1994 à 06h31 pour la passe PR17429 (figure 4.2) et le 12 avril 1994 à 05h34 pour le cliché PR17310 (figure 4.3).

Il y a donc peu de décorrélation temporelle d'une image à l'autre. Ainsi, nous évitons les différences radiométriques dues aux changements de saison (neige) et qui peuvent être fortes dans ce type de zone. Les deux images sont obtenues avec des angles de visée de 50.1° et 35.7° ce qui donne une différence $\Delta\theta_v$ d'environ 15° pour le couple stéréoscopique. Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, cette différence est suffisante pour évaluer les disparités entre les deux images, surtout dans cette zone de haut relief. En effet, l'erreur altimétrique pour un angle d'incidence d'environ 50° est inférieure 20 mètres pour un angle d'intersection de 15° . Les principaux paramètres d'acquisition de ces deux images sont résumés dans le tableau 4.1. Ces paramètres sont enregistrés à bord de la navette durant l'enregistrement du signal rétrodiffusé. Ils sont obtenus après décodage des fichiers sources fournis pour la mission SIR-C (voir annexe B).

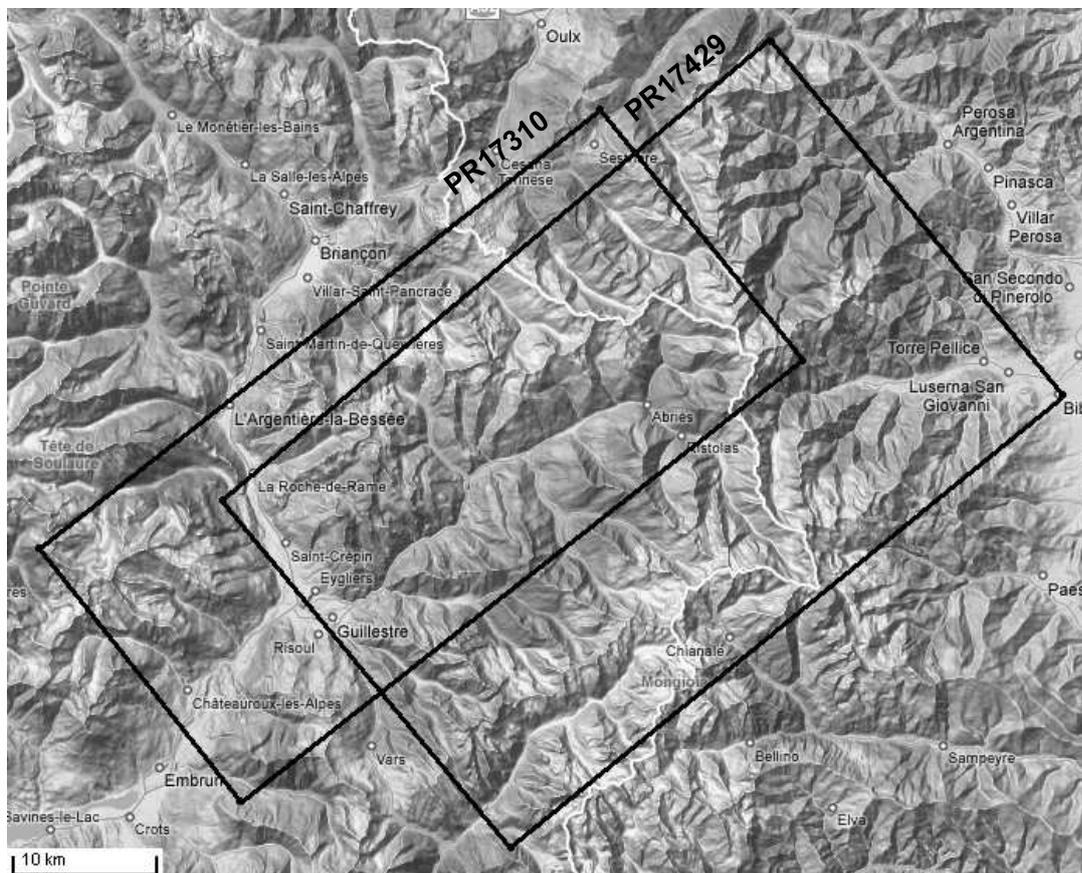


FIGURE 4.1 – Carte de relief de la zone étudiée et générée par Google Maps.

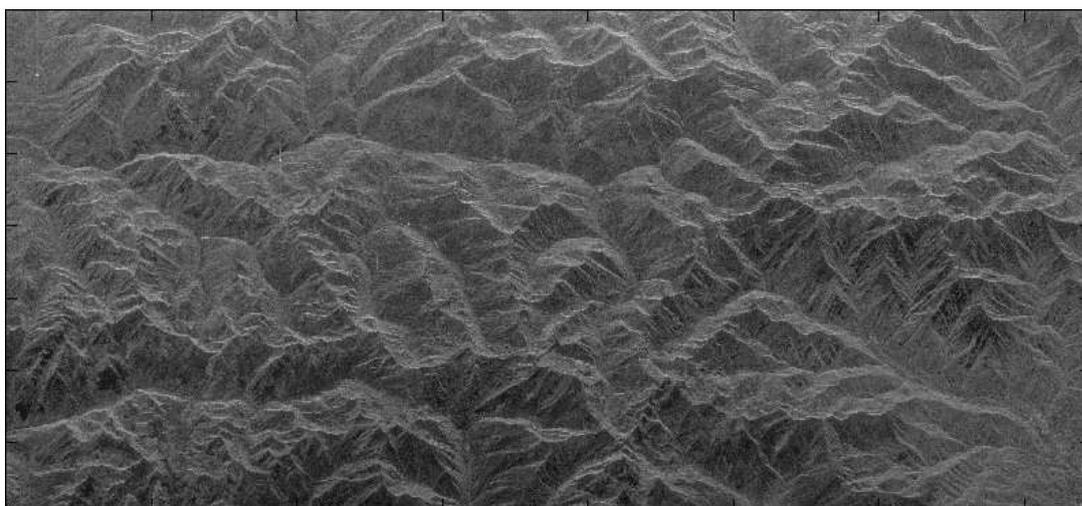


FIGURE 4.2 – Image PR17429 de la paire stéréoscopique.

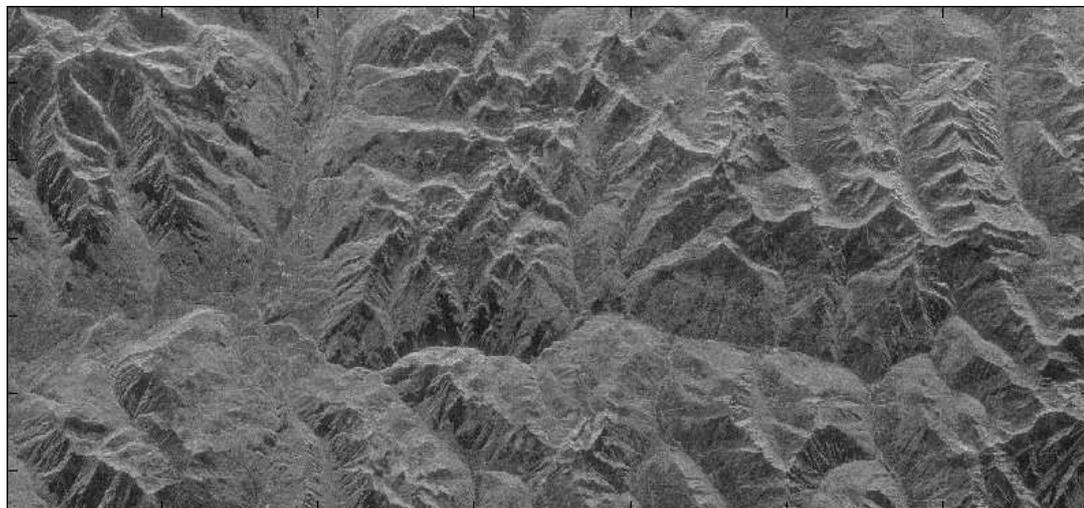


FIGURE 4.3 – Image PR17310 de la paire stéréoscopique.

| Paramètre | Variable | Image PR17310 | Image PR17429 |
|--|--------------|------------------|------------------|
| Hauteur du porteur (m) | H | 227834 | 228273 |
| Vitesse du porteur (m/s) | v | 7254 | 7253 |
| Angle de visée ($^{\circ}$) | θ_v | 50.1 | 35.7 |
| Angle d'ouverture en distance ($^{\circ}$) | θ_l | 2.4 | 5.3 |
| Angle d'ouverture en azimut ($^{\circ}$) | θ_L | 0.3 | 0.3 |
| Fréquence d'émission (GHz) | f_c | 5.3 | 5.3 |
| Fréquence de récurrence (Hz) | f_r | 1620 | 1736 |
| Bande de modulation (MHz) | B_p | 10.0 | 10.0 |
| Durée de l'impulsion (μ_s) | τ | 33.8 | 16.9 |
| Résolution en distance projetée au sol (m) | δ_s | 20.7 | 27.1 |
| Résolution en azimut (m) | δ_a | 6.2 | 6.2 |
| Taille d'un pixel en distance (m) | pix_d | 13.3 | 13.3 |
| Taille d'un pixel en azimut (m) | pix_a | 4.5 | 4.2 |
| Nombre de pixels en distance (m) | $nbpix_d$ | 1320 | 1396 |
| Nombre de pixels en azimut (m) | $nbpix_a$ | 11176 | 11972 |
| Temps d'acquisition de l'image (s) | τ_{acq} | 6.9 | 6.9 |
| Distance proximale (km) | d_p | 338.0 | 269.5 |

TABLE 4.1 – Paramètres d'acquisition des images SIR-C stéréoscopiques.

4.3 Définition de la géométrie de prise de vue

La connaissance de la géométrie de prise de vue, obtenue par la modélisation des trajectoires des satellites, est fondamentale pour la reconstruction du relief. De plus, cette connaissance nous permet de réaliser une étape importante dans la procédure d'appariement : la mise en épipolarité des images radar. Afin de vérifier que le recalage des images est correct, nous utilisons des points d'amers comme points de référence facilement repérables sur une carte IGN ou une image radar.

4.3.1 Évaluation des trajectoires du satellite

Dans le paragraphe 2.2.3.2, nous avons souligné l'importance de connaître la position des porteurs (X_1, Y_1, Z_1) et (X_2, Y_2, Z_2) ainsi que leur vitesse $(\dot{X}_1, \dot{Y}_1, \dot{Z}_1)$ et $(\dot{X}_2, \dot{Y}_2, \dot{Z}_2)$ en chaque point afin de résoudre les équations (2.1) de localisation multi-scènes d'un point de coordonnées (x, y, z) . Pour la reconstruction stéréoscopique sur images réelles, nous ne pouvons pas émettre l'hypothèse de trajectoires parallèles ou de Terre plate. Nous devons donc modéliser les trajectoires du porteur afin d'obtenir les informations de localisation du satellite en chaque position azimutale. La localisation du satellite et sa vitesse en chaque point nous permettent alors de retrouver les positions géographiques de chaque point de l'image.

Il est possible de modéliser les trajectoires SIR-C en utilisant les paramètres de la mission enregistrée à bord. En particulier, nous avons accès au temps d'acquisition τ_{acq} d'une image SIR-C, défini entre le temps t_{init} (début d'acquisition) et le temps t_{fin} (fin d'acquisition) de cette image. Dans notre cas, la valeur de τ_{acq} est égale à 6.9 secondes. De plus, comme nous l'avons indiqué auparavant, les images SIR-C sont fournies avec des informations concernant les paramètres d'enregistrement et de vol. En particulier, la trajectoire du porteur est échantillonnée toutes les 4.5 secondes. Pour chaque image, les fichiers d'enregistrement des paramètres satellite incluent donc des informations sur la position et la vitesse du satellite pour 3 positions différentes définies par les instants t_{DS1} , t_{DS2} et t_{DS3} (figure 4.4).

Ces 3 échantillons, appelés *data set* et séparés de 4.5 secondes, permettent d'interpoler la trajectoire du satellite sur toute la durée d'enregistrement de l'image. Toutefois, cette interpolation ne suffit pas à connaître la position absolue du satellite pour un azimut donné sur l'image radar car nous n'avons pas de référence temporelle (ou azimutale) commune entre l'image radar et la trajectoire du satellite. Pour obtenir cette référence temporelle, nous utilisons les informations sur les positions géocentriques des points qui forment les coins de chaque image. En effet, chaque image SIR-C est fournie avec les coordonnées en longitude et latitude de ces points situés sur l'ellipsoïde de référence (altitude nulle). Ces points sont définis comme suit :

- P_{NRET} (*Near Range Early Time*) correspondant à la distance proximale en début d'acquisition,
- P_{NRLT} (*Near Range Last Time*) correspondant à la distance proximale en fin d'acquisition,
- P_{FRET} (*Far Range Early Time*) correspondant à la portée distale en début d'acquisition,
- P_{FRLT} (*Far Range Last Time*) correspondant à la portée distale en fin d'acquisition.

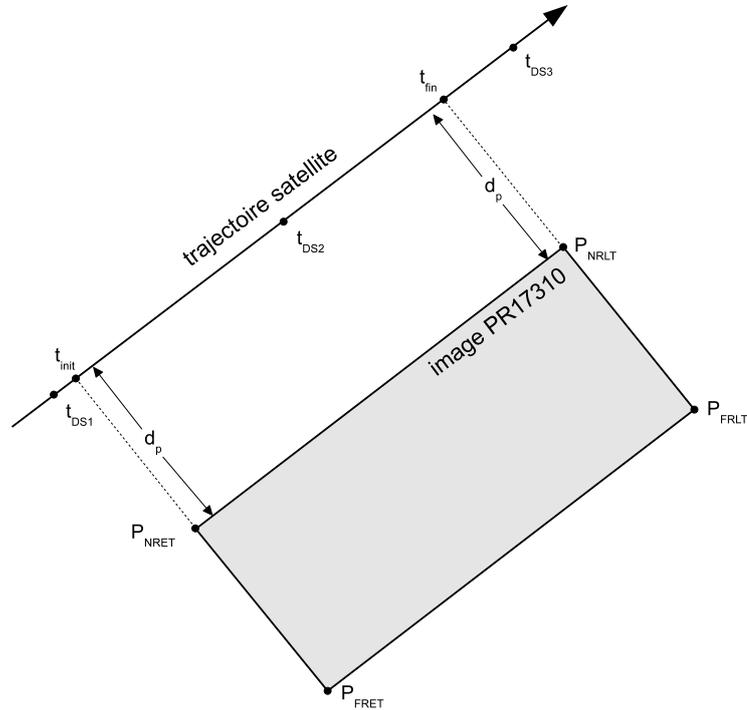


FIGURE 4.4 – Détermination de la référence temporelle pour l’interpolation de la trajectoire.

La figure 4.4 modélise l’image enregistrée avec les différents paramètres présentés. Nous n’avons pas de relation directe entre la base de temps de l’image (t_{init} à t_{fin}) et la base de temps des échantillons (t_{DS1} , t_{DS2} et t_{DS3}). Le recalage de ces bases de temps se fait grâce aux coordonnées géocentriques du point P_{NRET} et de la distance proximale d_p (grandeur fournie dans les fichiers accompagnant les images SIR-C). La trajectoire du satellite étant interpolée sur toute l’image, l’instant t_{init} correspond au moment où la distance entre le porteur et le point P_{NRET} (calculée avec la position du satellite et les coordonnées de P_{NRET}) est égale à d_p . Grâce à ce procédé, nous disposons maintenant d’une référence temporelle pour la trajectoire interpolée du satellite. Ce résultat est validé en effectuant cette même opération et en utilisant les coordonnées du point P_{NRLT} à l’instant t_{fin} .

La modélisation des trajectoires du satellite et la détermination d’une référence temporelle nous permettent de connaître la position du porteur pour chaque azimuth de l’image. Ces informations sont indispensables pour déterminer l’altitude des points par stéréoscopie et sont nécessaires pour la détermination des courbes épipolaires.

4.3.2 Détermination des courbes épipolaires et de la zone de recherche

Lors de la mise en correspondance des deux images stéréoscopiques dans la chaîne de traitement radargrammétrique, la recherche d’un pixel homologue (ou pixel ressemblant) d’une image vers une autre est une opération relativement coûteuse en temps

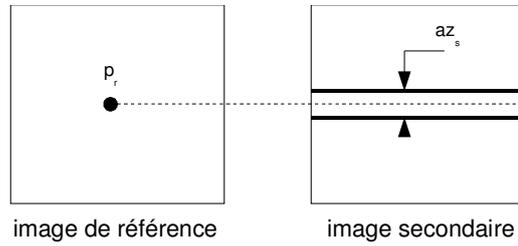


FIGURE 4.5 – Effet de la mise en géométrie épipolaire.

de calcul. En effet, pour une image de taille $(N_{azimut} \times M_{distance})$ pixels, le temps de calcul nécessaire pour la recherche d'un seul point homologue correspond à un nombre important d'opérations de l'ordre de $(N_{azimut} \times M_{distance})^2$ et dépendant de la taille de la fenêtre de corrélation et du nombre de pixels contenus dans chaque image. Ainsi, il faut augmenter cette recherche pour tous les points de l'image référence. Il est donc mis en oeuvre une opération de déformation appelée « mise en géométrie épipolaire » qui consiste à limiter la recherche d'un point homologue à une bande azimutale. On considère alors que le point homologue du point p_r de l'image de référence se trouve sur une « bande (ou ligne) épipolaire de largeur azimutale » az_s de l'image secondaire (figure 4.5) ⁽¹⁾.

La recherche des lignes épipolaires est une étape importante dans la chaîne radargrammétrique et plusieurs méthodes sont exposées dans la littérature (voir [16] et [56]). Les méthodes de mise en épipolarité (figure 4.6) sont basées sur :

1. la localisation directe puis la localisation inverse à partir d'un point p_r , défini par son altitude h , donnant un ensemble de points possibles P_s (puisque l'altitude h est inconnue),
2. la localisation directe puis la localisation inverse à partir de cet ensemble de points possibles P_r à une altitude moyenne h_{moy} , pour retrouver un ensemble de points P_i .

Nous obtenons ainsi deux lignes localisées suivant l'axe azimut et dont l'une (dans l'image secondaire) contient les points homologues de l'autre (image de référence). Il est à noter que l'étape ultime de la mise en géométrie épipolaire consiste en l'application d'un modèle de déformation afin de transformer les courbes P_r et P_s en droites (voir [55]). Dans notre étude, nous allons limiter notre recherche à l'établissement des courbes épipolaires sur l'image secondaire.

La tracé d'une courbe épipolaire s'effectue à partir des équations décrites dans le paragraphe 1.3.3 à savoir

- l'équation iso-distance (1.11),
- l'équation iso-doppler (1.13),
- l'équation décrivant l'ellipsoïde terrestre (1.8).

Nous rappelons que le repère utilisé est le repère géocentrique (G, i, j, k) lié au référentiel terrestre et décrit dans le paragraphe 1.3.2. Dans ce référentiel, nous considérons un point au sol dont les coordonnées sont données par (x, y, z) et sa hauteur h . Les coordonnées du satellite i sont décrites par les grandeurs X_i, Y_i et Z_i et sa vitesse

(1). Nous verrons aussi par la suite la manière de réduire l'espace de recherche suivant l'axe distance.

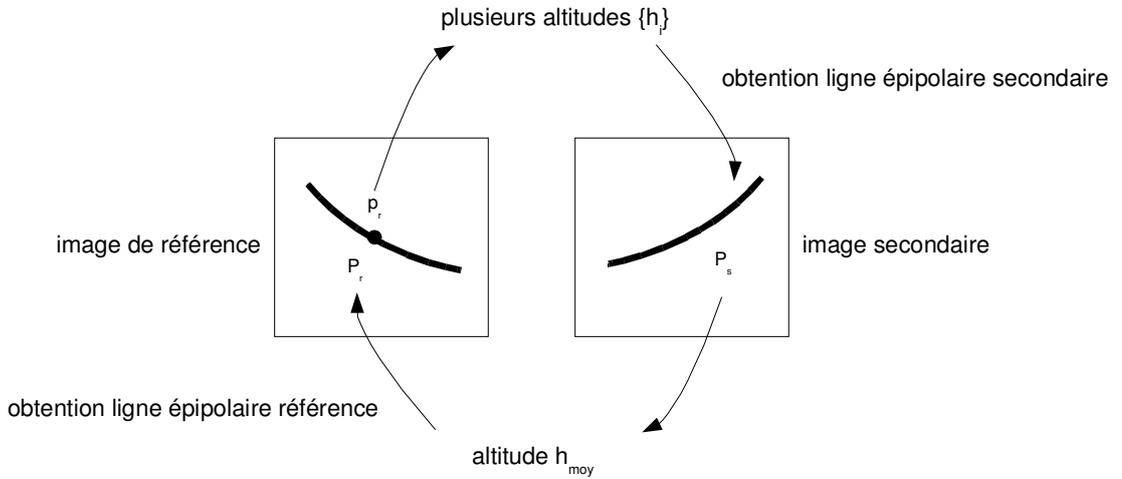


FIGURE 4.6 – Calculs des courbes épipolaires (référence et secondaire).

par les grandeurs \dot{X}_i , \dot{Y}_i et \dot{Z}_i . L'indice i décrit les deux positions du satellite dans un contexte de stéréoscopie :

- $i = 1$ correspond à la position référence du satellite,
- $i = 2$ correspond à la position secondaire du satellite.

Dans notre étude, nous considérons que notre image de référence ($i = 1$) correspond à la passe PR17310 et l'image secondaire ($i = 2$) à la passe PR17429. Les coordonnées du satellite et des points d'une image sont liées entre elles avec :

$$\begin{cases} (x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 & = r_i^2 \\ (x - X_i)\dot{X}_i + (y - Y_i)\dot{Y}_i + (z - Z_i)\dot{Z}_i & = 0 \\ \frac{x^2 + y^2}{(a + h)^2} + \frac{z^2}{(b + h)^2} & = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Nous rappelons les valeurs des paramètres de l'ellipsoïde : le demi grand axe $a = 6378137.0$ mètres et le demi petit axe $b = 6356752.3$ mètres.

Localisation directe Afin de tracer la courbe épipolaire dans l'image secondaire PR17429, nous utilisons les coordonnées az sur l'axe azimuth et rg sur l'axe distance de chaque point de l'image de référence PR17310. De plus, en chaque point de l'image PR17310, la position du porteur (X_1, Y_1, Z_1) ainsi que sa vitesse $(\dot{X}_1, \dot{Y}_1, \dot{Z}_1)$ sont connues grâce au travail réalisé précédemment à propos de l'interpolation des trajectoires du satellite. La distance radar r_1 entre le satellite et le point considéré est donc déduite des coordonnées en azimuth et en distance de ce point sur l'image radar et de la position du satellite. La résolution du système (4.1) permet de déterminer les inconnues (x, y, z) pour une altitude h donnée. Pour le tracé des courbes épipolaires dans l'image PR17429, il est nécessaire de faire varier la valeur de h entre l'altitude minimum h_{min} et l'altitude maximum h_{max} de la zone couverte. L'ensemble des valeurs de h doit permettre de parcourir l'ensemble des valeurs réelles (vérité terrain) de h . Il n'est donc pas nécessaire qu'elles soient précises. En revanche, prendre des valeurs de h_{min} et h_{max} trop différentes des valeurs réelles induit un temps de calcul important. Ainsi, nous estimons approximativement les valeurs extrema des altitudes

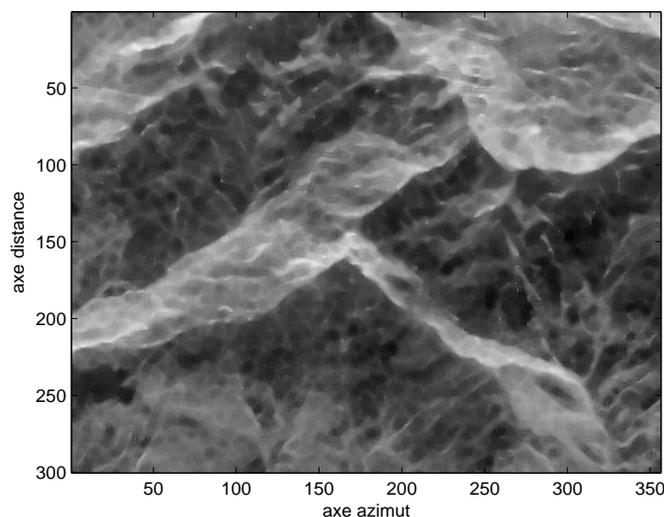


FIGURE 4.7 – Zone d'étude : extrait de l'image PR17310.

possibles. La zone d'étude concernée (figure 4.7) a pour dimensions 300 pixels en distance sur 356 pixels en azimuth. Comme nous l'avons déjà signalé, l'analyse de la carte IGN associée nous a permis de déterminer que pour la zone imagée, l'altitude varie entre 900 et 3100 mètres. Pour la zone étudiée, nous fixons $h_{min} = 500$ mètres et $h_{max} = 4000$ mètres afin de se placer dans une situation où nous établissons une évaluation grossière des extremums ⁽²⁾.

Nous devons aussi choisir un pas en altitude Δh : ce pas est fixé arbitrairement à $\Delta h = 500$ mètres. À partir des variations de la valeur de h , la localisation directe génère plusieurs points de coordonnées terrestre (x, y, z) . Dans le cas présent, nous obtenons donc 8 points dans le repère géocentrique, avec des altitudes variant de 500 mètres à 4000 mètres par palier de 500 mètres.

Localisation inverse Afin de décrire la courbe épipolaire dans l'image secondaire, nous appliquons à l'ensemble des points déterminés par localisation directe à partir de l'image référence l'opération de localisation inverse. À partir de chacun des points obtenus par localisation directe (position (x, y, z) et hauteur h), il faut retrouver la distance r_2 qui satisfait le système (4.1) appliqué à l'image secondaire PR17429 ($i = 2$). Or, pour cette image secondaire, nous connaissons également la trajectoire du porteur (X_2, Y_2, Z_2) et sa vitesse $(\dot{X}_2, \dot{Y}_2, \dot{Z}_2)$. Donc, pour chaque point (x, y, z) généré à l'étape de localisation directe, nous calculons la distance radar r_2 entre le satellite et le point considéré en résolvant le système (4.1). La position en azimuth du point (X_2, Y_2, Z_2) de la trajectoire du satellite qui minimise cette distance correspond alors à la coordonnée en azimuth du point de coordonnées (x, y, z) sur l'image secondaire (la direction de visée est perpendiculaire à la trajectoire du porteur). Connaissant cette coordonnée en azimuth sur l'image PR17429, la coordonnée en distance se détermine facilement

(2). Le traitement radargrammétrique effectué nous donne a posteriori $h_{min} = 1897$ mètres et $h_{max} = 2836$ mètres, ainsi qu'une altitude moyenne $h_{moy} = 2413$ mètres.

| Données d'entrée | | | Données de sortie | | | |
|-------------------|-----------------|----------|-------------------|---------------------------|-----------|------------|
| Coordonnées image | | Altitude | Distance | Coordonnées géocentriques | | |
| az_r (indice) | rg_r (indice) | h (m) | r_1 (m) | x (m) | y (m) | z (m) |
| 1841 | 614 | 500 | 346181.72 | 4501176.05 | 536781.38 | 4472535.72 |
| | | 1000 | | 4501729.01 | 537104.25 | 4472653.93 |
| | | 1500 | | 4502281.18 | 537426.02 | 4472773.02 |
| | | 2000 | | 4502832.56 | 537746.71 | 4472892.99 |
| | | 2500 | | 4503383.16 | 538066.31 | 4473013.85 |
| | | 3000 | | 4503932.97 | 538384.84 | 4473135.57 |
| | | 3500 | | 4504482.01 | 538702.30 | 4473258.16 |
| | | 4000 | | 4505030.27 | 539018.69 | 4473381.61 |

TABLE 4.2 – Obtention des coordonnées géocentriques du pic de l'Agrenier (localisation directe).

| Données d'entrée | | | | Données de sortie | | |
|---------------------------|-----------|------------|----------|-------------------|--------------------|-----------------|
| Coordonnées géocentriques | | | Altitude | Distance | Coordonnées images | |
| x (m) | y (m) | z (m) | h (m) | r_2 (m) | az_s (indice) | rg_s (indice) |
| 4501176.05 | 536781.38 | 4472535.72 | 500 | 272640.34 | 1233 | 239 |
| 4501729.01 | 537104.25 | 4472653.93 | 1000 | 272459.73 | 1232 | 225 |
| 4502281.18 | 537426.02 | 4472773.02 | 1500 | 272279.67 | 1232 | 212 |
| 4502832.56 | 537746.71 | 4472892.99 | 2000 | 272100.16 | 1231 | 198 |
| 4503383.16 | 538066.31 | 4473013.85 | 2500 | 271921.20 | 1230 | 185 |
| 4503932.97 | 538384.84 | 4473135.57 | 3000 | 271742.78 | 1229 | 172 |
| 4504482.01 | 538702.30 | 4473258.16 | 3500 | 271564.90 | 1228 | 158 |
| 4505030.27 | 539018.69 | 4473381.61 | 4000 | 271387.57 | 1228 | 145 |

TABLE 4.3 – Obtention des coordonnées image az_s et rg_s du pic de l'Agrenier sur l'image secondaire (localisation inverse).

connaissant la position du satellite et la distance point-satellite r_2 déterminée.

Exemple d'application sur un point particulier Afin de décrire le résultat de ces différentes étapes, nous proposons un exemple d'application utilisant un point particulier de la zone d'étude représentant le sommet d'une montagne (pic de l'Agrenier). Sur l'image de référence, ce point est localisé aux coordonnées image (indice) par sa position en azimuth az_r et sa position en distance rg_r . Pour ce point, nous avons la position associée du satellite (X_1, Y_1, Z_1) pour nous permettre de déterminer la distance r_1 . Ainsi pour chacune des 8 valeurs de l'altitude h , nous obtenons les coordonnées (x, y, z) dans le repère géocentrique des points associés aux valeurs de l'altitude. Ces grandeurs, obtenues après l'étape de localisation directe, sont répertoriées dans le tableau 4.2.

À partir des coordonnées géocentriques obtenues, nous appliquons la procédure de localisation inverse. Nous pouvons alors déterminer la distance radar r_2 pour ensuite retrouver les coordonnées image (indice) en azimuth az_s et en distance rg_s de chacun des points. L'ensemble de ces grandeurs sont exposées dans le tableau 4.3.

Afin de vérifier que l'ensemble des points constituant la courbe épipolaire P_s (voir figure 4.5) passe bien par le point homologue, nous traçons la courbe épipolaire à partir des données du tableau 4.3 sur l'image PR17429 (voir figure 4.8).

La courbe épipolaire s'obtient par interpolation entre ces points et nous pouvons

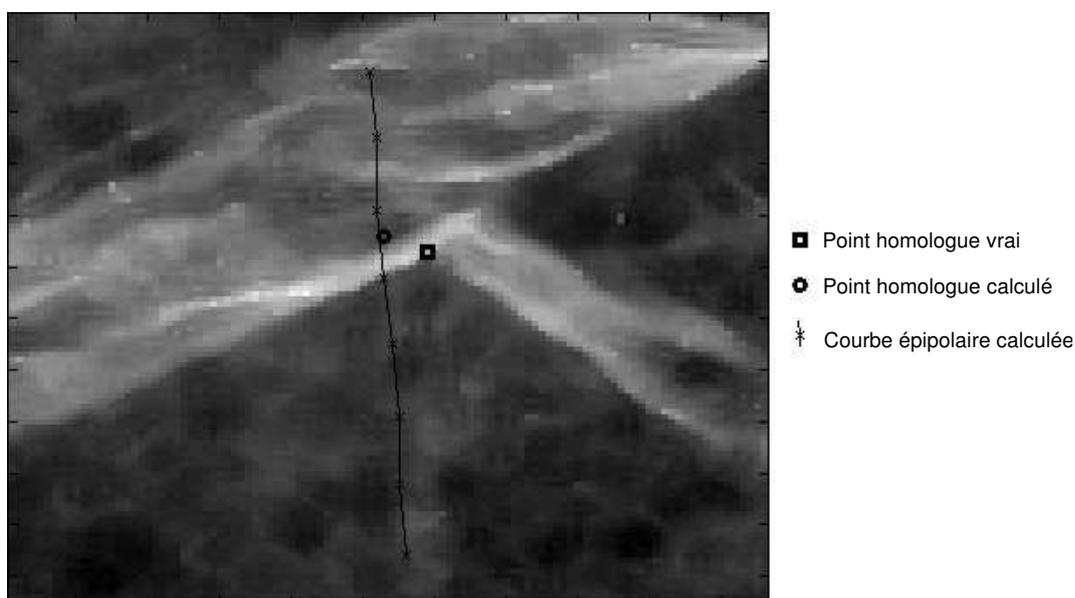


FIGURE 4.8 – Tracé d’une courbe épipolaire dans l’image PR17429.

remarquer que la discrétisation de la courbe épipolaire avec un pas $\Delta h = 500$ mètres est suffisante puisque la courbe épipolaire est quasiment linéaire. Nous pouvons alors décrire autour de cette ligne épipolaire une zone de recherche limitant la recherche du point homologue dans l’image secondaire. Ainsi, pour chaque point de l’image PR17310, nous obtenons une courbe épipolaire dans l’image PR17429 et cette courbe délimite la zone de recherche du point homologue. Toutefois, un examen plus approfondi de la ligne épipolaire montre clairement que les coordonnées du point homologue sur l’image secondaire ne sont pas celles du véritable point homologue (pic de l’Agréner, facilement reconnaissable). Nous sommes donc face à un problème de précision de localisation qu’il convient de compenser par l’utilisation de points d’amer.

4.3.3 Utilisation de points d’amer

La modélisation de la géode terrestre et des trajectoires de prise de vue n’est pas parfaite et nécessite quelques corrections. Si ces corrections ne sont pas appliquées, les imprécisions en découlant se répercutent sur le résultat final et donc sur la qualité du modèle d’élévation de la zone étudiée. La quantification et l’application des correctifs s’effectuent à l’aide de points caractéristiques d’une image : les points d’amer. Ce sont des éléments facilement repérables sur les images et dont les coordonnées nous permettent de quantifier les erreurs de modélisation. Comme l’étude porte sur une zone montagneuse, les points d’amer sont généralement des sommets : il est ainsi commode de les identifier sur les deux images afin de repérer leurs coordonnées sur l’axe en azimuth et sur l’axe en distance. Par la suite, la recherche de ces points sur une carte IGN permet d’obtenir les informations sur leurs coordonnées géocentriques ainsi que sur leurs altitudes. D’ailleurs, l’intérêt de choisir des sommets réside aussi dans le fait que l’altitude précise est donnée sur la carte : il n’y a pas besoin d’approximer à la courbe de niveau la plus proche. Le tableau 4.4 dresse la liste des points d’amer

| <i>nom</i> | <i>longitude WGS84</i> | <i>latitude WGS84</i> | <i>altitude</i> | <i>image PR17310</i> | | <i>image PR17429</i> | |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | <i>az_r</i> | <i>rg_r</i> | <i>az_s</i> | <i>rg_s</i> |
| Pic de l'Agrenier | 6.816499 | 44.795290 | 2793 | 1841 | 614 | 1236 | 180 |
| Les Ourgières | 6.668593 | 44.688939 | 2257 | 915 | 759 | 242 | 279 |
| Pic de Clapouse | 6.692351 | 44.766305 | 2753 | 1295 | 411 | 659 | 21 |
| Dent du Ratier | 6.723977 | 44.739690 | 2660 | 1304 | 638 | 661 | 189 |
| Est du Col Garnier | 6.692824 | 44.715442 | 2413 | 1102 | 682 | 445 | 225 |
| Pic de Fond Queyvras | 6.820277 | 44.811869 | 2863 | 1918 | 535 | 1320 | 122 |
| SE Pic de Rochebrune | 6.789907 | 44.818411 | 3140 | 1838 | 400 | 1239 | 13 |
| Sommet d'Assan | 6.735621 | 44.685330 | 2609 | 1135 | 951 | 471 | 418 |

TABLE 4.4 – Points d'amer utilisés pour le couple d'images stéréoscopiques PR17310 et PR17429.

| <i>nom</i> | <i>altitude</i> | <i>image PR17429</i> | | <i>différence Δaz_s</i> | <i>différence Δrg_s</i> |
|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
| | | <i>az_s</i> | <i>rg_s</i> | | |
| Pic de l'Agrenier | 2793 | 1230 | 177 | 6 | 3 |
| Les Ourgières | 2257 | 236 | 276 | 6 | 3 |
| Pic de Clapouse | 2753 | 627 | 17 | 7 | 4 |
| Dent du Ratier | 2660 | 655 | 186 | 6 | 3 |
| Est du Col Garnier | 2413 | 438 | 220 | 7 | 5 |
| Pic de Fond Queyvras | 2863 | 1314 | 119 | 6 | 3 |
| SE Pic de Rochebrune | 3140 | 1233 | 11 | 6 | 2 |
| Sommet d'Assan | 2609 | 465 | 415 | 6 | 3 |

TABLE 4.5 – Coordonnées des sommets obtenues par localisation directe et inverse et différence avec les coordonnées vraies.

utilisés dans le cadre de notre étude ainsi que les coordonnées image en azimuth et en distance.

Pour chacun de ces points d'amer localisés sur l'image de référence PR17310, nous pouvons appliquer les procédures de localisation directe et localisation inverse décrites précédemment à la différence que l'information de hauteur est maintenant parfaitement connue. Nous obtenons donc un point sur l'image secondaire qui est le point homologue du point d'amer. Ce point doit normalement coïncider avec le point d'amer correspondant sur l'image secondaire. Or, le résultat décrit sur la figure 4.8 indique que le point homologue du pic de l'Agrenier ne se trouve pas à sa bonne position. Cette étude est effectuée sur les autres sommets décrits dans le tableau 4.4 et les résultats sont indiqués dans le tableau 4.5. Dans ce même tableau, nous indiquons la différence Δaz_s en azimuth et la différence Δrg_s en distance entre la position réelle des points d'amers et celle déterminée par localisation directe et localisation inverse.

Sur ces 8 points d'amer, nous relevons une erreur moyenne de 6.25 pixels en azimuth avec un écart-type de 0.46. En distance, l'erreur moyenne est de 3.25 pixels avec un écart-type de 0.89. Les points d'amer étant dispersés sur l'image et non restreints sur une zone, nous apportons donc une correction globale sur toute l'image. Cette correction est de 6 pixels en azimuth et de 3 pixels en distance afin d'effectuer le recalage des courbes épipolaires pour la suite des traitements. L'application de cette correction est décrite sur la figure 4.9. Nous pouvons donc remarquer que la courbe épipolaire passe effectivement par la position vraie du point homologue (exemple du pic de l'Agrenier). En plus de cette compensation sur les coordonnées des points à

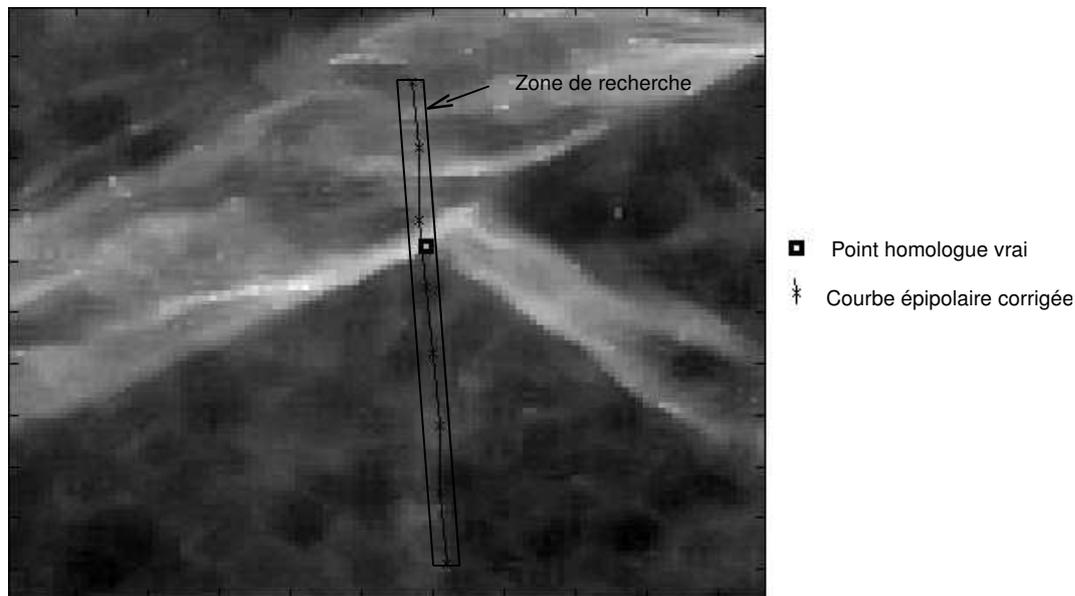


FIGURE 4.9 – Tracé de la courbe d'épipolaire corrigée pour le pic de l'Agrenier dans l'image PR17429.

rechercher, cette étude sur les points d'amer nous permet également de constater qu'il existe des imprécisions sur la localisation de ces points. Ainsi, la recherche du point homologue n'est pas cantonnée à la courbe épipolaire mais élargie à une zone de recherche, bande azimutale de 3 pixels (voir figure 4.9). En effet, le point recherché se situe théoriquement sur cette courbe. L'étape d'appariement ne se fait donc que sur les pixels de cette courbe, ce qui économise du temps de calcul car la recherche est limitée en azimut et en distance.

4.4 Chaîne radargrammétrique

À cette étape du processus de stéréoscopie radar, les images sont dimensionnées (indexation des axes distance et azimut, mise en géométrie épipolaire) pour pouvoir être traitées directement dans la suite du processus à savoir : l'appariement des images, l'établissement de la carte de disparités et la construction du modèle numérique de terrain.

4.4.1 Processus d'appariement

Comme nous l'avons déjà indiqué dans le paragraphe 2.3, la mise en correspondance des images radar est une étape importante dans la chaîne radargrammétrique. En effet, les performances du traitement stéréoscopique radar dépendent essentiellement de la précision et de la justesse des résultats obtenus lors de cette étape d'appariement. En outre, la mise en correspondance s'accompagne de plusieurs étapes intermédiaires permettant d'améliorer les résultats : une étape basée sur le principe de multirésolution et une étape basée sur le filtrage du phénomène de *speckle*. Ces étapes intermédiaires sont utiles pour améliorer les résultats associés à la corrélation entre les images radar.

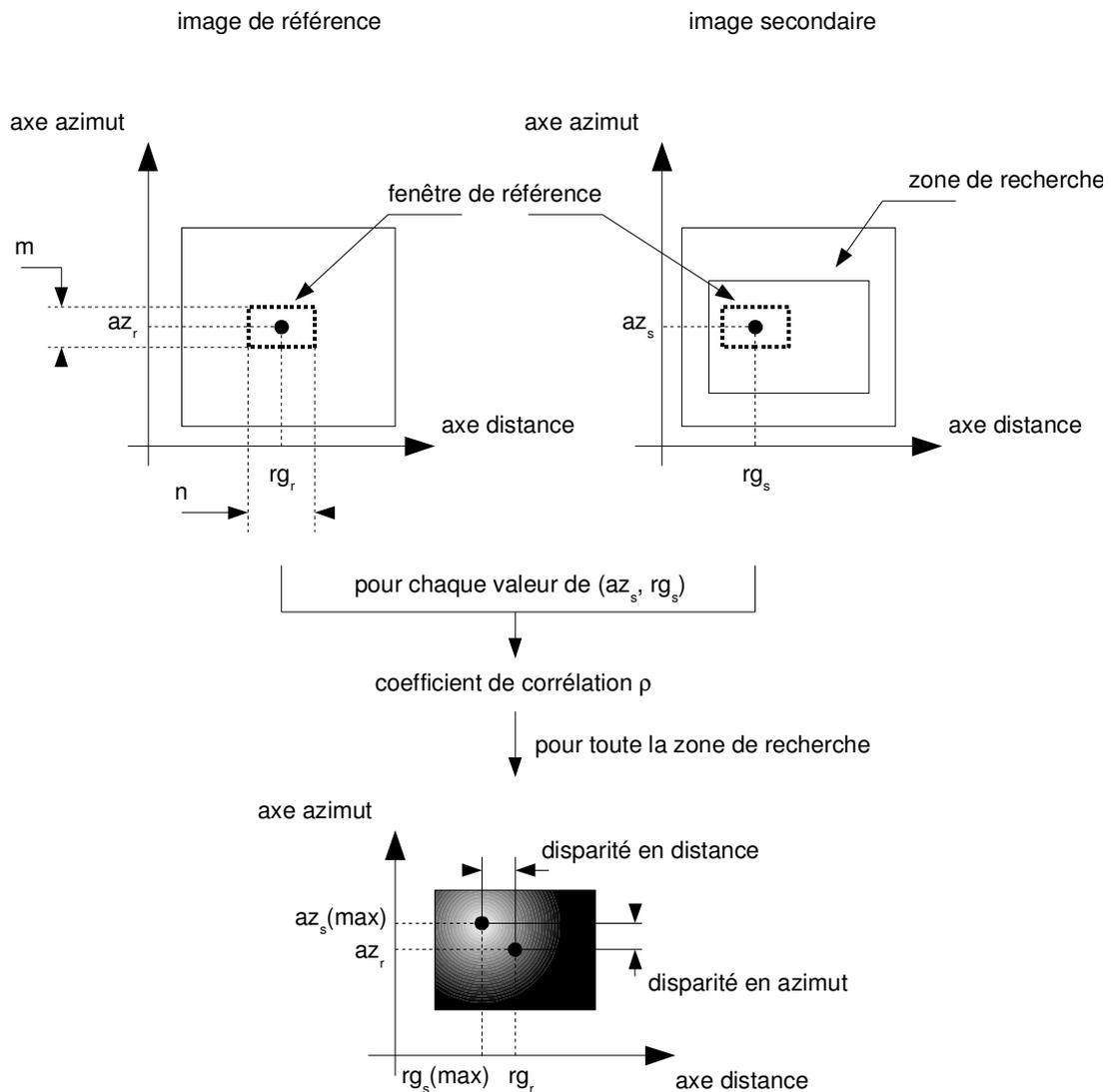


FIGURE 4.10 – Corrélation entre l'image de référence et l'image secondaire.

4.4.1.1 Obtention de la disparité

Le résultat de la corrélation consiste à identifier les pixels homologues entre les deux images afin de quantifier la disparité entre ces pixels (figure 4.10).

Dans l'image de référence, nous définissons une fenêtre de voisinage autour du pixel à apparier. Cette fenêtre, appelée fenêtre de référence, devient le motif à rechercher dans l'image secondaire. Le choix de la taille de la fenêtre (m selon l'axe azimuth et n selon l'axe distance) est important à plus d'un titre :

1. il conditionne le temps de recherche et donc de calcul pour l'obtention du coefficient de corrélation,
2. il conditionne la « confiance » que l'on peut accorder au résultat de la corrélation (maximum de la fonction).

Dans un premier temps, pour notre étude, nous choisissons arbitrairement une taille

de 23×23 pixels. Afin de trouver le motif correspondant dans l'image secondaire, cette fenêtre de référence est comparée avec une fenêtre de même taille dans l'image secondaire. Cette comparaison est effectuée dans la limite d'une zone de recherche qui peut correspondre à l'ensemble de l'image secondaire. Toutefois, et grâce au travail précédemment réalisé sur le calcul des courbes épipolaires (paragraphe 4.3.2), cette zone de recherche est restreinte à une bande délimitée en azimuth et en distance. Pour chaque position (az_s, rg_s) de la fenêtre de référence dans l'image secondaire, nous calculons la corrélation entre cette fenêtre et le motif à rechercher, afin de quantifier la ressemblance entre les deux extraits d'image. À partir de la formule (2.6), les coefficients de corrélation sont calculés en utilisant l'équation suivante :

$$\rho = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n (I_{r_{kl}} - \bar{I}_r)(I_{s_{kl}} - \bar{I}_s)}{\sqrt{(\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n (I_{r_{kl}} - \bar{I}_r)^2)(\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n (I_{s_{kl}} - \bar{I}_s)^2)}} \quad (4.2)$$

où

- I_r et I_s sont les fenêtres extraites respectivement de l'image PR17310 et de l'image PR17429,
- m et n sont les dimensions en azimuth et en distance de ces fenêtres,
- \bar{I}_r et \bar{I}_s sont les valeurs moyennes de chaque fenêtre calculées d'après l'équation (2.7).

Le calcul du coefficient ρ est effectué pour chaque position possible (az_s, rg_s) de la fenêtre de référence dans la zone de recherche. Nous obtenons alors une surface de corrélation pour laquelle la position du maximum d'amplitude $(az_s(\max), rg_s(\max))$ comparé avec la position (az_r, rg_r) du point pour lequel nous recherchons l'homologue, nous donne la disparité en azimuth disp_{az} :

$$\text{disp}_{az} = |az_s(\max) - az_r|$$

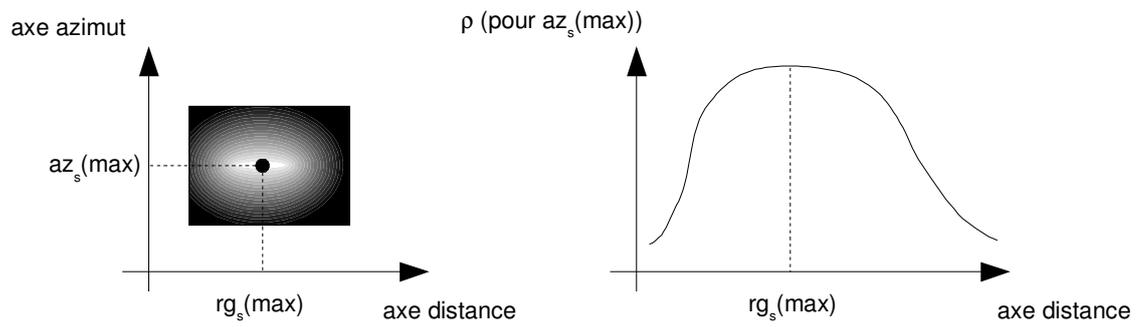
et la disparité en distance disp_{rg} :

$$\text{disp}_{rg} = |rg_s(\max) - rg_r|$$

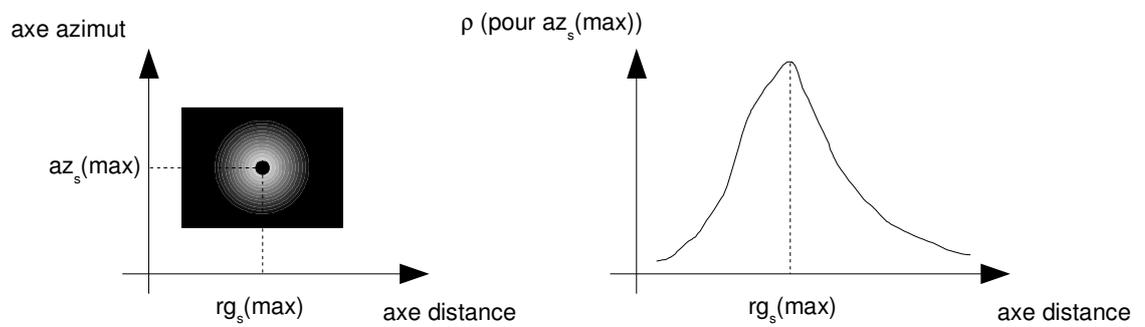
Cette opération est réitérée pour tous les points de l'image de référence et permet alors d'établir une carte de disparités. À l'issue de cette étape, il convient de faire deux remarques sur l'utilisation de l'outil de corrélation pour l'appariement.

La première remarque concerne la « confiance » qu'il est possible d'apporter à la disparité obtenue c'est-à-dire à la détection du maximum de la surface de corrélation. En effet, suivant le contenu des fenêtres de référence, nous pouvons obtenir soit un pic de corrélation bien « identifié », soit un pic de corrélation pour lequel la différence avec le maximum suivant est faible (figure 4.11). Dans le cas d'une faible « confiance » sur la valeur de $rg_s(\max)$, l'apparition de bruit peut modifier de manière conséquente cette valeur $rg_s(\max)$.

La seconde remarque porte sur la sensibilité de l'outil de corrélation au phénomène de *speckle*. En effet, l'obtention du coefficient de corrélation est basée sur l'amplitude des images radar. Ainsi, il est clair qu'une modification de cette amplitude par un phénomène associé à un bruit peut modifier le résultat de la corrélation et biaiser le résultat obtenu pour la disparité. Une étape de filtrage du *speckle* est donc primordiale pour atténuer l'influence de ce phénomène.



Faible « confiance » sur la valeur de $rg_s(\max)$



Forte « confiance » sur la valeur de $rg_s(\max)$

FIGURE 4.11 – Différents degrés de « confiance » sur le résultat de la corrélation.

4.4.1.2 Filtrage du *speckle*

Nous avons déjà indiqué dans le paragraphe 1.3.4.2 la nature du phénomène lié au *speckle* et les différentes méthodes de filtrage pour atténuer l'influence de ce phénomène (ici considéré comme un bruit dans notre application). Comme nous l'avons aussi indiqué, l'appariement par corrélation consiste à mesurer la vraisemblance entre deux fenêtres extraites dans chacune des images radar. Le *speckle*, qui a un effet sur la radiométrie des images, vient donc perturber cette vraisemblance et peut devenir une source d'erreur dans le calcul des coefficients de corrélation. Le but de cette étude n'étant pas centré sur le choix d'un filtre qui améliore de manière significative l'opération de corrélation, nous ne nous attardons pas sur cet aspect (aspect qui représente un axe de recherche à lui seul). Toutefois, nous présentons succinctement l'application d'un filtre pouvant apporter une amélioration minimale du traitement radargrammétrique.

Tout d'abord, nous allons utiliser une **technique multi-vue**, dont le principe est expliqué dans le paragraphe 1.3.4.2. Le bruit de *speckle* est réduit mais au détriment de la résolution spatiale. Si nous voulons procéder à un traitement sur N_f sous-bandes, la résolution azimutale sera dégradée de ce facteur N_f . Comme indiqué dans le tableau 4.1, les images SIR-C que nous étudions ont une résolution en azimut δ_a de 6.2 mètres ainsi qu'une résolution en distance projetée au sol δ_s de 20.7 mètres pour l'image PR17310 ou de 27.1 mètres pour l'image PR17429. Les résolutions dans les dimensions azimut et distance ne sont donc pas tout à fait du même ordre de grandeur : nous pouvons alors « sacrifier » la résolution en azimut. En prenant $N_f = 4$, nous passons alors à une résolution en azimut δ_{abis} de 24.8 mètres. Les résolutions dans les deux dimensions ont ainsi le même ordre de grandeur et ce choix s'avère judicieux à la lecture des tableaux 4.8 et 4.9. En effet, nous verrons que dans cette configuration, les erreurs de localisation induites par un décalage d'un pixel en azimut sont inférieures aux erreurs de localisation induites par un décalage d'un pixel en distance. Les traitements stéréoscopiques se font donc sur des images filtrées par *multilooking*, de résolution en azimut δ_{abis} égale à 24.8 mètres et de taille $nbpix_{az} = 2794$ pour l'image PR17310 ou $nbpix_{az} = 2993$ pour l'image PR17429.

Malgré l'application de la technique multi-vue, il subsiste encore un bruit de *speckle* sur les images radar. Afin de le réduire, nous traitons les images en utilisant un filtre. Dans le paragraphe 2.3.4, la revue des différentes méthodes de filtrage ne nous permet pas de déterminer un filtre universel dédié à l'appariement en stéréoscopie. Notre choix s'est porté sur le filtre de Lee (préservation des contours : voir annexe C). L'utilisation de ce filtre, qui permet une diminution du nombre de faux appariements, améliore la précision du MNT final. Deux tailles de fenêtre de filtrage ont été testées : 5×5 et 7×7 . Les résultats obtenus avec ces deux configurations sont très similaires. Toutefois, une étude plus approfondie indique qu'une taille 5×5 génère moins d'erreurs (ce qui semble en accord avec le type de zone - plutôt hétérogène - de l'image test de notre étude). Dans la suite de cette étude, les traitements stéréoscopiques se font donc sur des images filtrées par *multilooking* puis par un filtre de Lee utilisant une fenêtre de filtrage de taille 5×5 .

Les traitements apportés pour éliminer le bruit de *speckle* améliorent la qualité de la reconstruction altimétrique en réduisant le nombre de faux appariements. Cependant, les erreurs d'appariement restent nombreuses et le bruit de *speckle* n'est sans doute pas la seule cause. Le filtrage du *speckle* doit s'accompagner d'un autre traitement

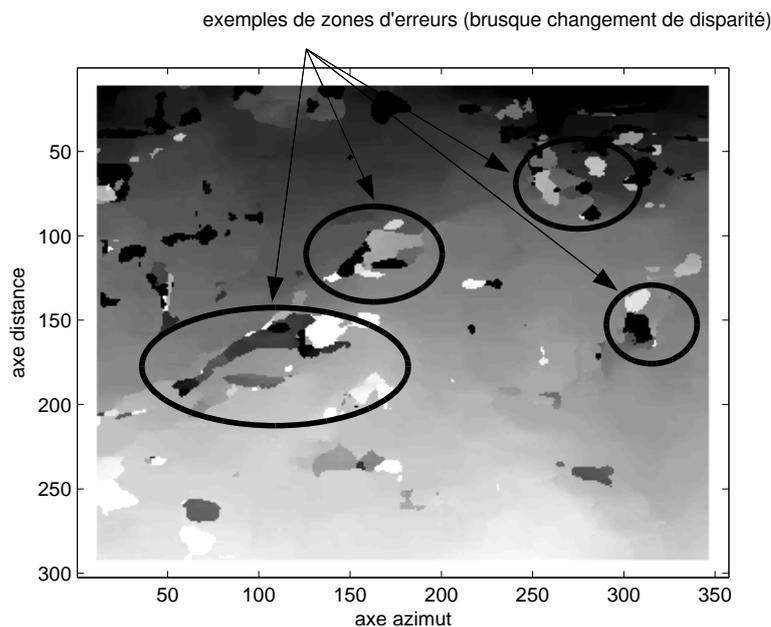


FIGURE 4.12 – Carte de disparités en distance obtenue sans traitement multi-échelle.

plus efficace.

4.4.1.3 Approche multi-échelle

Cette approche a déjà été présentée dans le paragraphe 2.3.3. L'application du principe multi-échelle permet de diminuer le temps de calcul en obtenant rapidement une disparité « grossière » pour une résolution dégradée. Le résultat de cette disparité est ensuite utilisé pour initialiser la recherche du point homologue avec une image de meilleure résolution. Nous allons observer l'effet d'un traitement pyramidal sur un extrait de l'image (figure 4.7) constitué de 300 pixels en distance sur 356 pixels en azimuth.

Dans un premier temps, nous établissons la carte de disparités en distance sans l'utilisation du traitement multi-échelle. La carte de disparités générée est présentée sur la figure 4.12.

L'obtention de cette carte nécessite un temps de traitement de 83 minutes avec un micro-processeur cadencé à 2.4 GHz et disposant de 3.0 Go de mémoire vive. Nous constatons que sur la majeure partie de la carte, les disparités évoluent progressivement mais que ces variations sont perturbées par des zones d'erreurs. Ces zones d'erreur se démarquent par un changement brutal de disparité, qui ne trouve aucune explication physique.

Nous proposons d'étayer notre constatation avec un exemple précis en appliquant le processus d'appariement sur un pixel test. Ce pixel, localisé sur la case d'indice 155 en distance et la case d'indice 217 en azimuth, est situé dans une petite zone d'erreur où la disparité calculée est de 112 pixels. Or, les pixels situés à la frontière de cette zone n'ont une disparité que de 68 ou 69 pixels. Le résultat est donc incohérent et pour trouver une explication, nous observons les coefficients de corrélation sur la courbe

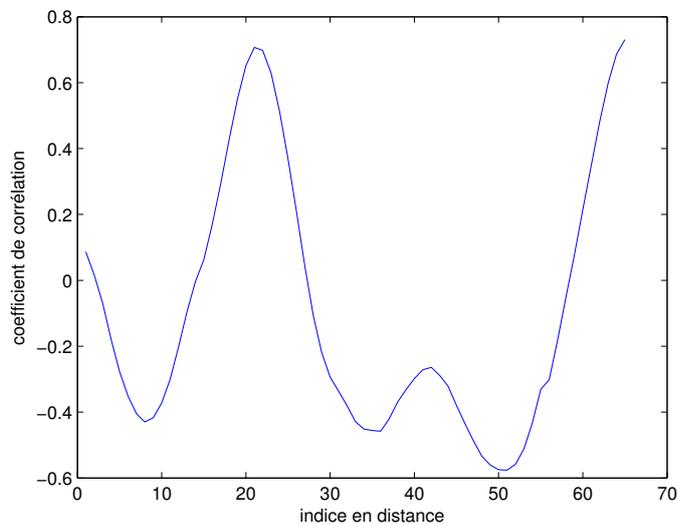


FIGURE 4.13 – Corrélation obtenue sans traitement multi-échelle, pour un pixel situé dans une zone avec erreur.

épipolaire.

Sur la figure 4.13, nous observons bien un pic de corrélation : le maximum a pour valeur 0.71 et se situe à l'indice 21 en distance. Ce pic de corrélation correspond bien au pixel homologue réel mais le maximum n'est qu'un maximum local. En effet, sur la partie droite de la courbe, il se forme un autre pic de corrélation qui possède un maximum égal à 0.74 pour l'indice 65 en distance. Comme l'appariement est validé pour l'indice correspondant au maximum global du coefficient de corrélation, soit 0.74, le pixel homologue trouvé est donc différent du pixel homologue réel. Ainsi, la disparité calculée à partir de cet indice est fautive.

Comme nous le montre l'exemple, ces erreurs de disparités sont dues à un mauvais appariement dans les zones concernées. Les raisons de ces erreurs sont multiples. Une des principales est la taille de la fenêtre conjuguée avec une initialisation de recherche trop lâche. Ainsi, il est clair que, dans une grande zone avec une initialisation de recherche très éloignée du véritable point homologue, il est possible de trouver un motif « ressemblant » au motif initial. Sur le pixel étudié, la variation de disparité de 112 pixels à 69 pixels entraîne une variation brutale d'altitude de 2550 m à 950 m, soit une erreur de 1300 mètres. Ce type d'erreurs doit donc être corrigé par la suite afin d'améliorer la reconstruction altimétrique.

Ensuite, nous procédons à un traitement multi-échelle. Ce traitement se fait en plusieurs étapes, sur des images de résolutions croissantes. L'étape d'initialisation se fait sur des images de résolution dégradée afin d'obtenir une approximation grossière de la disparité. Ensuite, à chaque étape, nous utilisons ces résultats afin de guider la recherche du pixel homologue dans les images de résolution supérieure. Pour un nombre d'étapes égal à 3, la première étape permet l'obtention d'une carte de disparités approximatives à partir d'images de résolution grossière. La deuxième étape utilise cette carte de disparités afin de raffiner les résultats à partir d'images de résolu-

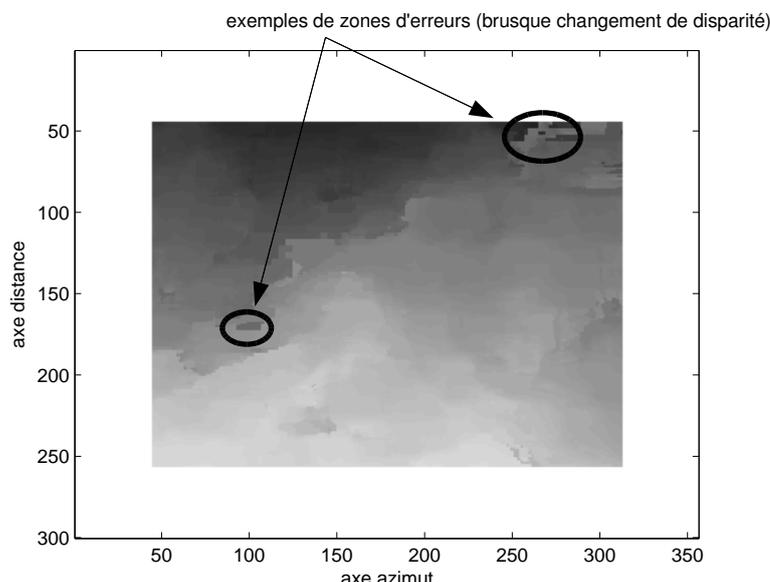


FIGURE 4.14 – Carte de disparités en distance obtenue avec traitement multi-échelle de 3 étapes.

tion moyenne. Enfin, la troisième étape travaille sur les images d'origine, de meilleure résolution pour générer la carte de disparités finale, tout en utilisant les résultats précédents. Cette carte de disparités est présentée sur la figure 4.14.

L'obtention de cette carte a demandé 9 minutes, toujours avec le même micro-processeur cadencé à 2.4 GHz et disposant de 3.0 Go de mémoire vive. L'utilisation d'un algorithme pyramidal permet donc de diviser par neuf le temps de calcul sur l'extrait d'image concerné, ce qui est un gain appréciable. De plus, nous constatons qualitativement que la carte de disparités obtenue contient beaucoup moins d'erreurs (nous aurons l'occasion d'aborder de manière quantitative la justesse d'une carte de disparités par l'intermédiaire d'un modèle numérique de terrain généré) que la carte générée sans l'algorithme pyramidal. En revanche, il faut noter qu'il nous manque de l'information sur les bords de l'image, comparé à la carte de disparités sans traitement multi-échelle. Cela est dû à la taille de la fenêtre de corrélation qui balaye la zone d'étude. Cette taille est fixée à 23×23 pixels à toutes les étapes. Or, à l'étape 1, les images sont réduites d'un facteur 4 donc la taille de la fenêtre à l'étape 1 est équivalente à une taille de 92×92 pixels pour la dernière étape.

Comme précédemment, nous proposons d'observer l'effet de l'approche multi-échelle sur le pixel test (indice 155 en distance et indice 217 en azimuth). À l'étape 1, la résolution des images est dégradée d'un facteur 4.

La figure 4.15 présente les coefficients de corrélation sur la courbe épipolaire concernant ce pixel. Afin de faciliter les comparaisons, nous conservons les mêmes indices en distance que dans le cas sans multi-échelle. À l'étape 1, il faut noter que la corrélation n'est calculée que pour 1 indice en distance sur 4 (puisque la résolution est dégradée d'un facteur 4). Nous observons alors un seul pic de corrélation : le maximum a pour valeur 0.49 et se situe à l'indice 17 en distance. Le pixel homologue trouvé n'est pas encore le pixel homologue réel mais il en est très proche. La disparité calculée à l'étape

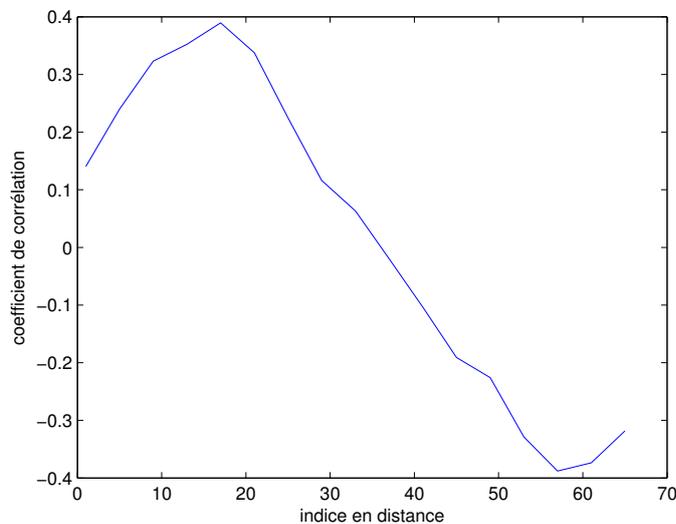


FIGURE 4.15 – Corrélation obtenue avec traitement multi-échelle, à l'étape 1, pour un pixel situé dans une zone avec erreur

Il est donc « légèrement » faussé mais fournit une information grossière sur la disparité réelle. Cette information est exploitée aux 2 étapes suivantes du processus pyramidal afin de guider la recherche du pixel homologue en distance et en azimut.

La figure 4.16 présente les coefficients de corrélation calculés pour la troisième et dernière étape. Grâce aux étapes précédentes, la recherche est bornée en distance entre les indices 18 et 24. Nous retrouvons bien le maximum de corrélation de valeur 0.71 pour l'indice 21. Grâce à l'approche multi-échelle, le pixel homologue trouvé est donc le pixel homologue réel car le maximum situé pour l'indice 65 en distance a été écarté de la recherche dès la première étape. Les erreurs d'appariement sont minimisées grâce au travail réalisé sur les images de résolution dégradée

Ainsi, l'utilisation d'une approche multi-échelle apporte un double bénéfice : sur le temps de calcul et sur la réduction du nombre d'erreurs d'appariement.

4.4.2 Localisation multi-scènes dans le repère géocentrique

La carte de disparités obtenue grâce à l'étape d'appariement contient les informations de décalage en azimut et en distance de chaque pixel de l'image secondaire par rapport à l'image de référence. Nous avons une association des pixels homologues d'une image à l'autre. Nous utilisons ces informations de décalage pour déterminer l'altitude en chaque pixel de l'image de référence : application du principe de la stéréoscopie. Pour cela, nous exploitons les équations de localisation multi-scènes présentées dans le paragraphe 2.2.3.2.

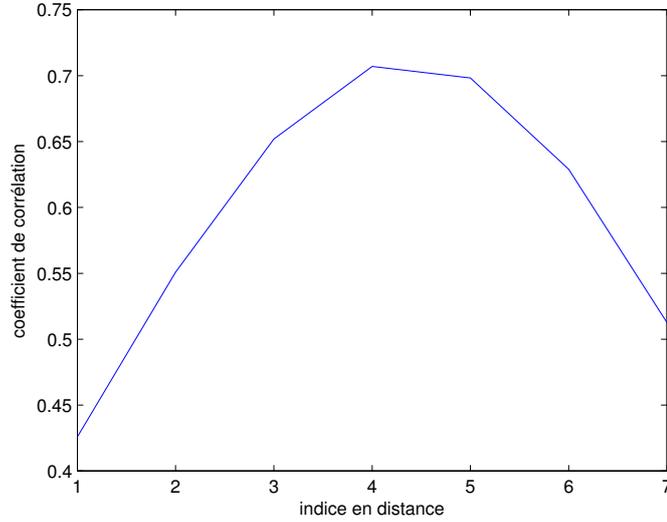


FIGURE 4.16 – Corrélation obtenue sans traitement multi-échelle, à l'étape 3, pour un pixel situé dans une zone avec erreur.

4.4.2.1 Equations de localisation multi-scènes

Pour générer le MNT (Modèle Numérique de Terrain), nous devons résoudre les équations de localisation multi-scènes (2.1) et rappelées dans le système (4.3).

$$\begin{cases} (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 & = r_1^2 \\ (x - X_1)\dot{X}_1 + (y - Y_1)\dot{Y}_1 + (z - Z_1)\dot{Z}_1 & = 0 \\ (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 & = r_2^2 \\ (x - X_2)\dot{X}_2 + (y - Y_2)\dot{Y}_2 + (z - Z_2)\dot{Z}_2 & = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Nous rappelons que ce système est constitué de :

- deux équations iso-distance (1.11) dont les solutions décrivent une sphère dans l'espace,
- deux équations iso-Doppler (1.13), dont les solutions décrivent un plan dans l'espace.

Pour chaque pixel de l'image de référence, la détermination de la solution (x, y, z) de ce système nécessite de connaître la position (X_1, Y_1, Z_1) et la vitesse $(\dot{X}_1, \dot{Y}_1, \dot{Z}_1)$ du porteur aux instants pour lesquels ce pixel est enregistré. De plus, un pixel homologue est associé à ce pixel de l'image de référence pour lequel il est possible aussi d'associer des informations de position (X_2, Y_2, Z_2) et de vitesse $(\dot{X}_2, \dot{Y}_2, \dot{Z}_2)$ du satellite. Ces informations sont essentielles pour permettre la génération du MNT.

Pour l'image de référence, nous obtenons facilement la position et la vitesse du satellite au moment de l'enregistrement de ce point grâce à l'évaluation des trajectoires présentée dans le paragraphe 4.3.1. Pour l'image secondaire, la carte de disparités générée à l'étape d'appariement permet de connaître les coordonnées du pixel homologue. Ainsi, cette carte de disparités permet d'obtenir des informations sur la position et la vitesse du satellite à l'instant où ce point est enregistré dans l'image secondaire. Nous pouvons alors résoudre le système d'équations de localisation multi-scènes (4.3)

grâce aux informations de distance porteur-cible ainsi que la position et vitesse du porteur sur sa trajectoire.

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe 2.2.3.2, le système (4.3) comporte trois inconnues pour quatre équations (système surdimensionné). Ce système correspond à une simplification mathématique d'un problème physique. Il n'existe pas de solution exacte dans l'application physique qui nous concerne car :

- le point qui doit satisfaire les quatre équations appartient en fait à un volume dans l'espace,
- l'incertitude sur les paramètres de vol (position et vitesse) du radar est source d'erreurs pour les solutions x , y et z .

En pratique, il faut donc tenir compte des incertitudes liées essentiellement à la prise de vue et cela revient à minimiser une fonction de coût par rapport à toutes les incertitudes du problème de localisation (voir [73]). Il s'agit d'un problème d'optimisation sous contraintes résolu (dans notre cas) par MAPLE[®]. Il est alors probable qu'une solution valide trois des équations mais pas la quatrième.

Pour résoudre ce système, nous éliminons une des équations afin d'avoir à résoudre un sous-système de trois équations à trois inconnues, pour lequel il est possible de déterminer la solution. Il est ainsi possible d'établir quatre sous-systèmes que nous divisons en deux configurations :

- configuration 1 (deux possibilités) : sous-système constitué des deux équations iso-Doppler et d'une équation iso-distance,
- configuration 2 (deux possibilités) : sous-système constitué des deux équations iso-distance et d'une équation iso-Doppler.

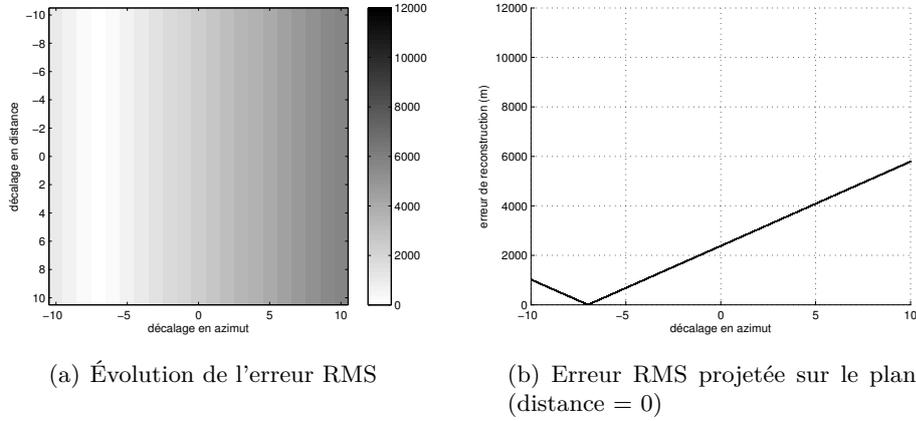
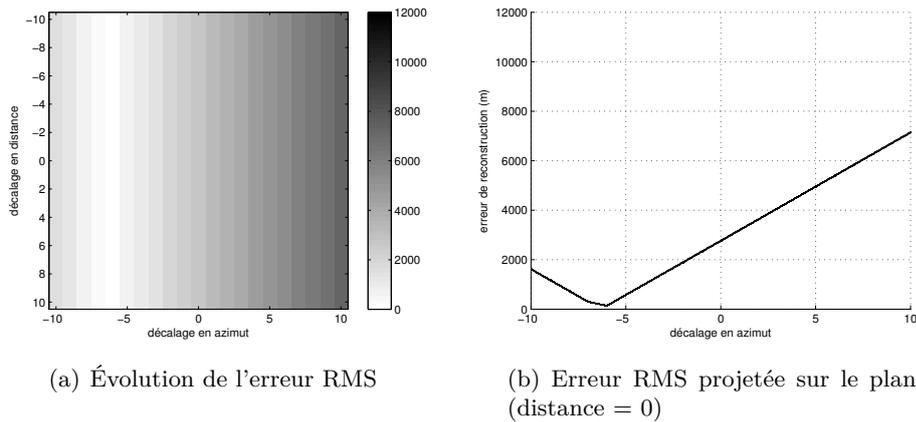
Pour chaque configuration, nous étudions la sensibilité des solutions calculées par rapport aux erreurs de corrélation en azimuth et/ou en distance afin de choisir la meilleure configuration. Cette étude de sensibilité se décompose de la manière suivante. Pour chacun des points d'amer décrits dans le tableau 4.4, nous déterminons la disparité du point d'amer homologue en utilisant la description des images radar suivant les axes distance et azimuth. Nous analysons ensuite l'effet d'une erreur de corrélation traduite par un décalage du point homologue en azimuth et/ou en distance. Ce décalage varie de -10 pixels à +10 pixels. Enfin, nous déterminons la solution (x, y, z) obtenue après décalage des données en disparités du point homologue. Ces solutions, après transposition en longitude λ , latitude ϕ et altitude h , sont comparées avec la vérité terrain. Afin de décrire le comportement de l'erreur sur une grandeur G , nous utilisons une expression de type *RMS* (*root mean square*) sur les N valeurs déterminées par le calcul \tilde{G}_i et la valeur obtenue avec la vérité terrain G_t :

$$\text{RMS}_G = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{G}_i - G_t)^2}$$

Il est à noter que la grandeur *RMS* de l'erreur est aussi liée à la moyenne et à l'écart-type de cette erreur :

$$\text{RMS}_{\text{erreur}}^2 = \overline{\text{erreur}^2} + \sigma_{\text{erreur}}^2$$

où « erreur » est la différence entre les valeurs \tilde{G}_i et G_t .

FIGURE 4.17 – Erreurs de reconstruction planimétrique en longitude Δ_λ .FIGURE 4.18 – Erreurs de reconstruction planimétrique en latitude Δ_ϕ .

4.4.2.2 Résolution de la localisation multi-scènes, configuration 1

Nous nous intéressons au cas d'un sous-système de trois équations comportant les deux équations iso-Doppler plus une équation iso-distance. Pour un point d'amer donné, nous décrivons l'évolution de l'erreur de reconstruction planimétrique :

- en longitude Δ_λ décrite sur la figure 4.17,
- en latitude Δ_ϕ décrite sur la figure 4.18,

et l'erreur de reconstruction Δ_h en altitude décrite sur la figure 4.19. Enfin, la moyenne de ces erreurs RMS (Δ_{MNT}) est présentée sur la figure 4.20. Plusieurs constatations s'imposent à l'examen des différentes figures proposées, qui décrivent l'évolution de l'erreur *RMS* d'un paramètre.

Tout d'abord, les figures mettent en évidence le fait que les erreurs de reconstruction sont très sensibles à un décalage de pixel en azimuth. Par contre, ces erreurs ne varient quasiment pas sous l'effet d'un décalage de pixel en distance. Ainsi, lors de la recherche des points homologues, nous pouvons attacher peu d'importance à la précision en position selon l'axe distance du point homologue.

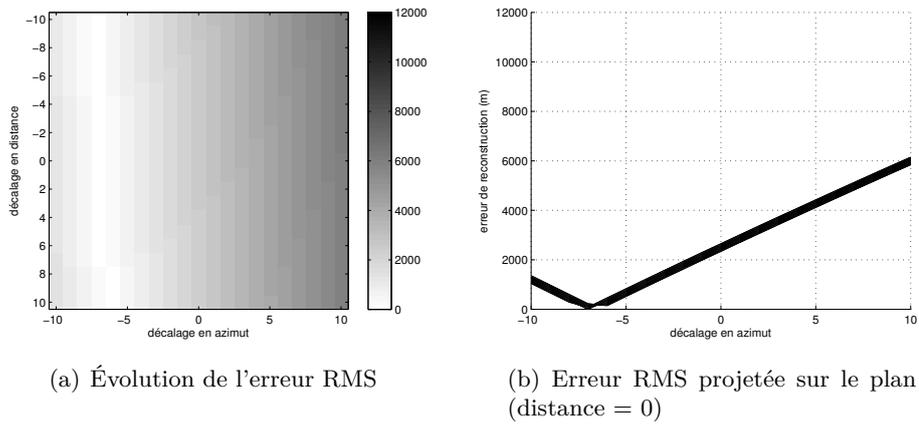


FIGURE 4.19 – Erreurs de reconstruction en altitude Δ_h .

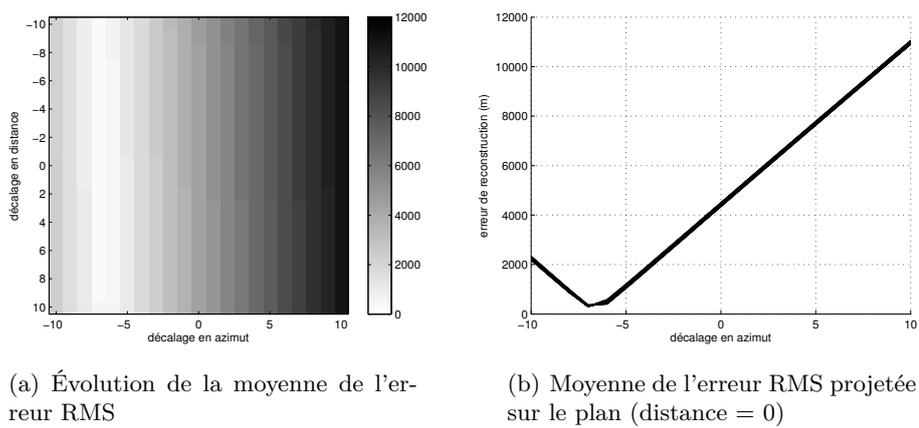


FIGURE 4.20 – Moyenne de l'erreur RMS Δ_{MNT} .

| | décalage induit (m) |
|--------------|---------------------|
| en longitude | 0.14 |
| en latitude | 0.13 |
| en altitude | 16 |
| valeur RMS | 9 |

TABLE 4.6 – Configuration 1 : effet du décalage d'un pixel en distance.

| | décalage induit (m) |
|--------------|---------------------|
| en longitude | 340 |
| en latitude | 438 |
| en altitude | 340 à 404 |
| valeur RMS | 650 à 680 |

TABLE 4.7 – Configuration 1 : effet d'un décalage d'un pixel en azimut.

Ensuite, les erreurs minimum de planimétrie et d'altitude ne sont pas obtenues pour un décalage nul mais pour un décalage de -7 pixels en azimut. Il faut donc en déduire que, dans cette configuration, il est nécessaire d'appliquer une compensation de 7 pixels en azimut avant de procéder à la résolution de localisation.

Enfin, nous constatons que les erreurs de reconstruction Δ_{MNT} peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres. Cette configuration ne semble donc pas optimum pour la précision de la reconstruction du MNT. En effet, si nous nous intéressons quantitativement à l'effet du décalage d'un seul pixel en azimut ou en distance en utilisant les données présentés dans les quatre figures établies préalablement, nous pouvons déterminer précisément la sensibilité de cette configuration à une erreur d'appariement. En tout point des fonctions d'erreurs de reconstruction, il suffit de soustraire l'erreur obtenue à celle du pixel voisin en azimut ou en distance pour obtenir le décalage induit. Ces décalages induits sont quasiment constants pour les fonctions d'erreurs de reconstruction. Toutefois, ils peuvent être plus faibles au voisinage des minimums des fonctions d'erreurs mais cela reste un phénomène local. Majoritairement, les décalages induits sont constants : les résultats sont présentés dans les tableaux 4.6 et 4.7. Ils sont valables pour les 8 points d'amer étudiés.

Nous constatons qu'une erreur d'un seul pixel en distance entraîne une erreur quasi nulle en planimétrie, de l'ordre de 0.14 mètre et une erreur altimétrique faible, de l'ordre de 16 mètres. Par contre, une erreur d'un seul pixel en azimut lors de l'étape de corrélation entraîne une erreur de plusieurs centaines de mètres (340 à 438 mètres) sur la localisation du point recherché. Cette erreur de localisation se produit dans toutes les dimensions : en planimétrie et en altimétrie. Les solutions du système sont donc très sensibles aux erreurs de corrélation en azimut, ce qui risque de dégrader la précision du MNT.

Pour comprendre pourquoi l'effet d'une erreur d'un pixel en azimut a autant d'influence sur la précision de la localisation, nous allons nous intéresser à la géométrie du problème.

Sur la figure 4.21 sont représentés la position du satellite S_1 , sa sphère iso-distance ainsi qu'un cercle, représentant l'intersection entre la sphère iso-distance et le plan iso-Doppler de S_1 . Pour compléter le système d'équations, le plan iso-Doppler associé au satellite S_2 est représenté sur la figure 4.21 par une ligne (seule la tranche de ce plan est présentée sur le schéma). La solution du système de trois équations est

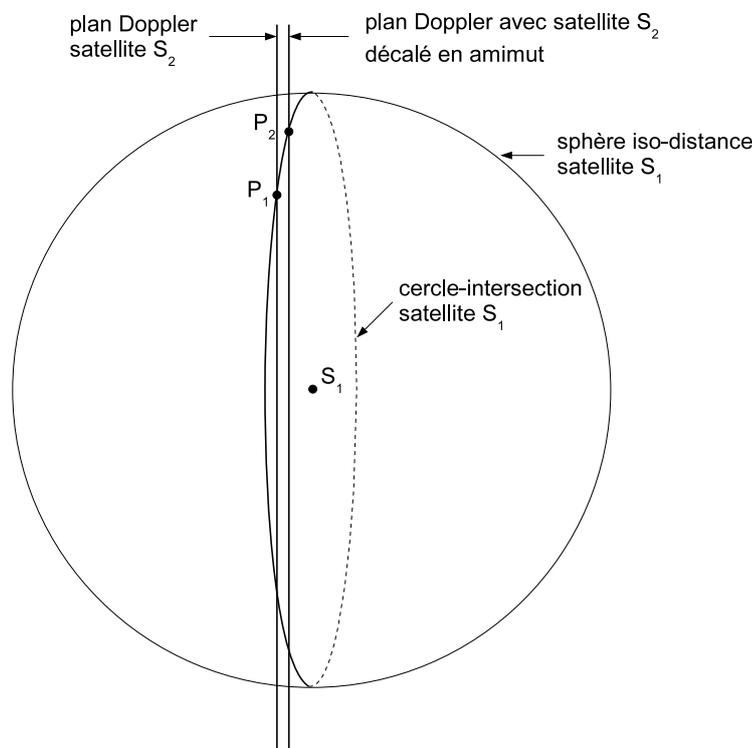


FIGURE 4.21 – Effet d’une erreur en azimuth sur la recherche de la solution.

représentée par P_1 , intersection entre le cercle-intersection et le plan iso-Doppler de S_2 . Une erreur de position azimuthale sur le satellite S_2 va entraîner un décalage de ce plan iso-Doppler et la solution du système se retrouve fortement décalée en P_2 . Cela est dû au fait que les deux plans iso-Doppler sont quasiment parallèles dans l’espace. Ainsi, un décalage dans la localisation azimuthale entraîne une erreur de localisation du point recherché qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

Les résultats obtenus nous permettent donc d’établir qu’un sous-système comportant les deux équations de plan est à proscrire afin de limiter la sensibilité de la localisation de la solution sous l’effet d’une erreur en azimuth. La configuration n’est donc pas la configuration retenue pour les algorithmes de localisation multi-scènes.

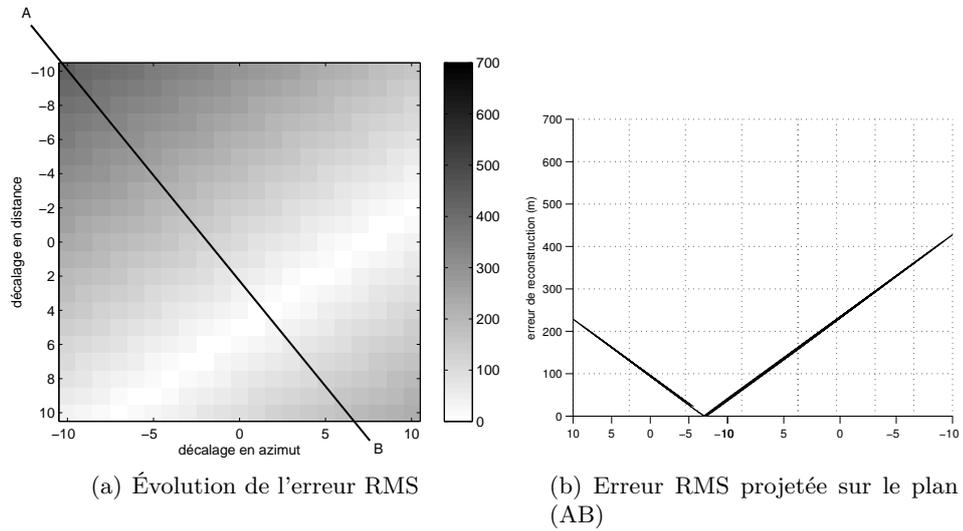
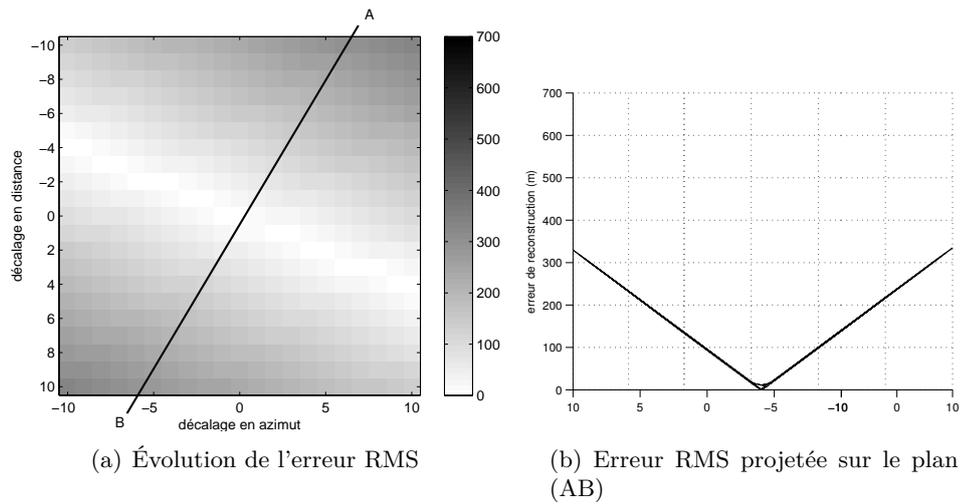
4.4.2.3 Résolution de la localisation multi-scènes, configuration 2

La configuration 1 n’étant pas optimale pour la fiabilité des solutions, le sous-système utilisé pour les calculs est alors constitué des deux équations iso-distance et d’une équation iso-Doppler. Pour un point d’amer donné, nous analysons l’évolution de l’erreur de reconstruction planimétrique à savoir

- en longitude Δ_λ décrite sur la figure 4.22,
- en latitude Δ_ϕ décrite sur la figure 4.23,

et l’erreur de reconstruction Δ_h en altitude décrite sur la figure 4.24. Enfin, la moyenne de ces erreurs RMS (Δ_{MNT}) est présentée sur la figure 4.25.

Dans cette configuration, nous constatons que les erreurs de reconstruction sont de l’ordre de plusieurs centaines de mètres pour un décalage maximum de 10 pixels. Cette

FIGURE 4.22 – Erreurs de reconstruction planimétrique en longitude Δ_λ .FIGURE 4.23 – Erreurs de reconstruction planimétrique en latitude Δ_ϕ .

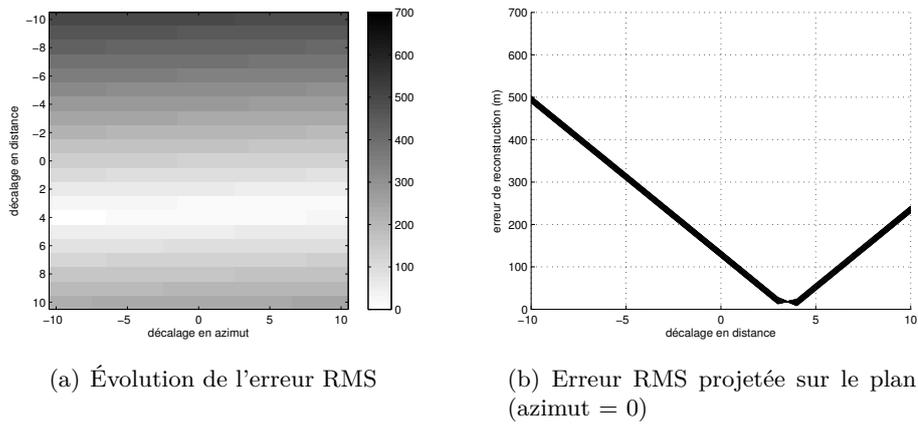


FIGURE 4.24 – Erreurs de reconstruction en altitude Δ_h .

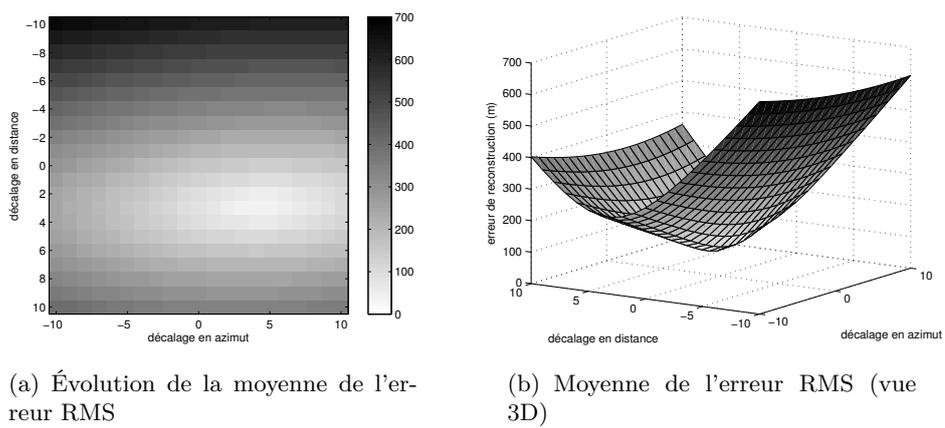


FIGURE 4.25 – Moyenne de l'erreur RMS Δ_{MNT} .

| | décalage induit (m) |
|--------------|---------------------|
| en longitude | 19.4 |
| en latitude | 23.5 |
| en altitude | 37 |
| valeur RMS | 0 à 48 |

TABLE 4.8 – Configuration 2 : effet d'un décalage d'un pixel en distance.

| | décalage induit (m) |
|--------------|---------------------|
| en longitude | 13.5 |
| en latitude | 9.8 |
| en altitude | 0.8 |
| valeur RMS | 0 à 17 |

TABLE 4.9 – Configuration 2 : effet d'un décalage d'un pixel en azimut.

nouvelle configuration génère donc moins d'erreurs que la configuration 1 puisque les erreurs dans cette configuration atteignent régulièrement plusieurs milliers de mètres. Comme nous l'avons fait pour la première configuration, nous analysons plus en détail les répercussions d'une erreur d'appariement sur la reconstruction en étudiant les points d'amer. La première constatation est que les décalages induits sont pratiquement constants (en distance ou en azimut) que ce soit pour un décalage d'un pixel (en distance ou en azimut). Les résultats sont présentés dans les tableaux 4.8 et 4.9.

Ainsi, une erreur d'appariement d'un pixel en azimut a très peu d'influence sur la détermination de l'altitude h car l'erreur induite est inférieure au mètre. La localisation altimétrique est donc très peu sensible aux erreurs azimutales d'appariement. En revanche, une erreur d'appariement d'un pixel en distance engendre une erreur de localisation en altitude autour de 37 mètres. En planimétrie, que ce soit sous l'influence d'un décalage d'un pixel en azimut ou en distance, l'erreur de localisation engendrée est globalement comprise entre 10 et 24 mètres.

De plus, la moyenne RMS des erreurs présentée sur la figure 4.25 montre clairement que l'erreur minimum de localisation ne se situe pas pour un décalage nul en pixels (en distance et en azimut). En étudiant chaque point d'amer, nous relevons les valeurs de décalage en azimut et en distance pour lesquels nous obtenons l'erreur minimum de localisation. Ces résultats sont visibles dans le tableau 4.10.

| | erreur de localisation minimum (m) | décalage en azimut | décalage en distance |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Pic de l'Agrenier | 61.2 | 4 | 2 |
| Les Ourgières | 28.5 | 5 | 2 |
| Pic de Clapouse | 36.0 | 4 | 3 |
| Dent du Ratier | 18.3 | 5 | 3 |
| Est du Col Garnier | 22.6 | 6 | 6 |
| Pic de Fond Queyvras | 31.7 | 2 | 3 |
| SE Pic de Rochebrune | 16.5 | 3 | 2 |
| Sommet d'Assan | 20.8 | 6 | 3 |

TABLE 4.10 – Valeurs des décalages de pixels en azimut et en distance pour l'erreur minimum de localisation.

| | erreur en longitude (m) | erreur en latitude (m) | erreur en altitude (m) | erreur de localisation globale (m) |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Pic de l'Agrenier | 46.0 | 72.8 | 12.5 | 87.0 |
| Les Ourgières | 15.5 | 58.0 | 25.6 | 65.3 |
| Pic de Clapouse | 12.8 | 29.0 | 17.3 | 36.0 |
| Dent du Ratier | 2.0 | 23.9 | 0.5 | 24.0 |
| Est du Col Garnier | 97.5 | 68.2 | 104.9 | 158.6 |
| Pic de Fond Queyvras | 41.1 | 7.0 | 23.9 | 48.1 |
| SE Pic de Rochebrune | 36.9 | 7.3 | 52.2 | 64.3 |
| Sommet d'Assan | 22.4 | 40.0 | 1.4 | 45.6 |

TABLE 4.11 – Erreurs de localisation trouvées après application du décalage en azimut et en distance.

| | erreur en longitude (m) | erreur en latitude (m) | erreur en altitude (m) | erreur de localisation globale (m) |
|----------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Valeur maximum | 46.0 | 72.8 | 52.2 | 87.0 |
| Valeur moyenne | 25.2 | 34.0 | 19.1 | 52.9 |
| Valeur minimum | 2.0 | 7.0 | 0.5 | 7.3 |

TABLE 4.12 – Valeurs maximum, minimum et moyenne des erreurs de localisation sur 7 points d'amer

Sur ces 8 points d'amer, le décalage moyen est de 4.4 pixels en azimut avec un écart-type de 1.4. En distance, le décalage moyen est de 3 pixels avec un écart-type de 1.3. Nous concluons donc qu'il faut effectuer une compensation de 4 pixels en azimut et de 3 pixels en distance avant de procéder aux calculs de génération du MNT. Avec cette compensation, nous savons que le point calculé n'est pas toujours celui pour lequel l'erreur de localisation est minimum. Le tableau 4.11 relève les erreurs de localisation en longitude, en latitude, en altitude et globale (valeur RMS de la longitude, latitude et altitude) des différents points d'amer, après application du décalage de 4 pixels en azimut et de 3 pixels en distance.

Si l'on exclut le point d'amer *Est du Col Garnier*, pour lequel la localisation est particulière puisqu'il s'agit d'un col (donc mauvaise précision de localisation contrairement à un pic), les valeurs maximum, les valeurs moyennes et les valeurs minimums des erreurs de localisation (longitude, latitude, altitude et globale) pour les 7 autres points d'amer sont synthétisées dans le tableau 4.12.

En conclusion, nous pouvons dire que les résultats du tableau 4.12 nous indiquent que les erreurs de localisation planimétrique et altimétrique sont en moyenne de l'ordre de 1 à 1.5 fois la résolution en azimut $\delta_{ab_{is}}$ ou en distance projetée au sol δ_s . Cette précision prometteuse est toutefois à relativiser car l'étude n'a été menée que sur des points d'amer facilement identifiables. Nous allons maintenant appliquer ces méthodes à l'ensemble de la zone d'étude afin de générer un modèle numérique de terrain qui est à comparer à des données de référence.

4.5 Obtention du MNT complet

Dans le paragraphe 4.4.2, nous avons détaillé la méthode permettant de calculer l'altitude et les coordonnées géocentriques d'un point à partir des coordonnées image

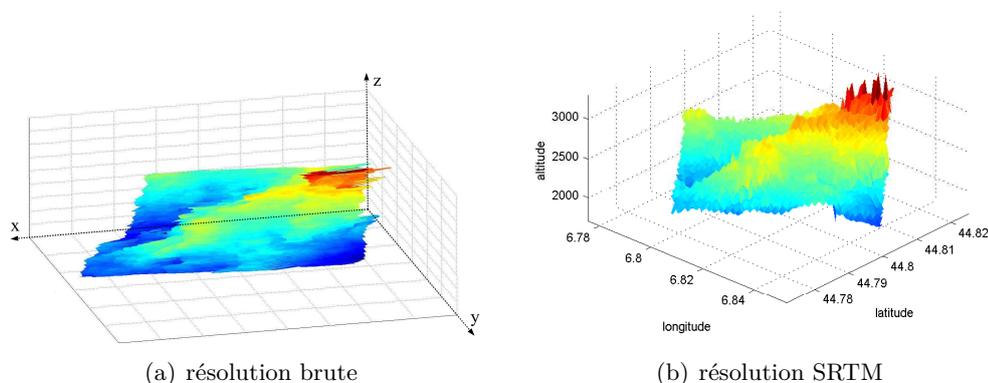


FIGURE 4.26 – MNT généré - vue 3D.

de ce point et de son pixel homologue. L'application de cette méthode à l'ensemble de la zone d'étude permet la génération d'un MNT complet.

4.5.1 Etude sur le MNT généré

Nous rappelons que la zone d'étude est un extrait d'image (figure 4.7) constitué de 300 pixels en distance sur 356 pixels en azimuth. Cette zone d'étude est choisie afin de représenter l'ensemble des conditions particulières de prise de vue d'une image radar (voir paragraphe 1.3.1). La carte de disparité utilisée pour les calculs est celle obtenue dans le cadre de l'approche multi-échelle (figure 4.14). Le MNT généré à partir de cette carte de disparité se présente sous la forme d'un nuage de points (λ, ϕ, h) . Ce MNT est visible sur la figure 4.26(a). Cette première représentation nous donne une indication sur la forme du terrain et met déjà en évidence plusieurs erreurs de localisation. En revanche, ce MNT est quantitativement difficilement exploitable. En effet, les points le constituant ne sont pas régulièrement espacés ce qui complique la comparaison avec une vérité terrain. De plus, il est impossible de calculer directement sa résolution spatiale puisque la zone d'étude est inclinée par rapport au repère géocentrique.

Toutefois, pour une étude quantitative, nous souhaitons comparer les données de ce MNT avec les données SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) dont nous disposons. Nous avons souligné dans le paragraphe 1.1.3 que la mission SRTM a permis la génération de MNT par interférométrie (figure 4.27). La résolution planimétrique de ces MNT est de 31 mètres pour les Etats-Unis et de 93 mètres pour le reste du Globe. La précision verticale d'élévation est d'environ 16 mètres. Connaissant la résolution des données SRTM, nous devons alors échantillonner notre MNT pour qu'il corresponde à la même grille régulière en longitude et latitude du MNT obtenu avec les données SRTM. Cette opération de maillage permet alors d'obtenir un nouveau MNT (voir figure 4.26(b)) dans le repère orthonormé (longitude, latitude). Grâce à cette opération de rééchantillonnage, nous pouvons facilement projeter ce MNT en deux dimensions (figure 4.28(a)). Avec le recalage des données, nous calculons alors les erreurs altimétriques par simple différence entre ce MNT et le MNT SRTM de référence. Les erreurs de localisation en altitude concernant le MNT obtenu sont affichées sur la figure 4.28(b).

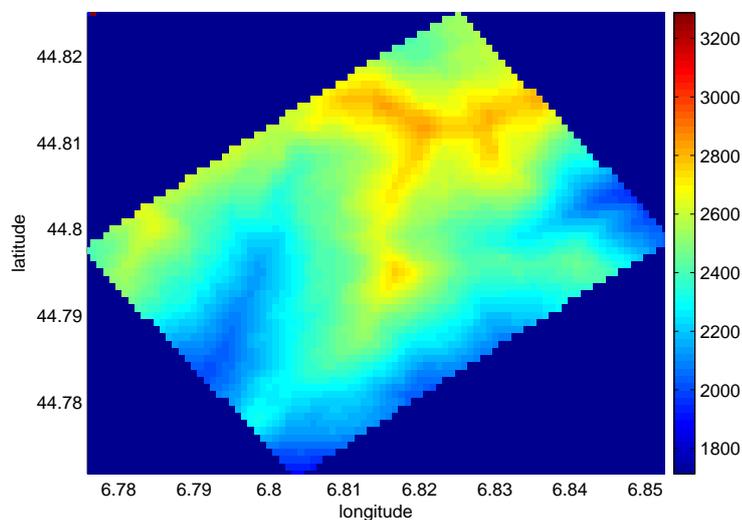
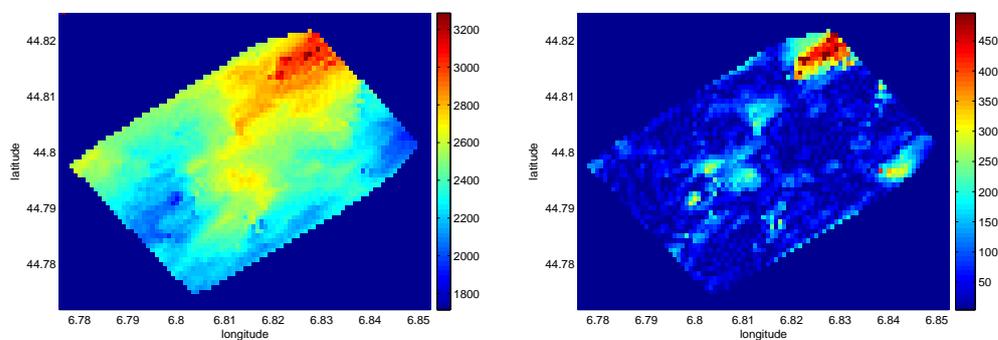


FIGURE 4.27 – MNT SRTM de la zone étudiée.



(a) MNT généré et décrit dans le repère géocentrique

(b) différences entre le MNT généré et le MNT SRTM

FIGURE 4.28 – MNT généré et comparaison avec le MNT SRTM.

| nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | |
|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | |
| % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| 27.6 | 9.8 | 51.1 | 22.5 | 80.0 | 36.1 | 93.8 | 50.9 |

TABLE 4.13 – Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur le MNT généré

| type d'appariement | points avec une erreur altimétrique | | | | | |
|------------------------|-------------------------------------|------------------|--------|------------------|---------|------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| corrélateur classique | 38 | 11.1 | 74 | 24.7 | 89 | 35.5 |
| appariement spécifique | 49 | 11.0 | 85 | 23.0 | 95 | 31.4 |

TABLE 4.14 – Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes - valeurs présentées dans [56]

Les premiers résultats sont intéressants mais pas entièrement satisfaisants. Les erreurs altimétriques sont synthétisées dans le tableau 4.13. Nous constatons que seulement la moitié des points du MNT présentent une erreur de reconstruction inférieure à 50 mètres. De plus, seulement 93.8 % des points comportent une erreur de moins de 200 mètres en altitude.

Ces résultats obtenus sur le MNT généré mettent en évidence une mauvaise reconstruction altimétrique, ce qui nous empêche d'obtenir un MNT de qualité. Cette mauvaise reconstruction est due aux erreurs d'appariement lors de la précédente mise en correspondance. Les erreurs les plus importantes se situent sur une zone où la radiométrie est homogène (coin supérieur droit de l'image). À ce stade de l'étude, il est intéressant de pouvoir comparer les premiers résultats de notre chaîne radargrammétrique avec des études équivalentes.

4.5.2 Comparaison avec l'existant et perspectives

Plusieurs études ont été menées afin de générer un MNT de qualité par radargrammétrie. Parmi celles-ci, nous nous penchons sur les études de [52], ainsi que celles de [56] pour deux raisons principales :

- les résultats sont décrits précisément en les présentant selon différents niveaux d'erreurs,
- les auteurs ont mis en place des méthodes particulières afin d'effectuer une mise en correspondance spécifique aux images radar ; il est donc intéressant de comparer notre approche avec celles développées.

De plus, dans les deux études, la résolution planimétrique des MNT est d'environ 30 mètres ce qui correspond aussi aux caractéristiques de notre travail.

Comme nous l'avons vu dans la partie 2.3.2.3, l'étude menée dans [56] utilise une optimisation combinatoire grâce à une recherche tabou. Les critères intervenants dans la mise en correspondance sont : la valeur de corrélation, le gradient de disparité et le nombre de points appariés. L'intérêt de cette méthode par rapport à un appariement classique est important comme le prouvent les résultats présentés dans le tableau 4.14. Grâce à l'appariement spécifique par méthode tabou, la proportion de points dont l'erreur altimétrique est inférieure à 20 mètres est augmentée de 11 %.

Dans les travaux décrits par [52], deux paires d'images qui concernent deux zones différentes ont été utilisées. Une paire d'images radar provient du capteur RADARSAT-1 ciblant la zone du Rift d'Assal, Djibouti. La deuxième paire provient du capteur ENVISAT-ASAR et cible une zone du Golfe Persique. Dans cette étude, la mise en correspondance a pour particularité de faire intervenir une détection et une extraction de contours, comme nous l'avons signalé dans la partie 2.3.2.4. Cet appariement spécifique permet d'obtenir des MNT très précis. Par exemple, le tableau 4.15 indique que

| type de l'étude | points avec une erreur altimétrique | | | | erreur moyenne (m) |
|-----------------|-------------------------------------|--------|--------|---------|--------------------|
| | < 10 m | < 30 m | < 50 m | < 100 m | |
| RADARSAT-1 | 27.7 % | 69.5 % | 88.8 % | 98.5 % | 25.1 m |
| ENVISAT-ASAR | 41.0 % | 79.2 % | 91.2 % | 98.5 % | 20.0 m |

TABLE 4.15 – Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes - valeurs présentées dans [52]

98.5 % des points comportent une erreur de reconstruction inférieure à 100 mètres.

La comparaison des résultats de la littérature (tableaux 4.14 et 4.15) avec nos résultats (tableau 4.13) montrent que les résultats obtenus par [52] et [56] sont meilleurs que ceux que nous obtenons avec le MNT généré. Les méthodes spécifiques utilisées (extraction de contours pour [52] et tabou pour [56]) permettent l'obtention de MNT de qualité. Dans le cadre de notre étude, afin d'améliorer la précision de notre MNT, nous devons fiabiliser l'étape d'appariement : un appariement classique basé uniquement sur la recherche du maximum des indices de corrélation n'est pas un critère suffisant pour juger d'une bonne mise en correspondance. En ce qui concerne les perspectives, un objectif raisonnable, compte tenu du choix de la zone (montagne) serait d'obtenir un MNT dont les erreurs de reconstruction sont similaires à celles obtenues par [52] et [56], c'est à dire 85 % à 90 % de pixels dont l'erreur altimétrique reste inférieure à 50 mètres et plus de 95 % de pixels dont l'erreur altimétrique reste inférieure à 100 mètres. Notons également qu'il est possible d'améliorer la résolution planimétrique de notre MNT. Les MNT obtenus par [52] et [56] ont une résolution d'environ 30 mètres. Or, nous avons échantillonné notre MNT pour qu'il corresponde à la grille SRTM de résolution 93 mètres et que ces deux MNT puissent être comparés. Ainsi, lors de cet échantillonnage, le nombre de pixels du MNT a été divisé par 16 c'est à dire que la résolution a été divisée par 4. En effectuant un échantillonnage sur une grille plus fine, nous pouvons espérer obtenir une résolution inférieure à 30 mètres.

4.6 Conclusion

Cette première étude sur les images SIR-C nous a permis de créer une chaîne complète liée au traitement radargrammétrique. Nous avons montré l'importance des points d'amer afin d'apporter des corrections en azimuth et en distance. Ces corrections sont nécessaires pour recalibrer les images entre elles et pour recalibrer le MNT final. Les premiers résultats obtenus montrent que la mise en correspondance entre les deux images peut échouer et fausser le calcul des disparités. En conséquence lors de la génération du MNT, il subsiste un nombre important de points dont l'altitude est mal calculée : 6 % des points du MNT généré comportent une erreur altimétrique supérieure à 200 mètres. Pour réduire ces erreurs, il faut modifier l'étape d'appariement. En effet, un appariement classique basé uniquement sur l'indice de corrélation comme indice de confiance n'est pas suffisant. Des appariements spécifiques, utilisés par [52] et [56], améliorent grandement la qualité du MNT. Dans la suite de notre étude, nous allons donc modifier la mise en correspondance des images en proposant de renforcer et de fiabiliser cette étape. Nous allons alors démontrer l'intérêt de l'approche multi-fenêtre afin de diminuer le nombre de faux appariements.

Chapitre 5

Appariement : une approche multi-fenêtre

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté toutes les étapes constituant une chaîne radargrammétrique : définition de la géométrie de prise de vue, détermination des courbes épipolaires et de la zone de recherche, appariement avec traitement multi-échelle et résolution de la localisation multi-scènes afin de générer un MNT complet. Les résultats présentés sont satisfaisants mais souffrent de quelques imprécisions de reconstruction dans certaines zones. Ainsi, nous obtenons 80% de points dont l'erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres. Notre objectif est d'améliorer les résultats pour passer cette valeur à 95% ou plus, comme dans les études menées par [52] ou [56]. Une première analyse des points donnant de mauvais résultats pour la reconstruction du MNT nous indique qu'ils sont situés dans des zones homogènes (où le coefficient de réflexion relativement constant) ou dans des zones de compression (paragraphe 1.3.1.2). Aussi, une augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation pour certains points de ces zones nous a permis d'améliorer le résultat final. De la même manière, une diminution de la taille de la fenêtre de corrélation pour des zones présentant une forte hétérogénéité a donné un résultat plus fiable (niveau de corrélation plus élevé). Ainsi, la piste privilégiée dans notre étude pour améliorer l'étape d'appariement est liée à la modification de la taille des fenêtres.

Afin de valider notre démarche, nous proposons d'étudier le comportement du traitement radargrammétrique pour un pixel (utilisé comme exemple d'application) présentant un problème (mauvais appariement) à la reconstruction. Notre approche est donc dans un premier temps pragmatique pour tenter d'étendre la méthode de reconstruction à l'ensemble de la zone d'étude. Afin de corriger la mise en correspondance sur ce pixel, nous proposons trois méthodes multi-fenêtres dont nous détaillons les principes. Ensuite, nous présentons les résultats de ces méthodes appliquées à la reconstruction du MNT, en les comparant avec les résultats obtenus pour la méthode classique. Dans un premier temps, nous effectuons cette comparaison pour l'étape 1 du traitement multi-échelle ; nous voyons ensuite quelles méthodes sont les plus efficaces pour la mise en correspondance lors des étapes suivantes. Enfin, nous proposons quelques pistes pour améliorer le résultat final en travaillant essentiellement sur la

carte de disparités.

5.2 Méthodes multi-fenêtre

Dans notre étude précédente, nous avons utilisé une taille unique de fenêtre de corrélation (23×23 pixels) pour effectuer l'appariement. Nous appelons ici cette méthode, la méthode classique. Nous allons maintenant utiliser différentes tailles de fenêtres pour la mise en correspondance. L'objectif est de diversifier les motifs de corrélation afin d'obtenir des informations supplémentaires qui rendent l'étape d'appariement plus fiable. Après plusieurs études sur les tailles de fenêtre, il apparaît que les tailles de fenêtre $n \times m$ inférieures à 7×7 pixels ou supérieures à 23×23 pixels ne sont pas appropriées dans la zone d'étude qui nous concerne. Pour la première méthode proposée, nous choisissons arbitrairement 4 tailles de fenêtre de corrélation pour la suite de l'étude : 7×7 , 13×13 , 19×19 et 23×23 pixels, afin de couvrir au mieux l'échelle des tailles de fenêtres. Les surfaces de corrélation obtenues pour chaque taille de fenêtre sont multipliées entre elles afin d'aboutir à une surface de corrélation globale. Pour la deuxième méthode proposée, nous utilisons des fenêtres de même dimension m en azimut mais de dimension n variable en distance, afin de déterminer la fenêtre de taille optimale pour effectuer l'appariement. La troisième méthode est une combinaison des deux méthodes précédentes. Nous illustrons l'intérêt de ces méthodes sur un pixel exemple, situé dans une zone de compression, quasiment homogène pour un voisinage local. Les méthodes sont appliquées ici sur l'étape 1 du traitement multi-échelle. La résolution des images est donc dégradée d'un facteur 4. Il est à noter que, dans cette configuration, une erreur de localisation d'un pixel en distance entraîne une erreur altimétrique d'environ 80 mètres sur le MNT.

5.2.1 Méthode 1 : produit des coefficients de corrélation

Nous mettons en place une première méthode de base afin de déterminer s'il y a un réel intérêt à utiliser plusieurs tailles de fenêtres lors de la mise en correspondance. Dans un premier temps, lors de l'appariement d'un pixel, nous effectuons donc un simple produit des coefficients de corrélation obtenus pour chaque taille individuelle de fenêtre. Les tailles utilisées sont : 7×7 , 13×13 , 19×19 et 23×23 pixels. Lors de la mise en correspondance, comme nous l'avons présenté dans le paragraphe 4.4.1.1, le calcul du coefficient de corrélation ρ est effectué pour chaque position possible de la fenêtre de référence dans la zone de recherche. Nous obtenons alors une surface de corrélation pour laquelle la position du maximum d'amplitude nous permet d'identifier le pixel homologue. Comme nous utilisons maintenant 4 tailles de fenêtres de corrélation, ce processus est donc réitéré pour chaque taille de fenêtre et nous obtenons alors 4 surfaces de corrélation. Afin de faciliter la visualisation des surfaces de corrélation dans ce document, nous la limitons à un pixel en azimut : les surfaces de corrélation se présentent alors sous la forme de profils de corrélation. Le profil est choisi afin de montrer le plus clairement le comportement du phénomène d'appariement. Pour le pixel exemple, nous présentons ces profils sur la figure 5.1.

Pour ce pixel, avec une vérification manuelle, nous savons que le pixel homologue véritable se situe à l'indice 11 en distance. Analysons maintenant les résultats de ces profils de corrélation :

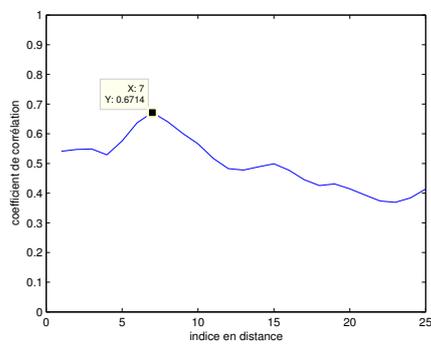
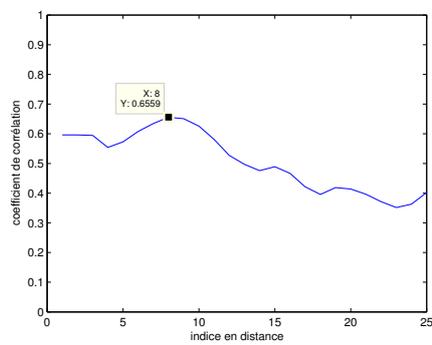
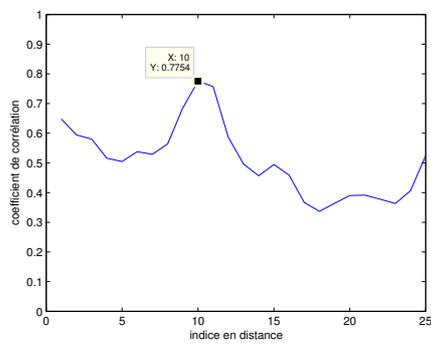
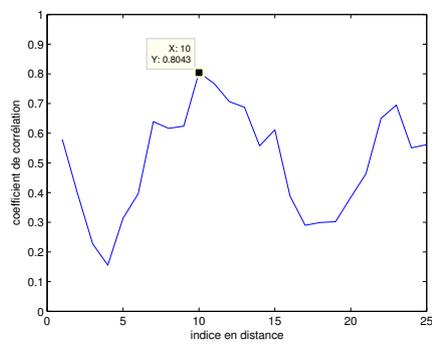
(a) fenêtre 23×23 pixels(b) fenêtre 19×19 pixels(c) fenêtre 13×13 pixels(d) fenêtre 7×7 pixels

FIGURE 5.1 – Méthode 1 : profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple.

- pour la fenêtre 23×23 pixels, nous avons un pic de corrélation de valeur 0.67 pour l'indice 7 en distance. En se basant uniquement sur les informations données par cette taille de fenêtre, la mise en correspondance est fautive. L'écart avec le pixel homologue vrai est de 4 pixels, ce qui représente une erreur de reconstruction de 416 mètres sur le MNT,
- pour la fenêtre 19×19 pixels, le maximum des coefficients de corrélation a comme valeur 0.66 pour l'indice 8 en distance. Il y a un écart de 3 pixels avec le pixel homologue vrai,
- pour la fenêtre 13×13 pixels, nous obtenons un pic de corrélation prononcé de valeur 0.78 pour l'indice 10 en distance. La mise en correspondance est quasiment parfaite car il n'y a qu'un seul pixel d'écart avec le pixel homologue vrai. L'erreur de reconstruction sur le MNT n'est que de 130 mètres,
- pour la fenêtre 7×7 pixels, nous obtenons un pic de corrélation prononcé de valeur 0.80 pour l'indice 10 en distance. Nous nous retrouvons dans la même situation que pour la fenêtre 13×13 pixels.

Cet exemple nous permet de constater que si l'on prend pour seul critère le maximum des coefficients de corrélation pour localiser le pixel homologue, la corrélation échoue pour une taille de fenêtre 23×23 ou de 19×19 pixels. Pour les fenêtres 13×13 et 7×7 pixels, la localisation du pixel homologue est correcte à un pixel près. Mais pour la fenêtre 7×7 pixels, la visualisation du profil met en évidence la possibilité d'avoir de meilleurs candidats à l'appariement car des pics secondaires sont présents pour des indices en distance différents. Seule la fenêtre 13×13 permet d'obtenir un pic de corrélation sans ambiguïté. Toutefois, rien n'indique que cette taille de fenêtre est optimale pour toute l'image. Pour le pixel étudié ici, le résultat pour la fenêtre 23×23 est médiocre. Toutefois, pour la grande majorité des autres pixels de l'image, cette fenêtre de 23×23 pixels permet une corrélation sans ambiguïté.

Nous allons alors tirer profit des informations données pour chaque taille de fenêtre par un simple produit des coefficients de corrélation obtenus. Toujours pour le pixel exemple, le produit des 4 profils de corrélation est présenté sur la figure 5.2. Pour déterminer le pixel homologue, la méthode reste inchangée : nous prenons le pixel correspondant au maximum du coefficient de corrélation. Ici, le maximum est obtenu pour l'indice 10 en distance et la mise en correspondance est alors correcte à un pixel près, car l'indice 11 correspond au pixel homologue vrai. La méthode de multiplication des coefficients de corrélation permet donc de faire ressortir le pixel homologue véritable parmi tous les candidats possibles à l'appariement. Pour cette valeur d'indice en distance, l'erreur de reconstruction sur le MNT est de 130 mètres. Cette valeur peut sembler élevée mais rappelons que nous travaillons ici sur l'étape 1 de la pyramide de reconstruction. Ainsi une erreur d'un seul pixel en distance entraîne variation de 80 mètres sur le MNT. L'erreur trouvée de 130 mètres est donc raisonnable. Les résultats de cette méthode appliquée à la reconstruction du MNT de la zone d'étude sont présentés dans le paragraphe 5.3.1.

5.2.2 Méthode 2 : dilatation de la fenêtre de corrélation

Nous remarquons que la plupart des erreurs sur le MNT final sont localisées dans des zones de compression (paragraphe 1.3.1.2). L'appariement échoue essentiellement dans ces zones car la différence entre les angles d'incidence y entraîne une plus grande

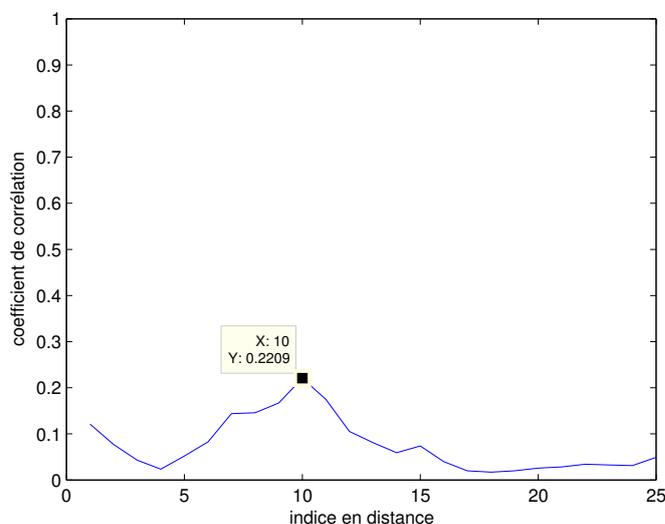


FIGURE 5.2 – Méthode 1 : produit des profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple.

migration des pixels en distance. Ce phénomène est d’autant plus accentué dans notre cas étant donné la différence des angles d’incidence de nos images ($\theta_{v_1} = 50,1^\circ$ et $\theta_{v_2} = 35,7^\circ$). En conséquence, les fenêtres de corrélation ne sont pas suffisamment similaires pour obtenir une mise en correspondance fiable. Pour illustrer l’impact de cette différence, nous allons reprendre le pixel exemple de la méthode 1, pour lequel la corrélation échoue avec la méthode classique. Pour ce pixel, les profils de la surface de corrélation sont présentés figure 5.1. Pour une taille de fenêtre 23×23 pixels, le maximum des coefficients de corrélation est de 0.67 pour l’indice 7 en distance. Or, un appariement manuel permet d’identifier le pixel homologue pour l’indice 11 en distance. À l’étape 1, cette erreur de 4 pixels en distance induit une erreur de 416 mètres lors de la reconstruction en 3D. Cette différence entre l’appariement manuel et l’appariement de la méthode classique est due au fait que le voisinage de ce pixel subit une compression en distance différente d’une image à l’autre. Cette déformation est visible sur la figure 5.3. Sur cette figure, la taille de la fenêtre de visualisation est de 51×51 pixels afin de faciliter la perception du phénomène de compression et de comprendre les conséquences sur l’opération d’appariement (les fenêtres de corrélation utilisées pour l’appariement) apparaissent sur les deux extraits d’image.

Nous allons maintenant tenir compte de ce phénomène de compression pour mettre en place une stratégie adaptée : la dilatation en distance de la fenêtre de corrélation, pour compenser le phénomène de compression. La fenêtre de corrélation extraite de l’image primaire conserve sa taille d’origine mais la dilatation s’effectue sur la fenêtre de l’image secondaire. La technique utilisée est présentée sur la figure 5.4. Pour une fenêtre de corrélation donnée, la dilatation consiste dans un premier temps à extraire une partie de cette fenêtre. Dans un deuxième temps, la fenêtre est interpolée afin de générer une dernière fenêtre de même dimension que le motif d’origine afin de pouvoir réaliser l’opération de corrélation. Nous pouvons d’ores et déjà constater que

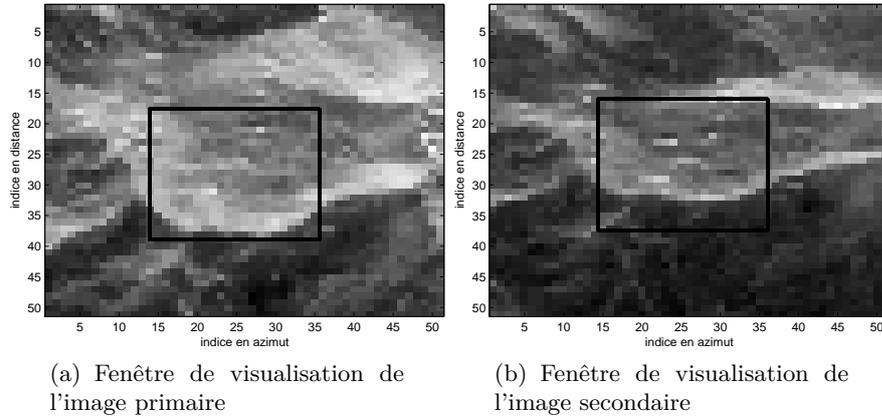


FIGURE 5.3 – Visualisation des deux fenêtres de corrélation pour un pixel dont l'appariement échoue.

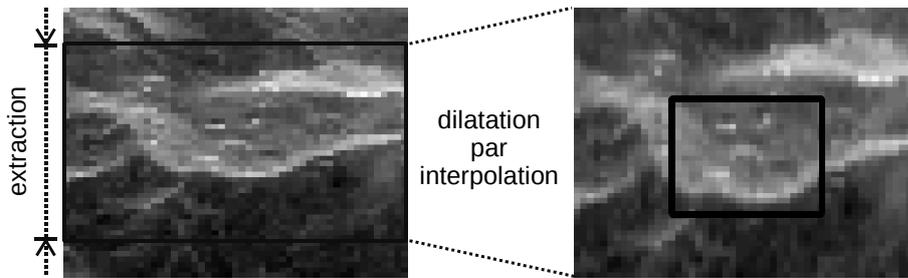


FIGURE 5.4 – Technique de dilatation en distance de la fenêtre de corrélation sur l'image secondaire.

la fenêtre de corrélation finale obtenue sur la figure 5.4 est beaucoup plus ressemblante à la fenêtre de corrélation de l'image primaire (figure 5.3).

Une inconnue subsiste concernant la valeur de la dilatation en distance la plus adaptée pour l'appariement de chaque pixel. En effet, nous n'avons aucune connaissance a priori sur la migration en distance d'une image à une autre puisque cette information est celle que nous cherchons à obtenir dans notre étude pour établir une carte de disparités. Nous estimons donc la déformation maximum possible d'une image à une autre. De manière similaire à l'estimation de h_{min} et h_{max} dans le paragraphe 4.3.2, l'estimation de la dilatation maximale d_{max} peut être imprécise mais une valeur trop élevée entraîne une augmentation du temps de calcul. Lorsque la valeur de d_{max} est fixée, l'appariement est effectué pour chaque taille de fenêtre dilatée comprise entre la taille d'origine $n \times m$ et $(n - d_{max}) \times m$, la dimension en azimut m restant constante. Ensuite, la fenêtre dilatée retenue est celle qui maximise le coefficient de corrélation. Dans le cadre de notre étude, nous fixons $d_{max} = 12$ pour toute la zone d'étude. Reprenons le pixel exemple dont le profil de corrélation pour une fenêtre 23×23 pixels avec la méthode classique est visible sur la figure 5.5(a). L'utilisation de la technique de dilatation en distance de la fenêtre de corrélation révèle que la taille de fenêtre maximisant le coefficient de corrélation est de 23×13 pixels, soit une dilatation $d_i = 10$. L'appariement effectué pour cette taille de fenêtre permet alors

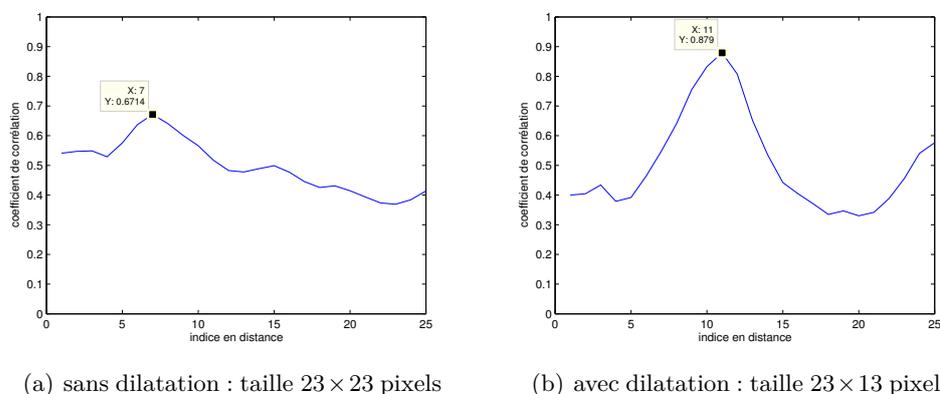


FIGURE 5.5 – Méthode 2 : profils de coefficients de corrélation, sans et avec dilatation de la taille de fenêtre, pour le pixel exemple.

d’aboutir au profil de corrélation présenté sur la figure 5.5(b).

Nous constatons une amélioration sensible de la localisation du pic de corrélation car nous avons un maximum de valeur 0.88 pour l’indice 11 en distance, au lieu de 0.67 pour l’indice 7 en distance. L’erreur de reconstruction sur le MNT est alors de 38 mètres. Ainsi, d’une part, la méthode de dilatation en distance de la taille de fenêtre a permis de localiser au mieux le pixel homologue. D’autre part, la valeur du maximum des coefficients de corrélation est augmentée. La confiance accordée à la mise en correspondance est alors améliorée et l’appariement s’en trouve fiabilisé. Les résultats de cette méthode appliquée à la reconstruction du MNT de la zone d’étude sont présentés dans le paragraphe 5.3.1.

5.2.3 Méthode 3 : combinaison des méthodes 1 et 2

Nous avons détaillé deux méthodes de base multi-fenêtre contribuant à l’amélioration de la mise en correspondance. Nous allons maintenant tirer profit de ces deux méthodes et les combiner afin d’aboutir à une troisième méthode.

Revenons sur les profils de corrélation présentés sur la figure 5.1. Quand nous regardons chaque profil, nous constatons que cette corrélation pour les différentes tailles de fenêtres génère des résultats contradictoires. Par exemple, pour la fenêtre 23×23 pixels, le maximum du coefficient de corrélation est situé à l’indice 7 en distance tandis que pour la fenêtre 7×7 pixels, le maximum est situé à l’indice 10 en distance. La méthode 1 effectue un produit de ces surfaces de corrélation à partir d’informations non optimales. Nous allons donc corriger ces informations en appliquant la méthode 2 pour différentes tailles m de fenêtres en azimuth. Dans notre cas, la valeur de m est fixée à 23, 19, 13 ou 7 pixels. Pour chacune de ces valeurs de m , la taille n en distance est variable. Pour chaque taille m , la fenêtre dilatée optimale est celle qui maximise le coefficient de corrélation. L’utilisation de la technique de dilatation en distance de la fenêtre de corrélation permet alors d’aboutir aux profils de corrélation présentés sur la figure 5.6, à comparer avec les profils de la méthode 1 sur la figure 5.1. Nous constatons une amélioration sensible de la localisation du pic de corrélation pour toutes les tailles de fenêtre. En effet, d’une part, le maximum des coefficients de

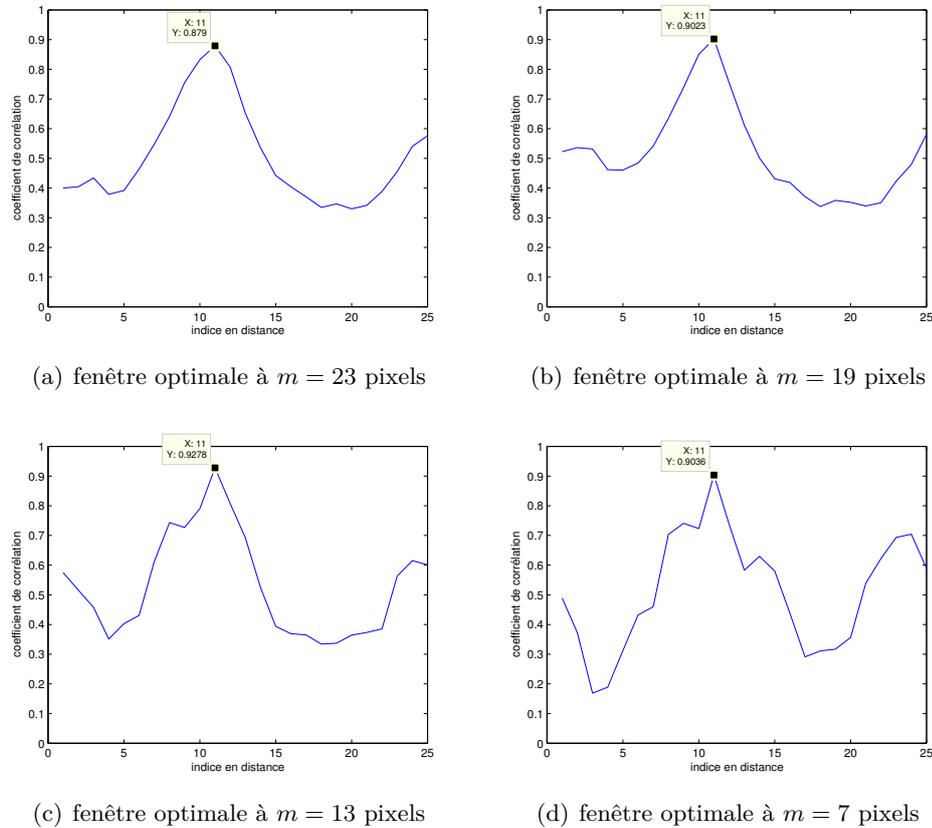


FIGURE 5.6 – Méthode 3 : profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple.

corrélation est toujours situé à l'indice 11 en distance donc les résultats pour chaque taille m sont en accord. D'autre part, la valeur des maximums est réhaussée : elle est maintenant de 0.88 à 0.93 au lieu de valeurs allant de 0.66 à 0.80. La confiance accordée à la mise en correspondance est alors augmentée et l'appariement s'en trouve fiabilisé.

Ensuite, nous conservons la méthode 1 pour déterminer le pixel homologue par multiplication des différentes surfaces (ou profils) de corrélation. La multiplication des 4 profils de corrélation de la figure 5.6 génère le profil visible sur la figure 5.7. En conséquence, le produit des différentes profils de corrélation aboutit à un résultat sans ambiguïté : il existe un pic bien défini pour l'indice 11 en distance, de valeur 0.66. Avec l'application de la méthode 1 sans dilatation en distance (figure 5.2), le pic est plus large et le maximum a une plus faible valeur : 0.22. La combinaison des deux méthodes 1 et 2 permet donc de fiabiliser l'étape de corrélation. Les résultats de cette combinaison appliquée à la reconstruction du MNT de la zone d'étude sont présentés dans le paragraphe 5.3.1.

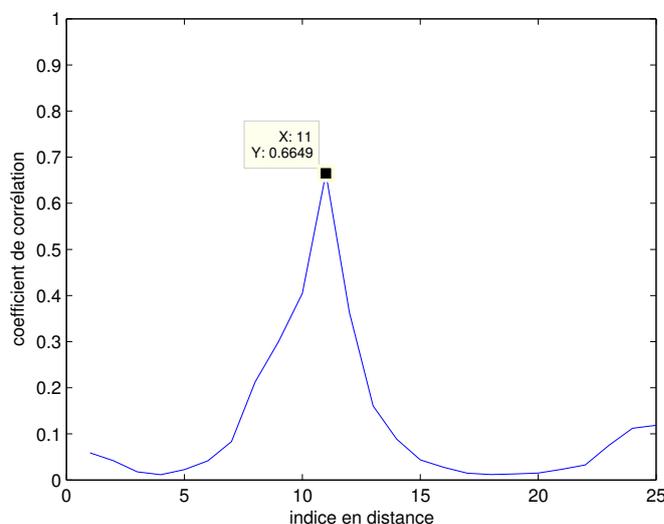


FIGURE 5.7 – Méthode 3 : produit des profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple.

5.3 Application des méthodes à l'étape 1 multi-échelle

Nous avons présenté trois méthodes différentes, dont le but est d'améliorer la reconstruction altimétrique. Pour chaque méthode, nous avons étudié un pixel exemple et nous avons montré de quelles façons ces méthodes fiabilisent la mise en correspondance. Nous allons maintenant individuellement appliquer ces méthodes à la zone d'étude entière, afin d'observer les améliorations sur la précision du MNT. Les méthodes décrites sont appliquées lors de la première étape multi-échelle uniquement. En effet, lors de cette étape initiale la zone de recherche est bornée en distance grâce à l'estimation des altitudes h_{min} et h_{max} , comme nous l'avons signalé dans le paragraphe 4.3.2. La recherche est donc limitée à 25 pixels en distance. Pour les étapes suivantes, la zone de recherche est plus restreinte : seulement 3 pixels en distance autour du pixel à apparier. Les erreurs de reconstruction altimétriques supérieures à 200 mètres sont ainsi généralement issues d'un mauvais appariement pendant la première étape. En effet, pour les étapes suivantes, la tolérance en distance de 3 pixels ne permet pas un tel écart de reconstruction lorsque la disparité calculée à l'étape précédente est correcte. Ainsi, nous concentrons donc d'abord les améliorations sur l'étape 1 car l'objectif de cette étape est d'obtenir une carte de disparité grossière, mais sans erreur de localisation (au maximum 1 pixel d'erreurs sur la disparité).

Dans un premier temps, nous présentons les résultats obtenus à l'étape 1 du traitement multi-échelle. Dans un deuxième temps, les résultats de la carte de disparités de l'étape 1 sont transmis aux étapes suivantes pour obtenir un MNT à la résolution optimale. Lors de ces étapes ultérieures, la mise en correspondance est effectuée par la méthode classique, avec une taille unique de fenêtre de 23×23 pixels.

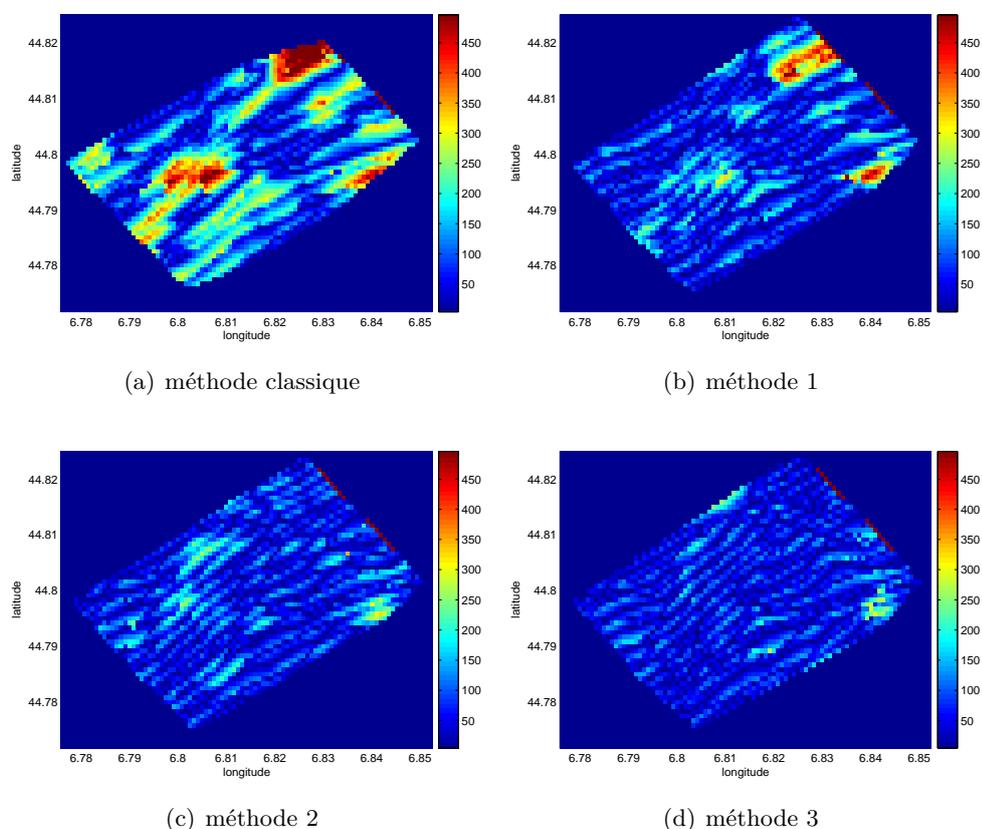


FIGURE 5.8 – Erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape 1 du traitement multi-échelle.

5.3.1 Résultats obtenus à l'étape 1

À cette étape, une carte de disparités de résolution identique à celle des images est générée. À partir de cette carte, nous générons le MNT correspondant. Les erreurs de reconstruction de ces MNT générés avec chacune des méthodes sont calculées en faisant la différence entre chaque MNT généré et le MNT SRTM de la zone d'étude. Ces erreurs sont présentées sous la forme de cartes visible sur la figure 5.8. Le tableau 5.1 expose la synthèse de ces différents résultats, en indiquant les pourcentages d'erreurs ainsi que l'erreur moyenne.

L'analyse de ces résultats permet de conclure que chacune des nouvelles méthodes (1 à 3) permet une nette amélioration de la précision du MNT à l'étape 1 du traitement multi-échelle, par rapport à la méthode classique. Les méthodes 2 et 3 sont toutefois plus efficaces que la méthode 1. En effet, pour la méthode 1 nous obtenons 91.2% de points dont l'erreur altimétrique est inférieure à 200 mètres tandis que pour les méthodes 2 et 3, cette valeur est respectivement portée à 97.4% et 98.6%. De plus, l'observation de la figure 5.8 permet de constater que pour les méthodes 2 et 3, il n'y a aucun point dont l'erreur altimétrique est supérieure à 300 mètres ce qui n'est pas le cas de la méthode classique ou de la méthode 1. L'utilisation d'une technique de dilatation de la taille de fenêtre de corrélation nous semble donc prometteuse pour

| type de méthode | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | |
|-----------------|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| classique | 7.8 | 10.3 | 20.5 | 25.8 | 38.3 | 48.2 | 69.5 | 92.6 |
| méthode 1 | 15.4 | 9.9 | 37.4 | 24.7 | 66.4 | 46.0 | 91.2 | 71.3 |
| méthode 2 | 18.4 | 10.2 | 42.8 | 24.3 | 75.7 | 45.6 | 97.4 | 65.3 |
| méthode 3 | 21.8 | 10.0 | 51.2 | 24.2 | 83.9 | 42.6 | 98.6 | 55.2 |

TABLE 5.1 – Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape 1.

| type de méthode | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | |
|-----------------|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| classique | 27.6 | 9.8 | 51.1 | 22.5 | 80.0 | 36.1 | 93.8 | 50.9 |
| méthode 1 | 28.4 | 9.8 | 58.7 | 22.5 | 82.0 | 36.0 | 95.1 | 49.6 |
| méthode 2 | 28.6 | 9.7 | 59.4 | 22.6 | 82.4 | 35.8 | 96.1 | 50.0 |
| méthode 3 | 28.2 | 9.7 | 58.7 | 22.6 | 82.0 | 36.2 | 95.8 | 50.5 |

TABLE 5.2 – Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape finale (méthodes différentes pour l'étape 1 et méthode classique pour les étapes 2 et 3).

améliorer la reconstruction du MNT à l'étape finale.

5.3.2 Résultats obtenus à l'étape finale

Nous avons observé les résultats obtenus à l'étape 1 du traitement multi-échelle. Ces résultats sont donc obtenus pour des images dégradées d'un facteur 4 par rapport aux images radar d'origine. Les résultats de la carte de disparités de l'étape 1 sont maintenant transmis aux étapes suivantes (2 et 3) pour obtenir un MNT à la résolution optimale. La méthode utilisée pour la mise en correspondance lors de ces étapes ultérieures est la méthode classique, avec une taille de fenêtre de corrélation de 23×23 pixels. Ainsi, nous pourrions déterminer si l'amélioration de la précision à la première étape se répercute à l'étape finale du traitement multi-échelle. Les erreurs de reconstruction des MNT générés avec chacune des méthodes sont présentées sur la figure 5.9 et le tableau 5.2.

Une fois de plus, nous constatons que les nouvelles méthodes (1 à 3) appliquées à l'étape 1 permettent une amélioration de la précision du MNT obtenu à l'étape finale du traitement multi-échelle, par rapport à la méthode classique. De plus, les méthodes 2 et 3 sont plus efficaces que la méthode 1. Toutefois, ces améliorations ne sont pas aussi significatives que celles obtenues à l'étape 1 du traitement multi-échelle. En effet, pour la méthode classique, nous obtenons 93.8% de points dont l'erreur altimétrique est inférieure à 200 mètres tandis que pour les méthodes 1 à 3, cette valeur est comprise entre 95.1% et 96.1%. La différence est minime et nous en déduisons que le traitement multi-échelle induit une « convergence » des résultats. Pour la méthode classique et la méthode 1, le traitement multi-échelle est bénéfique car il permet de corriger la plupart des erreurs de reconstruction. Par exemple, pour la méthode 1, le taux de points dont l'erreur altimétrique est inférieure à 200 mètres passe de 69.5% pour l'étape 1 à 93.8%

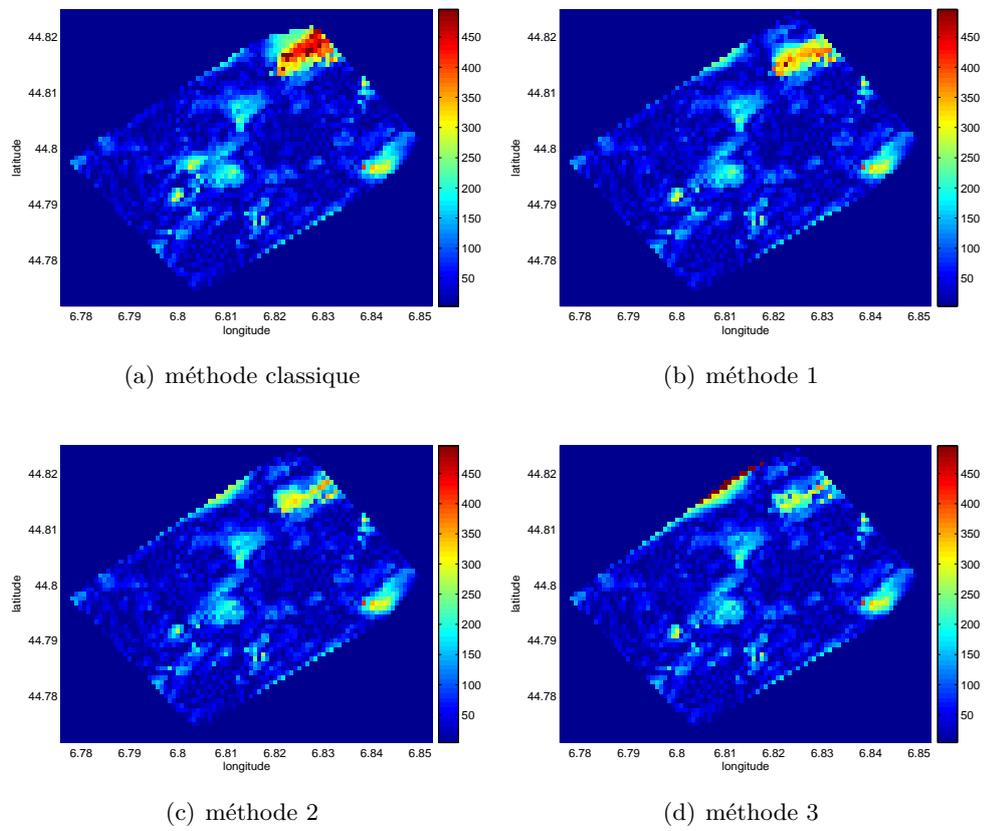


FIGURE 5.9 – Erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape finale du traitement multi-échelle (méthodes différentes pour l'étape 1 et méthode classique pour les étapes 2 et 3).

pour l'étape finale. En revanche, pour les méthodes 2 et 3, le traitement multi-échelle dégrade la précision des résultats. Par exemple, pour la méthode 2, le taux de points dont l'erreur altimétrique est inférieure à 200 mètres passe de 97.4% pour l'étape 1 à 96.1% pour l'étape finale.

Malgré ces améliorations minimes sur les pourcentages d'erreur, nous notons quand même une diminution globale de l'erreur moyenne ϵ_{moy} . Pour les pixels dont l'erreur altimétrique est inférieure à 200 m, ϵ_{moy} est d'environ 50 mètres pour l'étape finale quelque soit la méthode, tandis que pour l'étape 1, sa valeur variait entre 55.2 m et 71.3 m selon la méthode utilisée (1 à 3).

5.3.3 Bilan sur les résultats

L'application des méthodes multi-fenêtres à l'étape 1 du traitement multi-échelle permet une amélioration de la reconstruction altimétrique. Les résultats sont sensiblement améliorés pour les cartes de disparités et les MNT intermédiaires générés à l'étape 1, comme indiqué dans le paragraphe 5.3.1. L'étude permet également de mettre en évidence la supériorité de la méthode 2 qui effectue une dilatation de la fenêtre de corrélation, par rapport à la méthode 1 qui effectue le produit des coefficients de corrélation. La méthode 3 qui combine les avantages de ces deux méthodes améliore encore la précision des résultats par rapport à la méthode 2. Par contre, l'étude menée dans le paragraphe 5.3.2 montre que les résultats finaux sont similaires, quelque soit la méthode utilisée pour la mise en correspondance lors de l'étape 1 du traitement multi-échelle. Toutefois nous constatons une légère supériorité des méthodes 2 et 3 par rapport à la méthode 1 et la méthode classique. Malgré ces résultats encourageants, nous sommes encore éloignés de notre objectif, qui est l'obtention de 95% de points comprenant une erreur de reconstruction inférieure à 100 mètres, car la meilleure valeur que nous obtenons ici est de 82.4% pour la méthode 2. Nous allons donc également appliquer les méthodes multi-fenêtre aux étapes suivantes du traitement multi-échelle au lieu de nous limiter à l'étape 1.

5.4 Application des méthodes sur toutes les étapes multi-échelle

L'application des méthodes multi-fenêtre à l'étape 1 ne suffit pas à obtenir des résultats avec la précision souhaitée, soit 95% de points comprenant une erreur de reconstruction inférieure à 100 mètres. Nous allons donc utiliser ces méthodes également lors des étapes suivantes du traitement multi-échelle. Pour la première étape, nous utilisons dans tous les cas la méthode 3 car elle génère les meilleurs résultats en terme de précision (tableau 5.1). Pour les étapes suivantes, la méthode diffère afin d'étudier l'influence de chacune des étapes sur les résultats finaux. Les erreurs de reconstruction des MNT générés avec chacune des méthodes sont présentées sur la figure 5.10 et le tableau 5.3.

Ces nouveaux résultats mettent en évidence l'intérêt d'appliquer les méthodes multi-fenêtre à l'appariement sur toutes les étapes du traitement multi-échelle. La méthode 2 est ici la plus efficace sur les étapes 2 et 3. La combinaison de méthodes qui donne les meilleurs résultats est donc l'application de la méthode 3 pour l'étape 1

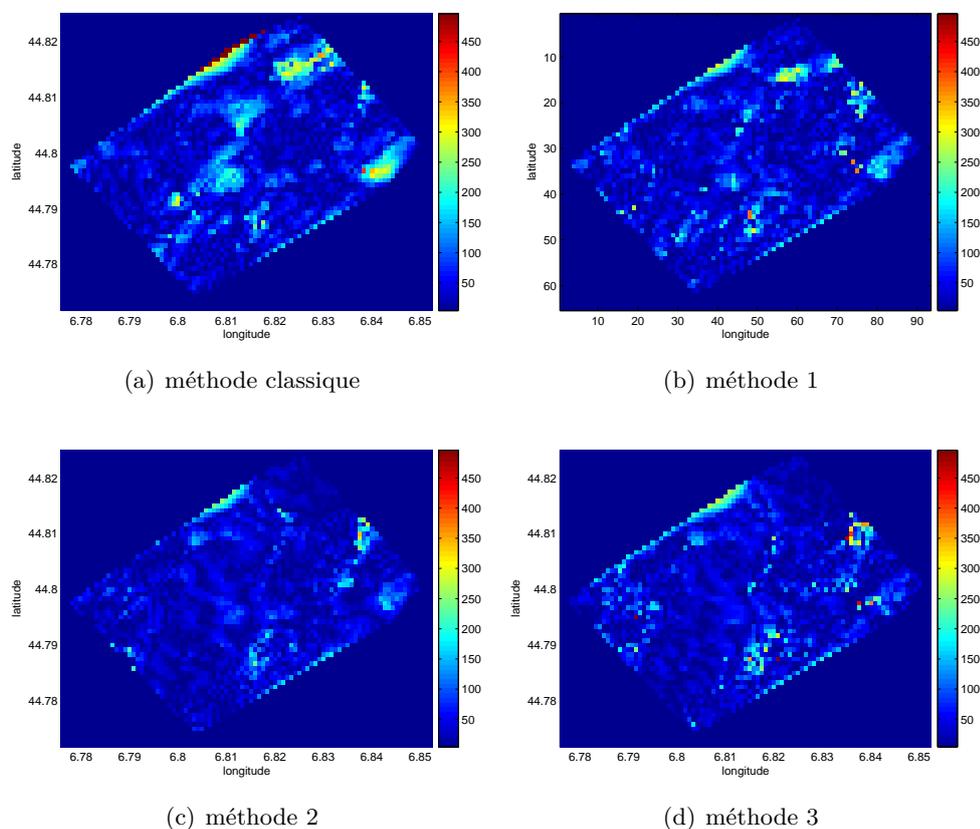


FIGURE 5.10 – Erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape finale du traitement multi-échelle (méthode 3 utilisée pour l'étape 1 et méthodes différentes pour les étapes suivantes).

| type de méthode | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | |
|-----------------|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| classique | 28.2 | 9.7 | 58.7 | 22.6 | 82.0 | 36.2 | 95.8 | 50.5 |
| méthode 1 | 31.1 | 9.7 | 66.8 | 22.9 | 88.4 | 34.2 | 98.0 | 44.3 |
| méthode 2 | 39.3 | 9.6 | 77.8 | 21.1 | 94.4 | 29.2 | 99.4 | 34.5 |
| méthode 3 | 36.1 | 9.6 | 72.7 | 21.5 | 91.0 | 30.8 | 98.1 | 38.5 |

TABLE 5.3 – Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape finale (méthode 3 utilisée pour l'étape 1 et méthodes différentes pour les étapes suivantes).

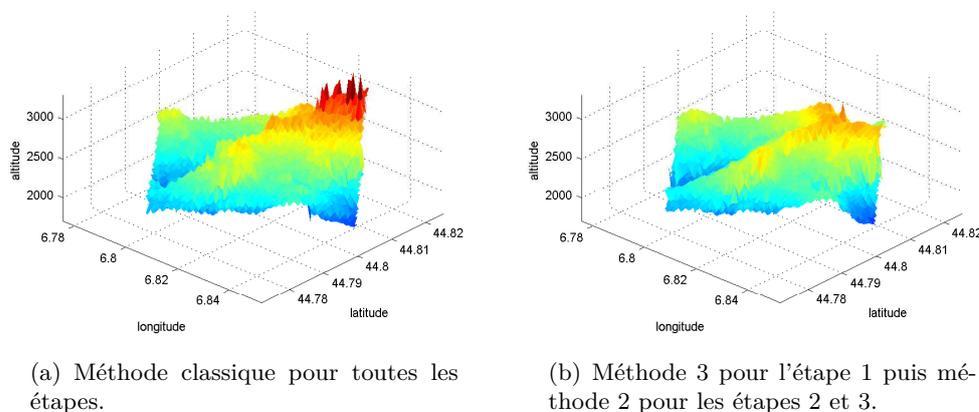


FIGURE 5.11 – MNT générés à la résolution SRTM - vue 3D.

du traitement puis celle de la méthode 2 pour les étapes 2 et 3.

Ces deux méthodes utilisent une technique de dilatation de la fenêtre de corrélation. Cette technique nous semble donc indispensable pour assurer un bon appariement sur des images ROS. Ainsi, nous obtenons un MNT dont 94.4% des points subissent une erreur de reconstruction inférieure à 100 mètres. L'erreur moyenne est égale à 35 mètres dans cette configuration. Le MNT généré est visible sur la figure 5.11(b), en comparaison avec le MNT généré à la fin du chapitre précédent, figure 5.11(a) où la méthode classique est appliquée sur toutes les étapes multi-échelle. Ce MNT est fidèle par rapport à la réalité mais il souffre de quelques artefacts (notamment un pic sans réalité physique derrière la crête, dans le coin supérieur droit) que nous proposons de corriger dans la suite de ce manuscrit.

5.5 Améliorations finales

Dans le paragraphe 5.4, nous indiquons que la combinaison de méthodes donnant les meilleurs résultats est donc

1. la méthode 3 pour l'étape 1 du traitement multi-échelle,
2. puis la méthode 2 pour les étapes suivantes.

Ainsi, le MNT généré est fidèle à la réalité car il comporte 94.4% de points dont l'erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres. Toutefois, ce MNT est altéré par quelques erreurs locales.

Après analyse, nous constatons que les cartes de disparités générées à chaque étape manquent de régularité. En effet, nous observons quelques variations importantes de disparités entre pixels voisins entraînant alors des erreurs importantes de reconstruction altimétrique sans réalité physique. Nous nous attachons donc à assurer une certaine régularité dans les cartes de disparités. Par exemple, dans ses travaux basés sur une optimisation par la méthode Tabou, [56] plusieurs critères dont une mesure du gradient de disparité, sont utilisés afin de quantifier les variations locales de cette disparité. Nous proposons ici une méthode qui consiste à obtenir une précision sub-pixellique lors de l'appariement puis à filtrer les cartes de disparités. Comme nous

l'avons expliqué dans le paragraphe 5.3, il est important de concentrer les améliorations sur l'étape 1. C'est pourquoi nous présentons dans un premier temps les résultats à l'issue de la première étape du traitement multi-échelle, puis les résultats à l'issue de l'étape finale.

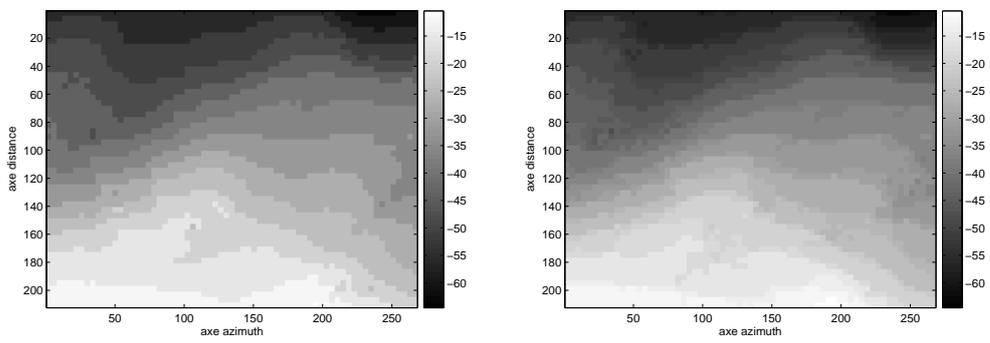
5.5.1 Résultats à l'étape 1 (résolution SRTM)

La carte de disparités générée à l'étape 1 est de précision grossière. Elle a l'avantage de fournir une disparité approximative, qui sert d'initialisation pour limiter la zone de recherche lors des étapes suivantes. Pour les images en basse résolution de l'étape 1, les disparités sont calculées au pixel près. Quand on passe à l'étape suivante, la résolution est multipliée par deux, ainsi que les disparités. Pour l'étape 3, la précision initiale donnée au pixel près est alors équivalente à une précision à quatre pixels près. Sur la figure 5.12(a), nous présentons la carte de disparités générée à l'étape 1, mais sur-échantillonnée pour coïncider à la résolution de l'étape finale. Nous constatons alors l'inconvénient majeur de cette carte de disparités : elle manque de régularité car elle présente des sauts de disparités (discontinuités de type « marche d'escalier »). L'initialisation de la zone de recherche pour les étapes suivantes n'est pas donc optimale : les écarts de disparité dus aux sauts de disparités puis transmis aux étapes suivantes, peuvent conduire à une divergence des résultats pour des pixels voisins.

Nous allons améliorer la précision de la carte de disparités en utilisant une résolution sub-pixellique (par rapport à l'étape 1) et en adoptant un nouveau critère de confiance pour l'appariement.

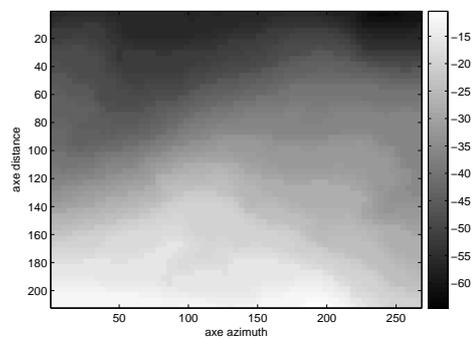
Jusqu'à présent, nous avons toujours utilisé l'indice en distance du maximum des coefficients de corrélation pour déterminer la disparité. Cette disparité est donc un nombre entier, résultat de la différence d'indices en distance entre les deux images. Prenons l'exemple d'un pixel dont les profils de corrélation sont présentés sur la figure 5.13 et le produit de ces profils sur la figure 5.14. L'indice en distance retenu est l'indice 5 car il correspond au maximum des produits des coefficients de corrélation. Maintenant, nous décidons de prendre également en compte les indices en distance des maximums de coefficients de corrélation pour chaque taille m de fenêtre en azimut. Pour notre exemple, nous avons un indice en distance égal à 4 pour $m = 23$ et $m = 19$ mais aussi un indice en distance égal à 5 pour $m = 13$ et $m = 7$. Dans ces conditions, il est difficile de choisir le bon indice car il y a autant de fenêtres favorables à l'indice 4 que de fenêtres favorables à l'indice 5. Nous effectuons alors la moyenne de ces indices et nous obtenons alors un indice de résolution sub-pixellique égal à 4,5. Cette méthode calcule la moyenne uniquement si les indices obtenus pour les 4 tailles m de fenêtre sont en accord avec l'indice obtenu pour le produit des coefficients, ce qui évite de faire la moyenne entre des indices de valeurs trop différentes. Nous définissons alors un critère de validité : l'appariement est validé seulement si les indices propres à chaque taille m de fenêtre sont égaux à l'indice du produit des coefficients à un pixel près, et cela pour au minimum 3 tailles m de fenêtres sur 4. Le critère de confiance peut donc s'énoncer en se basant sur le critère de validité de la manière suivante :

- si le critère est respecté pour les 4 tailles de fenêtre, nous pouvons accorder une confiance maximum à l'appariement,
- si le critère est respecté pour 3 tailles de fenêtre, nous pouvons accorder une bonne confiance à l'appariement,



(a) carte initiale, avec indices entiers

(b) carte améliorée, avec résolution sub-pixellique



(c) carte améliorée puis filtrée

FIGURE 5.12 – Evolution des cartes de disparités, pour l'étape 1 du traitement multi-échelle

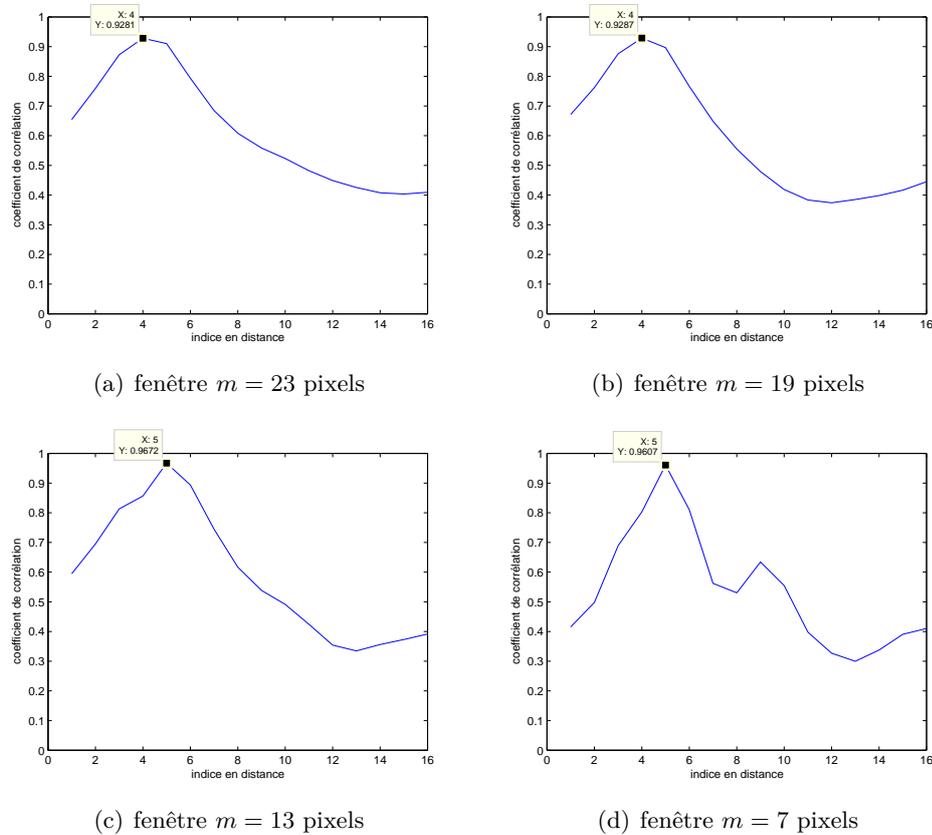


FIGURE 5.13 – Profils de coefficients de corrélation pour un pixel exemple.

- si le critère n'est pas respecté, la moyenne des indices n'est pas calculée, la confiance accordée est faible et l'indice retenu est alors celui du maximum du produit des coefficients de corrélation.

Il convient de noter que ce dernier cas mérite de plus amples développements pour déterminer la disparité de manière plus fiable. Pour la zone d'étude concernée, la solution proposée (indice retenu comme étant le maximum du produit des coefficients de corrélation) est suffisante mais nous présenterons des pistes d'amélioration dans les perspectives.

La nouvelle méthode de détermination des indices en distance (calcul de la moyenne) est appliquée à la mise en correspondance de chaque pixel pour générer la carte de disparités de la figure 5.12(b). Nous constatons que l'utilisation d'une résolution sub-pixellique permet alors d'obtenir des valeurs intermédiaires de disparités par rapport à la carte de la figure 5.12(a), ce qui atténue le phénomène de marches d'escalier. Les répercussions sur la précision du MNT sont bénéfiques : en effet, les erreurs de reconstruction sont diminuées comme nous pouvons le constater sur le tableau 5.4, mais aussi en comparant les figures 5.15(a) et 5.15(b). Nous obtenons ainsi un gain d'environ 5% pour les pixels dont l'erreur altimétrique est inférieure à 100 mètres. De plus, l'erreur moyenne totale est passée de 56.9 mètres à 50.8 mètres soit une diminution d'environ 6 mètres.

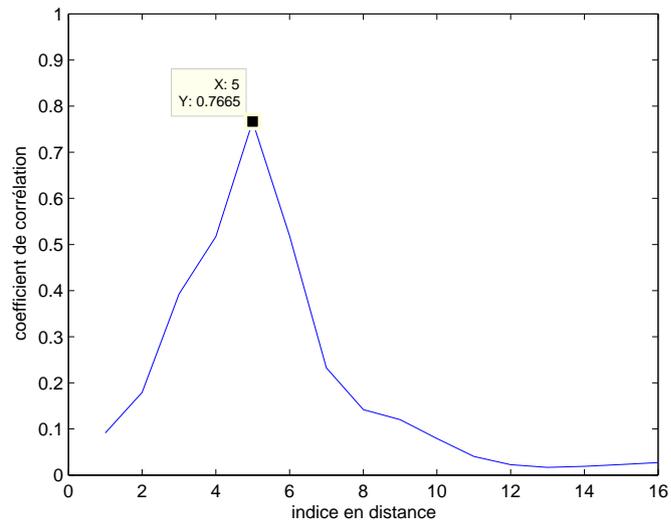
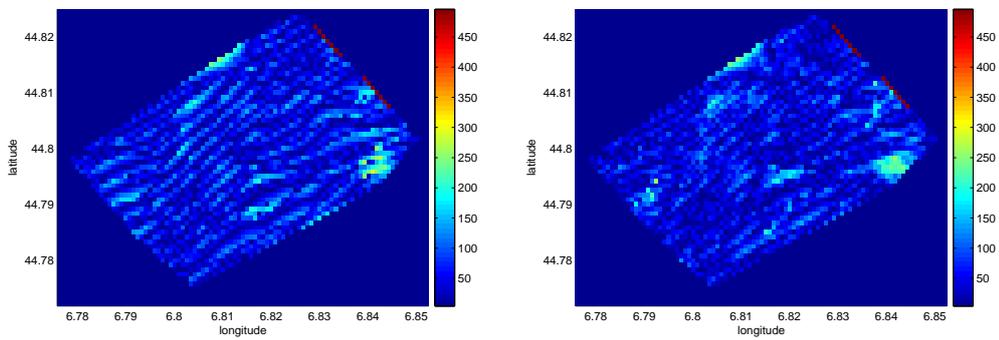


FIGURE 5.14 – Produit des profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple.

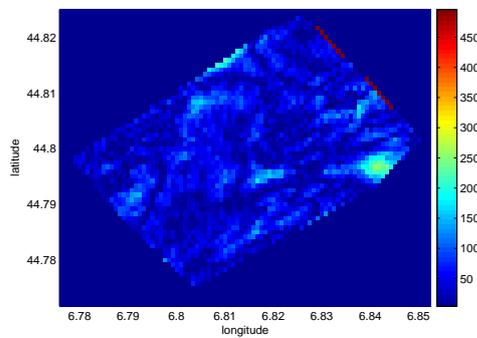
| type de carte | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | |
|---|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| carte initiale, avec indices entiers | 21.8 | 10.0 | 51.3 | 24.1 | 84.5 | 42.7 | 99.2 | 55.5 |
| carte améliorée, avec résolution sub-pixellique | 24.8 | 9.7 | 57.8 | 24.0 | 89.2 | 40.3 | 99.0 | 49.0 |

TABLE 5.4 – Pourcentage d’erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l’étape 1.



(a) carte initiale, avec indices entiers

(b) carte améliorée, avec résolution sub-pixellique



(c) carte améliorée puis filtrée

FIGURE 5.15 – Evolution des erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape 1 du traitement multi-échelle.

| type de carte | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | |
|--|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} |
| carte améliorée, avec résolution sub-pixellique | 24.8 | 9.7 | 57.8 | 24.0 | 89.2 | 40.3 | 99.0 | 49.0 |
| carte améliorée, puis filtrée | 29.1 | 9.7 | 63.9 | 23.3 | 92.7 | 37.6 | 99.4 | 43.8 |

TABLE 5.5 – Pourcentage d’erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l’étape 1.

Il est encore possible d’améliorer les résultats obtenus à l’étape 1 du traitement multi-échelle. Pour avoir une carte de disparités la plus régulière possible, nous la filtrons à l’aide d’un filtre passe-bas de Wiener. Ce type de filtre opère un filtrage adaptatif basé sur les statistiques estimées (moyenne et écart-type) pour le voisinage d’un pixel (taille du voisinage choisie : 3×3 pixels). L’intérêt du filtrage est double : il permet d’assurer la continuité des disparités en résolution sub-pixellique, mais il permet également de minimiser les erreurs résiduelles. Il est important de noter que le but de ce filtrage n’est pas de corriger les fortes erreurs d’appariement. En effet, cette correction des fortes erreurs est effectuée en amont lors de l’appariement grâce aux critères de confiance qui valident les indices en distance et donc les disparités associées. La carte de disparités améliorée de la figure 5.12(b) est ainsi filtrée pour aboutir à celle visible sur la figure 5.12(c). Cette carte améliorée puis filtrée est ainsi beaucoup plus régulière que la carte de disparités initiale. Les répercussions sur la précision du MNT sont également bénéfiques : les erreurs de reconstruction sont diminuées comme nous pouvons le constater sur le tableau 5.5, mais aussi en comparant les figures 5.15(b) et 5.15(c). Nous obtenons ainsi un gain de 2.5% pour les pixels dont l’erreur altimétrique est inférieure à 100 mètres. L’erreur moyenne est passée de 50.8 mètres à 44.9 mètres soit une diminution de 5.9 mètres.

Pour l’étape 1, si l’on dresse le bilan global des améliorations apportées par la résolution sub-pixellique et le filtrage, nous obtenons un gain de 8.2% pour les pixels dont l’erreur altimétrique est inférieure à 100 mètres. De plus l’erreur moyenne globale a été diminuée de 12 mètres, passant ainsi de 56.9 mètres à 44.9 mètres. Ce bilan est donc très positif et prometteur pour les résultats de l’étape finale. La carte de disparités présentée sur la figure 5.15(c) servira à l’initialisation de la zone de recherche pour les étapes suivantes. Comme nous avons assuré la régularité de cette carte, nous pouvons prévoir une diminution du nombre d’erreurs sur le MNT final.

5.5.2 Résultats à l’étape finale (résolution SRTM)

Les méthodes de calcul d’indices en distance en résolution sub-pixellique ainsi que le filtrage de la carte de disparités sont réitérées pour chaque étape du traitement multi-échelle afin de générer un MNT final dont nous comparons la précision de reconstruction avec le MNT généré dans le paragraphe 5.4. Les erreurs de reconstruction de ce MNT sont visualisées sur la figure 5.16(b) et nous les comparons avec la figure 5.16(a), qui reprend les meilleurs résultats obtenus précédemment (paragraphe 5.4). Ces erreurs sont synthétisées dans le tableau 5.6. Les améliorations apportées ne sont pas significatives pour le MNT généré à l’étape finale car le gain sur la minimisa-

| type de carte | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | | erreur maximum (m) |
|---------------------------|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|--------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | |
| mnt initial (tableau 5.3) | 39.3 | 9.6 | 77.8 | 21.1 | 94.4 | 29.2 | 99.4 | 34.5 | 337 |
| mnt amélioré, non filtré | 39.4 | 9.4 | 78.4 | 21.2 | 95.0 | 29.3 | 99.5 | 34.1 | 257 |

TABLE 5.6 – Pourcentage d’erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l’étape finale.

| type de carte | nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | | erreur maximum (m) |
|---------------------------|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|--------------------|
| | < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | | |
| | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | |
| mnt amélioré, non filtré | 39.4 | 9.4 | 78.4 | 21.2 | 95.0 | 29.3 | 99.5 | 34.1 | 257 |
| mnt amélioré, puis filtré | 46.1 | 9.6 | 86.2 | 20.1 | 97.9 | 25.6 | 100.0 | 27.5 | 166 |

TABLE 5.7 – Pourcentage d’erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l’étape finale.

tion des erreurs est inférieur à 1%. Toutefois, quelque soit le seuil altimétrique choisit (20m, 50m, 100m, 200m), nous constatons une amélioration de reconstruction et une diminution de l’erreur moyenne. Une autre information est à prendre en compte pour quantifier cette amélioration : l’erreur altimétrique maximum. En effet, cette erreur maximum est de 337 mètres avant amélioration et est maintenant réduite à 257 mètres.

Bien qu’amélioré, ce nouvel MNT généré (figure 5.17(a)), qui profite des méthodes de précision sub-pixellique et de filtrage des disparités, est très similaire au MNT généré précédemment (figure 5.11(b)). C’est pourquoi nous appliquons un filtrage sur ce MNT afin d’améliorer sa régularité. Le filtre utilisé est un filtre passe-bas de Wiener, strictement identique à celui utilisé pour le filtrage des disparités dans le paragraphe 5.5.1. Le résultat du filtrage aboutit au MNT présenté sur la figure 5.17(b). Les erreurs avec le MNT SRTM sont visibles sur la figure 5.16(c) puis synthétisées dans le tableau 5.7. Cette dernière opération de filtrage permet une nette amélioration du MNT. Les artefacts ont été éliminés, dont notamment l’artefact situé derrière la crête dans le coin supérieur droit. Ainsi, le maximum d’erreur de reconstruction est égal à 166 mètres. Le MNT ainsi corrigé est régulier et nous avons atteint l’objectif que nous nous étions fixé puisque nous obtenons 97.9% de points dont l’erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres. Nous rappelons que ces résultats sont obtenus pour une résolution planimétrique égale à celle du MNT SRTM, soit une précision de 90 mètres en longitude et en latitude.

5.5.3 Résultats à l’étape finale (résolution améliorée)

La résolution du MNT STRM est très bonne en altitude (16 mètres) mais la résolution planimétrique est médiocre (93 mètres). Or, comme nous l’expliquons dans le paragraphe 4.5.1, le MNT brut que nous générons à partir de la carte de disparités a subi une opération de maillage, afin de correspondre à la même grille régulière en longitude et latitude du MNT obtenu avec les données SRTM. Nous estimons en

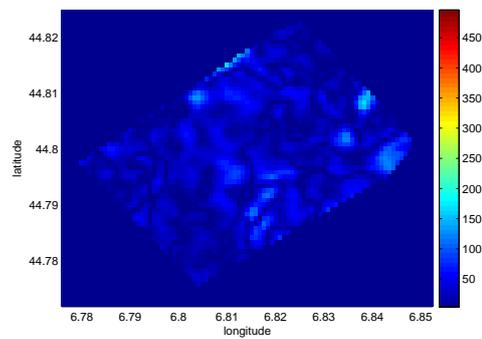
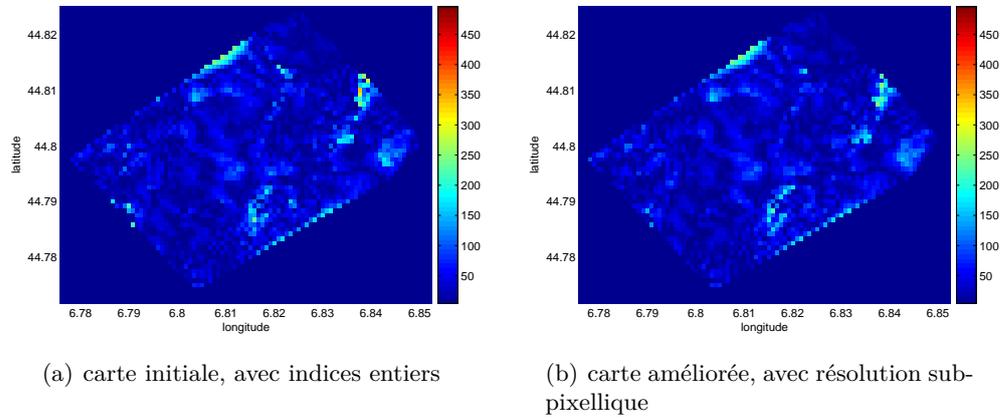


FIGURE 5.16 – Evolution des erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape finale du traitement multi-échelle.

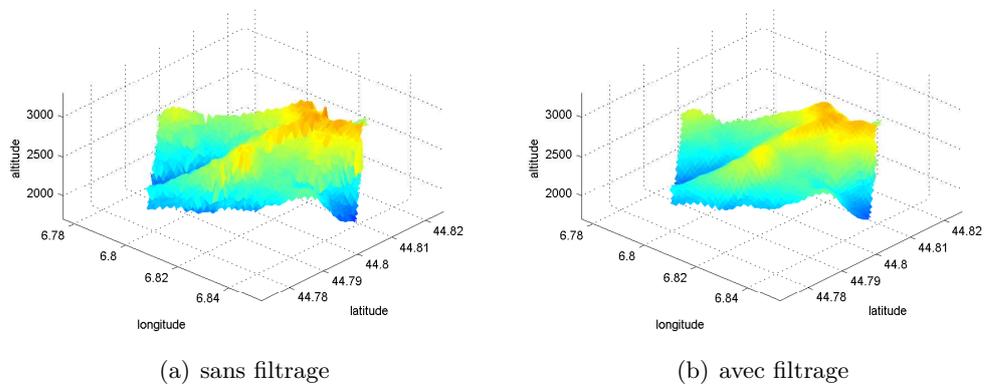


FIGURE 5.17 – MNT générés à la résolution SRTM - vue 3D.

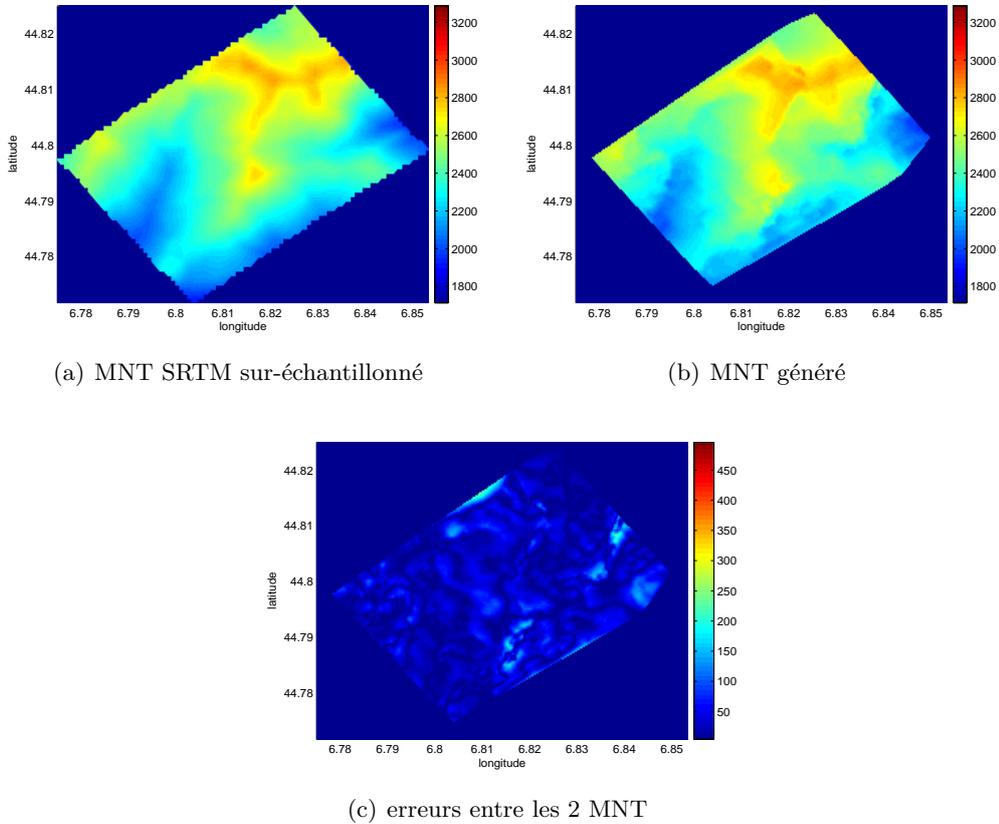
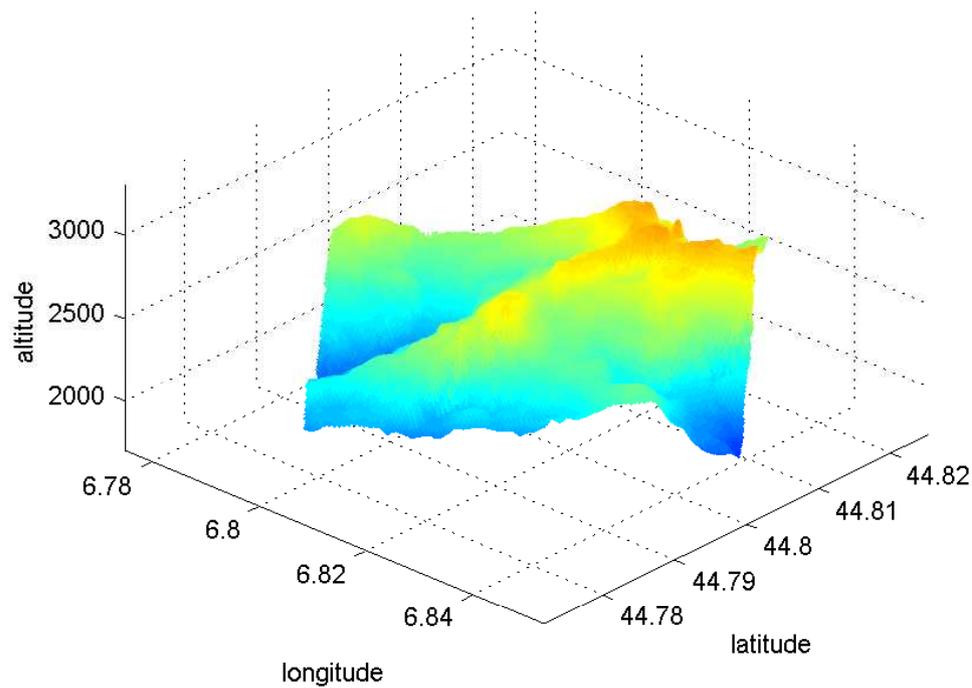


FIGURE 5.18 – Comparaison entre le SRTM sur-échantillonné à la résolution 30×30 mètres et le MNT généré

moyenne que 23 points du MNT brut sont utilisés pour déterminer un seul point du MNT échantillonné à la résolution SRTM. Pour chaque point du MNT échantillonné, l'opération de maillage effectue une moyenne à partir de plusieurs informations de disparités des 23 points mais la précision planimétrique est dégradée.

Nous proposons alors de sur-échantillonner le MNT SRTM afin d'avoir une grille régulière plus précise et d'obtenir une résolution approximative de 30×30 mètres au sol, en longitude et en latitude. Le MNT SRTM ainsi sur-échantillonné est présenté figure 5.18(a), en comparaison avec le MNT que nous générons avec toutes les améliorations possibles (multi-échelle, filtrage des disparités et du MNT final) et présenté figure 5.18(b). Ce MNT est également visible en vue 3D sur la figure 5.19. Les erreurs entre ces deux MNT sont visibles figure 5.18(c), puis récapitulées dans le tableau 5.8.

Les résultats pour la résolution 30×30 mètres montrent un MNT légèrement dégradé par rapport à celui généré pour la résolution SRTM. Effectivement, la résolution finale du MNT SRTM et du MNT généré étant améliorée d'un facteur 3 en azimut et en distance, le nombre de points du MNT brut utilisés pour déterminer un point du MNT échantillonné passe de 23 points à 2,5 points (environ $23/9$). Ainsi, les pixels erronés ont une influence plus importante sur le MNT final dans le cas de la résolution améliorée que dans le cas de la résolution SRTM. Toutefois, sur ce nouvel MNT nous

FIGURE 5.19 – MNT généré à la résolution 30×30 mètres - vue 3D.

| nombre de points avec une erreur altimétrique | | | | | | | | erreur maximum (m) |
|---|------------------|--------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|-----------------------|
| < 20 m | | < 50 m | | < 100 m | | < 200 m | | |
| % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | % | ϵ_{moy} | |
| 42.8 | 9.8 | 82.5 | 20.7 | 96.6 | 27.4 | 99.9 | 31.0 | 243 |

TABLE 5.8 – Pourcentage d’erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur le MNT généré à l’étape finale.

obtenons 96.6% de points dont l'erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres, ce qui est conforme à nos objectifs. En revanche, l'erreur altimétrique maximum est passée à 243 mètres et nous remarquons que l'artefact situé derrière la crête dans le coin supérieur droit est de nouveau présent.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu démontrer l'intérêt d'utiliser plusieurs tailles $m \times n$ de fenêtres de corrélation pour fiabiliser l'appariement. D'une part, la variation de la dimension m en azimuth permet de diversifier les motifs de corrélation afin d'obtenir des informations supplémentaires. Ces informations sont exploitées en effectuant le produit des surfaces de corrélation. La valeur maximum de la nouvelle surface de corrélation obtenue sert alors à déterminer le pixel homologue. D'autre part, la dilatation de la dimension n en distance permet de compenser le phénomène de compression d'une image à l'autre. Cette méthode de dilatation nous semble donc indispensable pour effectuer une mise en correspondance sur des images ROS. Ainsi, la méthode d'appariement tirée de la photogrammétrie en imagerie optique est optimisée pour travailler sur des images radar. Les résultats obtenus à partir de ces nouvelles méthodes sont satisfaisants mais nécessitent quelques corrections. Ces corrections sont alors apportées par une amélioration de la régularité des cartes de disparités à chaque étape du traitement multi-échelle. Cette régularité est obtenue grâce à la détermination sub-pixellique de l'indice de disparité puis à un filtrage de la carte de disparités. Enfin, un filtrage sur le MNT généré permet une dernière amélioration des résultats afin d'obtenir un MNT régulier et précis en altimétrie. Nous avons également généré un MNT de meilleure résolution planimétrique que la résolution SRTM et nous constatons dans ce cas que l'amélioration de localisation au sol se fait au détriment de la résolution altimétrique. La précision est toutefois satisfaisante car nous obtenons ainsi 96.6% de points dont l'erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres, avec une erreur maximum de localisation égale à 243 mètres en altitude. De même, les écarts-types associées aux erreurs sont inférieures à 31 mètres pour l'ensemble de la zone d'étude. À titre de comparaison, pour des conditions similaires de prise de vue, nous obtenons des résultats équivalents à ceux décrits dans [74, 75, 76] en termes d'écart-type. Enfin, nous retrouvons des résultats similaires à ceux présentés dans [77] pour des conditions plus favorables à l'appariement (angle d'intersection d'environ 4 à 8 degrés et résolution des images de l'ordre de 10 mètres) et pour des régions à fort relief.

Il faut noter que dans ce paragraphe, nous avons abordé pour chaque pixel apparié la notion de confiance à l'appariement. Nous pouvons ainsi détecter un appariement douteux. Toutefois, nous n'avons pas développé de méthode spécifique pour traiter cet appariement non validé puisque, dans ce cas, nous conservons la disparité calculée à partir du produit des surfaces de corrélation. Nous discuterons dans les perspectives de pistes de développement pour traiter ces appariements douteux.

Conclusion

Rappel du contexte

Les travaux présentés dans ce mémoire sont consacrés à la génération de Modèles Numériques de Terrain à partir d'images radar obtenues par synthèse d'ouverture : les images ROS. Ce traitement particulier est appelé la radargrammétrie en référence avec la photogrammétrie qui consiste aussi à restituer la réalité en trois dimensions à partir de deux images optiques d'une même scène mais obtenues sous des angles de prise de vue différents. Ainsi, la radargrammétrie utilise en entrée deux images radar de la même zone mais enregistrées avec des angles d'incidence différents. Notre travail repose sur l'exploitation d'images stéréoscopiques SIR-C (images radar satellitaires) obtenues sur une zone montagneuse des Alpes françaises. Ce type de zone présente un double intérêt. D'une part, nous pouvons exploiter les informations de cartes IGN disponibles afin de fournir les vérités terrain de points d'amer. D'autre part, nous pouvons mettre en place un traitement radargrammétrique suffisamment robuste pour des zones montagneuses dont la géométrie induit de nombreuses déformations lors de la formation d'une image radar.

Travaux effectués

Dans un premier temps, après des chapitres d'introduction permettant de présenter le contexte de la reconstruction altimétrique et la précision attendue, nous avons décrit l'ensemble des étapes constituant une chaîne radargrammétrique, à savoir :

- la description géométrique de la prise de vue. Cette étape est déterminante quant à la précision de la reconstruction du MNT. En effet, la géométrie de prise de vue associée à l'évaluation de trajectoire des satellites permet de relier chaque pixel d'une image radar à une coordonnée terrestre (ici décrite avec la valeur d'une latitude et d'une longitude). De plus, cette relation entre les coordonnées images et les coordonnées terrestres est primordiale pour l'évaluation de courbes épipolaires qui sont d'une grande utilité pour limiter la zone de recherche lors de l'étape d'appariement,
- l'appariement ou mise en correspondance par corrélation est le coeur de la radargrammétrie puisque le résultat de cette opération permet de déterminer la parallaxe entre deux images radar, à savoir le décalage le long de l'axe distance entre deux images stéréoscopiques. La valeur de ce décalage est directement reliée à l'altitude du pixel enregistré dans l'image radar,
- la reconstruction géométrique par résolution des équations de localisation multi-

scènes. La résolution de ces équations permet d'obtenir la position en trois dimensions de chaque point vu simultanément sur les deux images radar stéréoscopiques afin d'obtenir le MNT final. Nous avons également montré que la résolution des équations de localisation multi-scènes nécessite des corrections en azimuth et en distance des images radar. Ces corrections sont déterminées à partir de points d'amer, dont nous connaissons les coordonnées grâce à une carte IGN.

Nous avons également présenté des méthodes permettant d'optimiser les performances du traitement radargrammétrique au niveau de la précision et de la reconstruction altimétrique. Ces méthodes sont basées sur :

- le filtrage du speckle. En effet, le speckle est un phénomène qui altère l'information de radiométrie des images radar. Il convient donc de le diminuer dans le cadre de l'utilisation de l'information radiométrique d'une image radar pour effectuer l'appariement entre deux images stéréoscopiques,
- l'approche pyramidale qui opère un traitement multi-échelle. Il apparaît que l'opération d'appariement est plus rapide (en temps de calcul) et plus robuste sur une image dégradée en termes de résolution. Ainsi, l'appariement est effectué à chaque niveau de dégradation de la résolution pour terminer sur la résolution d'origine.

Ces différentes étapes et méthodes sont alors implémentées dans une chaîne de traitements radargrammétriques et permettent l'obtention d'un MNT dense, que nous comparons avec un MNT généré à partir des missions SRTM. Les résultats de la comparaison montrent quelques imprécisions de reconstruction. En effet, seulement 80% des points de ce MNT ont une erreur de reconstruction altimétrique inférieure à 100 mètres. Ces imprécisions s'expliquent par le fait que la zone d'étude comporte de fortes variations de relief (1900 à 2900 mètres) et que la différence entre les angles de visée (35.7° et 50.1°) est importante. Ces éléments entraînent de fortes migrations en distance entre les images. De ce fait, les fenêtres de corrélation ne sont pas assez similaires pour effectuer une mise en correspondance fiable. Ainsi, la méthode d'appariement tirée de la photogrammétrie en imagerie optique n'est pas efficace pour être appliquée directement sur les images radar. Les études de [52] et de [56] présentent des méthodes d'appariement spécifiques aux images radar permettant d'améliorer sensiblement la reconstruction du MNT. Il apparaît donc indispensable de faire évoluer la méthode d'appariement afin qu'elle soit adaptée aux particularités des images radar.

Jusqu'à présent la taille des fenêtres utilisées pour les opérations de corrélation pendant l'étape d'appariement sont fixes. Or, il apparaît qu'en fonction du contenu radiométrique des fenêtres en question, certaines tailles de ces fenêtres semblent plus adaptées à ce contenu. Par exemple, des zones radiométriquement homogènes nécessitent des fenêtres de grande taille afin d'obtenir des résultats les plus justes. À l'inverse, des fenêtres de petite taille sont plus adaptées pour l'appariement de zones hétérogènes. Nous proposons alors une nouvelle méthode, en exploitant différentes tailles $m \times n$ de fenêtres de corrélation. Ainsi, chaque taille de fenêtre contient une information supplémentaire à celles des autres fenêtres de tailles différentes. Dans notre analyse, nous utilisons d'une part plusieurs dimensions $m \times n$ en azimuth, ce qui permet de diversifier les motifs de corrélation. Nous obtenons donc plusieurs informations sur les coefficients de corrélation pour chaque taille de fenêtre ce qui permet de déterminer

judicieusement le pixel homologue. D'autre part, nous procédons à une dilatation de la dimension n en distance des fenêtres de corrélation afin de compenser le phénomène de compression d'une image à l'autre. Nous nous retrouvons ainsi proches des conditions de photogrammétrie avec des motifs de corrélation similaires. Les résultats obtenus par cette nouvelle méthode sont encourageants car nous obtenons ainsi 94.4% de points dont l'erreur de reconstruction altimétrique est inférieure à 100 mètres.

Ensuite, nous établissons un critère de validité à partir des disparités calculées pour chaque taille de fenêtre. L'appariement est validé si les valeurs de ces disparités sont suffisamment proches entre elles. Nous parlons alors d'indice de confiance. En association avec cet indice, nous affinons les résultats de l'appariement en effectuant une localisation sub-pixelique de la disparité à chaque étape du traitement multi-échelle. Pour terminer, nous effectuons un filtrage sur les cartes de disparités. Ce filtrage a pour but d'assurer la continuité « naturelle » de ces cartes de disparité.

Nous obtenons alors 97.9% de points dont l'erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres. Ces résultats sont obtenus pour une résolution planimétrique égale à celle du MNT SRTM, soit une précision de 90 mètres en longitude et en latitude. Nous avons alors constaté qu'il est possible d'améliorer la résolution planimétrique en passant à une résolution de 30 mètres au sol. Toutefois, cette amélioration de la résolution planimétrique se fait au détriment de la résolution altimétrique. Les résultats restent malgré tout satisfaisants puisque le MNT généré comporte 97.9% de points dont l'erreur de reconstruction est inférieure à 100 mètres.

Lors de cette étude, nous soulevons divers points d'amélioration qu'il serait souhaitable de mettre en place afin d'améliorer encore les résultats.

Perspectives

Indice de confiance et critère de validité Lors de la phase d'appariement, nous rencontrons le cas de valeurs de disparités divergeantes entre plusieurs tailles de fenêtres. Nous établissons alors un critère de validité qui permet de détecter ce cas : l'appariement associé est alors considéré comme « douteux ». Dans la zone d'étude réduite que nous avons choisi pour nos travaux, ce cas ne se produit que pour quatre pixels. Mais dans la scène commune aux deux images radar stéréoscopiques, il existe des zones contenant des dizaines de pixels groupés pour lequel l'appariement est douteux, particulièrement dans les zones d'ombre et les zones de forte compression en distance. Une analyse de ces cas particuliers nous permet de constater que l'appariement peut échouer à cause de la présence de pics de corrélation dont l'amplitude dépasse celle de celui qui identifie le véritable pixel homologue. Une classification par analyse des formes et des niveaux des pics de corrélation [50] serait profitable. En effet, cette classification permettrait de trancher quand il se présente un pic principal et un pic secondaire dont les valeurs sont quasiment identiques. Il serait alors possible de mettre en place un nouvel indice de confiance liée à la validité de l'appariement. De plus, cet indice de confiance pourrait être enrichi par une analyse des surfaces de corrélation obtenues sur le voisinage.

Une autre solution pourrait être de lancer une requête d'appariement manuel par opérateur quand un appariement douteux a été détecté et que la recherche du pixel homologue dans le cadre d'une corrélation automatique est infructueuse.

Améliorations sur toutes les étapes du traitement multi-échelle Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont été principalement focalisés sur l'étape 1 du traitement multi-échelle. Ainsi, la carte de disparités générée à cette étape est devenue la plus fiable et précise possible. Pour les étapes suivantes, l'appariement n'utilise que la technique de dilatation de la taille des fenêtres de corrélation. Comme nous l'avons exposé dans ce document, les résultats sont satisfaisants. Toutefois il serait intéressant de développer une méthode d'appariement spécifique pour chacune des étapes du traitement multi-échelle. Pour une étape donnée, une solution serait d'exploiter plus d'informations à partir de la carte de disparités générée à l'étape précédente. En effet, le transfert d'informations d'une étape à l'autre est ici limité à fournir une carte de disparités et une carte d'indices de confiance. D'autres informations sont exploitables comme l'analyse des tailles de fenêtres qui optimisent l'appariement pour un pixel donné. Les tailles optimales de fenêtres peuvent être obtenues à partir des informations statistiques de l'image qui déterminent l'homogénéité ou l'hétérogénéité d'une zone. Le choix d'une taille optimale peut également être basé sur les informations des niveaux de corrélation obtenus pour l'étape précédente : pour un pixel donné, si les coefficients de corrélation sont faibles pour les fenêtres de grande taille et forts pour les fenêtres de petite taille, il convient alors d'utiliser des fenêtres de dimensions réduites lors de l'appariement effectué à l'étape suivante.

De la même manière, il serait intéressant de pouvoir déterminer la dilatation optimale de taille de fenêtre pour un pixel donné. À partir des disparités calculées à l'étape précédente, nous connaissons la migration d'un pixel et de son voisinage d'une image à l'autre. Quand une fenêtre de corrélation est extraite de l'image de référence, il est alors possible de quantifier la disparité du pixel central mais aussi des pixels qui forment les coins de cette fenêtre. À partir des disparités de chacun de ces points, la zone couverte par les pixels présents dans la fenêtre de corrélation peut être délimitée dans l'autre image. Ces informations permettent alors de déterminer la fenêtre de corrélation optimale dans la seconde image et ainsi de prévoir aussi la dilatation optimale qu'il faut apporter à une taille de fenêtre. De plus, cette opération de dilatation peut être améliorée en utilisant une dilatation non-linéaire. En effet, dans nos travaux la dilatation est appliquée de façon linéaire sur toute la dimension en distance de la fenêtre de corrélation. Or, il arrive que cette fenêtre comporte des zones plus ou moins compressées, notamment si elle focalise un sommet ou le fond d'une vallée. Utiliser une dilatation non-linéaire permettrait alors d'adapter la fenêtre de corrélation de manière plus efficace.

Temps de calcul L'autre conséquence de l'amélioration des méthodes appliquées sur toutes les étapes du traitement multi-échelle est la réduction du temps de calcul lors de la génération des cartes de disparités. Les opérations de dilatation de taille de fenêtre et de corrélation sont des opérations lourdes qui sont répétées à chaque taille $m \times n$ de fenêtre de corrélation. Pour la zone étudiée (300×356 pixels), la génération des cartes de disparités occupe 4h45 pour un processeur cadencé à 2.4 GHz : 1h05 pour l'étape 1, 45min pour l'étape 2, puis 2h55 pour l'étape 3. La génération du MNT à partir de la carte de disparités élaborée à l'étape finale est très rapide : environ 1 minute. Pour l'étape 1, il est difficile de réduire le nombre d'opérations effectuées car l'objectif est de diversifier les tailles de fenêtres de corrélation afin de récupérer

un maximum d'informations fiabilisant l'appariement. Pour les étapes 2 et 3, il est possible d'utiliser une taille unique de fenêtre de corrélation, de taille et de dilatation optimales à déterminer pour chaque pixel. En procédant ainsi pour ces étapes, il ne sera plus nécessaire de faire l'appariement à partir de plusieurs tailles de fenêtres dilatées en distance : les temps de calcul en seront considérablement réduits.

Annexe

Annexe A

Résolution d'équations non-linéaires

A.1 Généralités

La résolution d'équations non-linéaires est un problème classique en mathématique. Il s'agit de déterminer la racine d'une équation ou d'un système d'équations non linéaires. La détermination de cette racine sous forme analytique peut s'avérer très fastidieuse voire impossible. Ainsi, il est fait appel à des méthodes numériques pour résoudre le problème fondamental lié à la résolution de

$$f(x) = 0$$

ou d'un système de différentes fonctions $f(x)$ avec $f(x)$, expression analytique d'une fonction quelconque. L'approche numérique de la résolution est basée sur la minimisation d'une fonction de coût entre la solution x et son estimation \tilde{x} . Cette fonction de coût s'énonce de manière générale comme la somme quadratique d'erreurs pouvant s'exprimer sous la forme $\left[(\tilde{x} - x)^2 / \sigma^2 \right]$ où σ est l'écart-type de l'évolution de la valeur de x .

La question fondamentale de la résolution d'équations non-linéaires par des méthodes numériques se porte sur la rapidité de convergence de la méthode utilisée. À titre d'information, nous donnons ici la définition du taux de convergence. S'il existe les valeurs α et λ , le taux de convergence d'un algorithme est donné [] par

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{|\tilde{x}_{k+1} - \tilde{x}|}{|\tilde{x}_k - \tilde{x}|^\alpha} = \lambda$$

La constante λ est positive et inférieure à 1. La variable α est appelée le taux de convergence. Par exemple, si α est égal à 1, on indique que le taux de convergence est linéaire; si α est égal à 2, le taux de convergence est quadratique. La rapidité de convergence d'une méthode conditionne le choix des méthodes pour la résolution des équations.

De plus, ces méthodes sont itératives c'est à dire que le résultat est obtenu à la suite de la construction d'une suite de valeurs (\tilde{x}_n) telle que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{x}_n = \tilde{x}$$

pour avoir $f(\tilde{x}) = 0$. De manière générale, l'obtention de la solution \tilde{x} n'est pas immédiate et on peut être amené à recommencer la recherche d'une solution avec des conditions initiales différentes si l'algorithme de recherche d'une solution n'aboutit pas.

Dans ce travail de thèse, nous mettons en avant l'utilisation d'un système de calcul formel (MAPLE[®]) nous permettant de résoudre un système d'équations non-linéaires. Ainsi, la résolution de notre problème ne manipule pas les lois de l'analyse mais plutôt celles de l'algèbre. Toutefois, l'utilisateur utilise, en ayant pris soin de les analyser, les résultats du calcul formel. Il s'agit donc, pour cet utilisateur, d'interpréter finement les résultats obtenus par le système afin de choisir les bonnes méthodes de résolutions numériques. L'arrêt de l'algorithme est fixé par une limite de la convergence imposée par l'utilisateur.

A.2 Méthode de la bisection

Cette méthode est basée sur une alternance de signe de la fonction $f(\tilde{x}_n)$ lors de la recherche de la racine. L'initialisation de l'algorithme consiste à déterminer deux valeurs x_0^+ et x_0^- pour lesquelles nous avons $f(x_0^+) \cdot f(x_0^-) < 0$ (en supposant que $x_0^- < x_0^+$). L'itération se poursuit en choisissant la valeur x_1 telle que x_1 soit l'isobarycentre de l'intervalle $[x_0^+, x_0^-]$ et l'intervalle se réduit en conservant cette alternance de signe. Pour chaque itération, à l'étape i , la valeur de x_i est donc égale à $(x_{i-1}^+ + x_{i-1}^-)/2$. L'erreur absolue au rang i de l'intervalle de recherche est donné par

$$|\tilde{x} - x_i| = \frac{x_i - x_{i-1}}{2}$$

On peut montrer que le taux de convergence de l'algorithme est de type linéaire. Une des contraintes de cette méthode est de respecter une continuité de la fonction f sur l'intervalle de recherche.

A.3 Méthode du point fixe

Cette méthode présente un taux de convergence linéaire et est applicable à la résolution de systèmes d'équations (alors que la méthode de la bisection ne l'est pas). Elle est basée sur la reformulation de l'équation de base $f(x) = 0$ en une autre équation décrite par $g(x) = x$. La condition évidente est d'avoir accès à l'expression analytique de $f(x)$ pour écrire la reformulation. Il faut noter qu'il existe plusieurs réécritures pour $g(x)$ et que ces différentes reformulations ne sont pas équivalentes en termes d'efficacité. Quant à l'implémentation numérique de cette méthode, elle est relativement simple puisqu'il suffit d'écrire pour l'étape i :

$$x_i = g(x_{i-1})$$

Le choix de la valeur initiale est relativement importante puisque ce choix influence la convergence de la méthode. En particulier, on montre que si $|g'(x)| < 1$ pour toute valeur de x appartenant à un intervalle I tel que $|x - \tilde{x}| < r$ alors l'itération de l'étape i converge vers \tilde{x} si x_1 appartient à I (condition de Lipschitz). Il faut noter que cette condition est uniquement suffisante pour la convergence.

A.4 Méthode de l'interpolation linéaire (ou de la sécante)

Cette méthode est similaire à la méthode de la bisection excepté le principe de l'alternance de signe de $f(x_i)$ et $f(x_{i-1})$. À l'itération $(i + 1)$, la courbe est approchée par une droite passant par les points $(x_{i-1}, f(x_{i-1}))$ et $(x_i, f(x_i))$. Ainsi, le point de l'itération courante est déterminé par l'intersection de la droite décrite par les points $(x_{i-1}, f(x_{i-1}))$ et $(x_i, f(x_i))$ et l'axe des abscisses. Pour chaque itération, la valeur de x_{i+1} est calculée avec :

$$\frac{x_i - x_{i+1}}{x_i - x_{i-1}} = \frac{f(x_i)}{f(x_i) - f(x_{i+1})}$$

On peut montrer que cette méthode possède les mêmes caractéristiques que la méthode de la bisection (en particulier nécessité de continuité de la fonction f). La différence se situe au niveau du taux de convergence : celui de la méthode d'interpolation est supérieur à celui de la bisection.

A.5 Méthode de Newton-Raphson

Afin d'améliorer le taux de convergence, le principe de l'interpolation linéaire est étendu en approchant la courbe par la tangente au point courant de l'itération. Cette méthode améliore sensiblement les méthodes précédentes. Pour chaque itération, la valeur courante ne dépend que du point précédent et de la dérivée de la fonction (d'où nécessité de son existence). On peut donc donner la valeur de x_i avec

$$x_i = x_{i-1} - \frac{f(x_{i-1})}{f'(x_{i-1})}$$

On peut montrer que l'ordre de convergence de cette méthode est quadratique (sauf dans le cas de racines multiples - $f(\tilde{x}) = 0$ - où la méthode converge linéairement).

La méthode de Newton-Raphson est souvent utilisée pour permettre d'atteindre une solution et d'utiliser cette solution avec une méthode plus robuste (de type bisection). En effet, la méthode de Newton-Raphson converge d'autant plus vite que la valeur initiale de x_i est proche de la racine. Toutefois, il est possible que cette méthode diverge (en fonction du point initial choisi) d'où l'utilisation de méthodes plus robustes. L'autre condition forte de cette méthode est l'existence de la fonction dérivée de $f(x)$. Enfin, on peut noter l'utilisation de la méthode de Newton-Raphson pour localiser un minimum ou un maximum d'une fonction (annulation de la dérivée).

A.6 Extension à un système d'équations

Dans notre cas, nous étendons le principe de la résolution numérique d'une équation non-linéaire à un système d'équations non-linéaires. Nous adaptons donc la problématique à la résolution de $F(\mathbf{x}) = 0$ où F est une fonction de valeurs appartenant à \mathbb{R}^n vers \mathbb{R}^n . Les méthodes décrites ci-dessus ne s'adaptent pas toutes à la généralisation d'un problème multidimensionnel. La méthode du point fixe et la méthode de Newton-Raphson font partie des méthodes pouvant être étendue à la dimension n .

A.6.1 Méthode multi-dimensionnelle du point fixe

Comme pour le cas mono-dimensionnel, on effectue la reformulation du problème avec $G(\mathbf{x}) = \mathbf{x}$ où \mathbf{x} est un vecteur colonne de dimension n . Le point de départ de la méthode est aussi un vecteur : \mathbf{x}_1 . La condition de convergence est liée à l'appartenance du vecteur x_1 à une boule B autour de la valeur $\tilde{\mathbf{x}}$. Ainsi, les conditions de convergence s'appliquent à des normes de vecteur et la condition de convergence mono-dimensionnelle ($g'(x) < 1$) s'étend au cas multi-dimensionnel avec le Jacobien de G ce qui donne n conditions :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial G_1(x)}{\partial x_i} \right| &< 1 \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial G_n(x)}{\partial x_i} \right| &< 1 \end{aligned}$$

Si on satisfait simultanément ces n conditions, la suite \mathbf{x}_i converge si le vecteur de départ \mathbf{x}_1 appartient à la boule B .

A.6.2 Méthode multi-dimensionnelle de Newton-Raphson

L'utilisation de la méthode de Newton-Raphson étendue au cas multi-dimensionnelle permet aussi d'améliorer le taux de convergence par rapport à la méthode du point fixe. Nous rappelons que la dimension de \mathbf{x} est égale à n . À l'étape d'itération i , la formulation de la méthode de Newton-Raphson peut donc s'écrire avec :

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{i-1} - \left(\frac{\partial F(\mathbf{x}_{i-1})}{\partial \mathbf{x}} \right)^{-1} F(\mathbf{x}_{i-1})$$

L'expression $\partial F(\mathbf{x}_{i-1})/\partial \mathbf{x}$ représente le Jacobien de la fonction F calculée en $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{i-1}$. Dans cette méthode multi-dimensionnelle, on s'applique à reformuler le problème de manière à éviter l'écriture de la division matricielle. En effet, si on indique que le vecteur Δ_{i-1} est solution du système :

$$\left(\frac{\partial F(\mathbf{x}_{i-1})}{\partial \mathbf{x}} \right) \Delta_{i-1} = F(\mathbf{x}_{i-1})$$

alors la formulation de la méthode de Newton-Raphson devient

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{i-1} - \Delta_{i-1}$$

Le problème revient donc à résoudre ce dernier système pour chaque itération. La résolution d'un système d'équations est basée sur l'écriture du Jacobien de la fonction $F(\mathbf{x})$. Aussi, la principale difficulté de la méthode est liée à la singularité (possible pour une étape d'itération i en fonction du vecteur initial) de la matrice représentant F puisque cette singularité se traduit par une impossibilité d'inverser la matrice du Jacobien.

Annexe B

Paramètres d'acquisition des images SIR-C stéréoscopiques

| paramètres | image PR17310 | image PR17429 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| Image Duration (s) | 6.8974733 | 6.8952179 |
| Near Slant Range (km) | 338.0135193 | 269.4699097 |
| Earth Radius at Image Center (km) | 6367.5870144 | 6367.5821972 |
| Earth Radius at Nadir (km) | 6366.9029279 | 6367.1714030 |
| Near Range Incidence Angle (deg) | 48.6968193 | 32.7071304 |
| Far Range Incidence Angle (deg) | 51.3213997 | 38.3066406 |

TABLE B.1 – Paramètres de dimensionnement de l'image

| paramètres | image PR17310 | image PR17429 |
|--|---------------|---------------|
| Map Projection Descriptor | SLANT RANGE | |
| Number of Pixels per Image Line | 1320 | 1396 |
| Number of Image Lines | 11176 | 11972 |
| Pixel Spacing (m) | 13.3249636 | |
| Line Spacing (m) | 4.4747109 | 4.1770754 |
| Platform Distance at Image Center (km) | 6594.7548828 | 6595.4624023 |
| Geodetic Altitude of Platform (km) | 227.8344269 | 228.2730255 |
| Spacecraft Speed at Nadir (km/sec) | 7.2543721 | 7.2532511 |
| Platform Heading at Nadir (deg) | 50.5776634 | 49.5768051 |
| Ellipsoid Designator | GEM6 | |
| Ellipsoid Semimajor Axis (km) | 6378.1440000 | |
| Ellipsoid Semiminor Axis (km) | 6356.7592900 | |
| Near Range Early Time Latitude (deg) | 44.7042274 | 44.7341385 |
| Near Range Early Time Longitude (deg) | 6.3876472 | 6.5486832 |
| Far Range Early Time Latitude (deg) | 44.5419769 | 44.5130424 |
| Far Range Early Time Longitude (deg) | 6.5659313 | 6.8054638 |
| Far Range Late Time Latitude (deg) | 44.8176003 | 44.7986145 |
| Far Range Late Time Longitude (deg) | 7.0611577 | 7.2904840 |
| Near Range Late Time Latitude (deg) | 44.9808083 | 45.0211411 |
| Near Range Late Time Longitude (deg) | 6.8835907 | 7.0343623 |

TABLE B.2 – Paramètres de projection cartographique

| paramètres | image PR17310 | image PR17429 |
|--|--------------------------|---------------|
| Site Name : | Otzal, Austrian Alps (1) | |
| GMT, Image Center (YYYY/MM/DD) | 1994/04/12 | 1994/04/10 |
| Geodetic Latitude at Image Center (deg) | 44.7615013 | 44.7670670 |
| Geodetic Longitude at Image Center (deg) | 6.7240772 | 6.9193964 |
| Track Angle at Image Center (deg) | 52.1293602 | 50.5683250 |
| Ellipsoid Designator | GEM6 | |
| Ellipsoid Semimajor Axis (km) | 6378.1440000 | |
| Ellipsoid Semiminor Axis (km) | 6356.7592900 | |
| Average Terrain Height above Ellipsoid (m) | 0.0000000 | |
| Image Center Line Number | 5588 | 5986 |
| Image Center Pixel Number | 660 | 698 |
| Image Length (km) | 50.0048981 | 50.0037727 |
| Image Width (km) | 17.5756283 | 18.5883255 |
| Number of SAR Polarization Channels | 4 | |
| SAR Band | C | |
| Resolution (HI = 20 MHz, LO = 10 MHz) | LO | |
| Platform Geodetic Latitude at Nadir (deg) | 46.349 | 45.628 |
| Platform Geodetic Longitude at Nadir (deg) | 4.617 | 5.586 |
| Platform Heading at Nadir (deg) | 50.578 | 49.577 |
| Incidence Angle at Image Center (deg) | 50.054 | 35.693 |
| Radar Frequency (GHz) | 5.304 | |
| Radar Wavelength (m) | 0.0565216 | |
| Motion Compensation (00 = No Compensation) | 00 | |
| Range Chirp Start Frequency (MHz) | 0.6151925 | |
| Range Chirp Rate (MHz / microsec) | 0.2965929 | 0.5931858 |
| Range Complex Sampling Rate (MHz) | 11.2492800 | |
| Nominal PRF (Hz) | 1620.0000000 | 1736.0000000 |
| Antenna Elevation 6 dB Beamwidth (deg) | 2.4187870 | 5.3131866 |
| Antenna Azimuth 6 dB Beamwidth (deg) | 0.2693697 | 0.2693937 |
| Product Type | SINGLE-LOOK COMPLEX | |
| Total Number of Looks | 1.0000000 | |
| Total Processor Azimuth Bandwidth (Hz) | 1250.0000000 | |
| Total Processor Range Bandwidth (MHz) | 10.0188904 | |
| Nominal Range Resolution (m) | 20.7292690 | 27.1389275 |
| Nominal Azimuth Resolution (m) | 6.1935735 | 6.1955991 |
| Line Spacing (m) | 4.4747109 | 4.1770754 |
| Pixel Spacing (m) | 13.3249636 | |

TABLE B.3 – Paramètres d'enregistrement

Annexe C

Description du filtrage de *speckle*

C.1 Généralités

Le phénomène de chatoiement ou de *speckle* est un phénomène classique visible sur les images radar et essentiellement dû au caractère cohérent de l'onde électromagnétique incidente. Des efforts considérables sont fournis pour limiter l'influence du *speckle* sur les images radar avec pour but, entre autres, d'améliorer l'interprétation d'une image radar basée sur l'aspect radiométrique de cette image et tendre vers une qualité d'image de type optique. Une autre approche tente de mettre au point des outils permettant d'extraire des informations pertinentes de l'image en minimisant l'influence de *speckle*. Ce problème est complexe et est basé sur une approche bayésienne du phénomène du chatoiement. Ainsi, l'extraction de l'information revient à résoudre un problème d'estimation bayésienne.

C.2 Stratégie d'estimation

On rappelle que l'opération d'estimation consiste à extraire (ou estimer) une variable X (de réalisation x) d'une variable aléatoire Y (de réalisation mesurée y) à partir de leur probabilité conjointe $P(Y|X)$ probabilité de la variable. L'estimation de x est notée \hat{x} . Sur un certain nombre de tirages N , la stratégie d'estimation définit un estimateur optimal qui minimise l'espérance d'une fonction de coût $C(x, \hat{x})$ sachant la réalisation y

$$E [C(x, \hat{x})|y] = \sum_N C(x, \hat{x}).P(x|y)$$

L'estimateur optimal dépend donc de l'expression de la fonction de coût :

- l'estimateur MAP (maximum de la probabilité a posteriori) utilise une fonction de coût basée sur le symbole de Kronecker δ_x ,
- l'estimateur EQMM (erreur quadratique moyenne minimale) utilise une fonction de coût quadratique.

Les estimateurs font appel à des mesures statistiques qui sont tirées de l'environnement de la variable à estimer

C.3 Application : filtrage de Lee

C.3.1 Description

Dans le cas de l'image radar référencée par ses coordonnées (az, rg) , l'intensité d'un pixel $p = p(az, rg)$ est obtenue en considérant le *speckle* $b = b(az, rg)$ comme un bruit multiplicatif se combinant avec la réflectivité $s = s(az, rg)$

$$p(az, rg) = s(az, rg).b(az, rg)$$

Le problème du filtrage revient donc à estimer la réflectivité s . Cette réflectivité est soumise à quelques hypothèses (stationnarité et ergodicité) ainsi le bruit multiplicatif (espérance égale à 1 et variance inversement proportionnelle au nombre de vues constituant l'image).

C.3.2 Dimensionnement

Le filtre de Lee⁽¹⁾ utilise la minimisation de l'EQM ce qui donne

$$\hat{s} = E[p] + \alpha(p - E[p])$$

où le coefficient α est donné avec $\alpha = \text{var}(s)/\text{var}(p)$. L'approximation de Lee, consistant à écrire que $(s - E[s]).(p - E[p]) \approx 0$ (ce qui se justifie s'il n'y a pas de texture dans la scène ainsi $s = E[s] = \sigma_0$), donne alors

$$\alpha = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_b^2.E[s]^2 + \sigma_s^2}$$

Le coefficient α peut se décrire en fonction du contraste entre le phénomène de *speckle* (associé au bruit d'une image radar $b(az, rg)$) et le niveau moyen de rétrodiffusion (associé au signal utile d'une image radar $s(az, rg)$). Pour une grandeur de mesure x , ce contraste γ peut donc se décliner suivant la relation suivante :

$$\gamma_x = \frac{E[x^2] - E^2[x]}{E^2[x]}$$

Ainsi, le coefficient α s'écrit avec

$$\alpha = 1 - \frac{\gamma_b^2}{\gamma_p^2}$$

De plus, si nous considérons :

- le nombre de vues L comme un paramètre du processus d'imagerie radar,
 - l'écart-type σ_p et la moyenne $\bar{p} = E[p(az, rg)]$ de la fenêtre d'observation choisie,
- on a aussi

$$\alpha = 1 - \frac{1}{L} \left(\frac{\bar{p}}{\sigma_p} \right)^2$$

(1). Il faut aussi considérer le filtre de Kuan proche du filtre de Lee pour un nombre de vues supérieur ou égal à 3.

C.3.3 Interprétation

Le coefficient α permet d'avoir une idée sur le comportement de la zone d'intérêt. Si on a affaire à une zone homogène alors $\gamma_p \equiv \gamma_b$ et la valeur de α est environ égale à 0. La valeur de la sortie du filtre est donc la moyenne de la zone ($\hat{s} = E[p]$).

Pour une zone très hétérogène, on a alors la relation $\gamma_p \gg \gamma_b$ ce qui donne donc $\alpha = 1$. La sortie du filtre de Lee est donc environ égale à la valeur radiométrique du pixel (pas d'effet de moyennage). Le filtre de Lee possède donc la propriété de conservation des contours puisque une telle zone est caractéristique d'une zone hétérogène (discontinuité des niveaux radiométriques).

C.3.4 Dimension de la fenêtre

Un paramètre à régler lors de l'utilisation du filtre de Lee, est le choix de la fenêtre d'observation de la zone à filtrer. À la lumière de l'interprétation précédente, il est clair que le choix d'une fenêtre large a tendance à privilégier un fonctionnement de type « moyennage » alors qu'une fenêtre rétrécie minimise l'influence du filtre de Lee.

Annexe D

Liste des travaux

D.1 Publications

F. Fayard, S. Méric et E. Pottier : « First studies on a radargrammetric tool kit », *EUSAR 2006*, Dresde, 2006.

F. Fayard, S. Méric et E. Pottier : « Matching stereoscopic SAR images for radargrammetric applications », *IGARSS 2007*, Barcelone, pages 4364 – 4367, 2007.

F. Fayard, S. Méric et E. Pottier : « Mise en appariement d'images SAR stéréoscopiques », *JNM 2007*, Toulouse, 2007.

S. Méric, F. Fayard et E. Pottier : « Radargrammetric SAR image processing », chapter in *Geoscience and remote sensing*, pages 421 – 454, In-Tech editions, 2009.

D.2 Publications à venir

F. Fayard, S. Méric et E. Pottier : « Radargrammetry improvements : a multi-window approach », *EUSAR 2010*, Aix-la-Chapelle, 2010.

F. Fayard, S. Méric et E. Pottier : « DEM Generation by radargrammetric techniques », *IGARSS 2010*, Honolulu, 2010.

F. Fayard, S. Méric et E. Pottier : « Radargrammetric improvements : a multi-window approach », *IGARSS 2010*, Honolulu, 2010.

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Gamme des fréquences des systèmes radars. | 10 |
| 1.2 | Vue globale de la navette spatiale Endeavour. | 13 |
| 1.3 | Géométrie générale de la configuration en visée latérale. | 14 |
| 1.4 | Exemple de géométrie d'une antenne radar pour imagerie. | 15 |
| 1.5 | Définition du volume de résolution radar. | 15 |
| 1.6 | Représentation du signal émis et du signal reçu. | 16 |
| 1.7 | Définition des portées radar. | 17 |
| 1.8 | Effet de la projection dans le plan distance. | 20 |
| 1.9 | Projection dans le plan distance et dans le plan sol. | 20 |
| 1.10 | Phénomènes de distorsion dans une image radar. | 21 |
| 1.11 | Exemple de déformation due à la visée latérale d'un radar imageur. | 22 |
| 1.12 | Géométrie de la prise de vue satellitaire. | 23 |
| 1.13 | Définition géométrique de l'ellipsoïde terrestre. | 25 |
| 1.14 | Intersection de la sphère distance et le cône Doppler. | 26 |
| 1.15 | Intersection du cercle Doppler et de la surface de la Terre. | 27 |
| 1.16 | Critère de Rayleigh : (a) surface lisse, (b) surface peu rugueuse et (c) surface très rugueuse. | 28 |
| 1.17 | Phénomène de rétrodiffusion : (a) sur une pente tournée vers le radar, (b) sur un coin formé entre le sol et une façade verticale et (c) multiple entre objets. | 29 |
| 1.18 | Image radar d'un immeuble avec orientation quelconque. | 29 |
| 1.19 | Illustration du chevauchement des cellules de résolution. | 31 |
| 2.1 | Géométrie de prise de vue dans le cas d'une configuration interférométrique monostatique. | 35 |
| 2.2 | Orientations possibles du vecteur normal à la surface locale étudiée. | 37 |
| 2.3 | Géométrie de prise de vue dans le cas d'une configuration stéréoscopique. | 38 |
| 2.4 | Définitions des paramètres de prise de vue en stéréoscopie. | 39 |
| 2.5 | Configuration <i>same-side</i> et effet d'une erreur en distance. | 42 |
| 2.6 | Configuration <i>opposite-side</i> et effet d'une erreur en distance. | 42 |
| 2.7 | Principe de l'approche pyramidale : (a) étape initiale, (b) étape intermédiaire, (c) étape finale. | 49 |
| 2.8 | Images radar à résolutions croissantes : (a) étape initiale, (b) étape intermédiaire, (c) étape finale. | 50 |
| 3.1 | Configuration <i>same-side</i> - rappel des variables utilisées | 58 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.2 | Point brillant imagé par le simulateur d'images ROS. | 60 |
| 3.3 | Image ROS simulée pour un angle de visée θ_v de 35° | 61 |
| 3.4 | Image ROS simulée puis seuillée pour un angle de visée θ_v de 35° . . . | 61 |
| 3.5 | Deux types de configuration pour un angle θ_{v1} intermédiaire. | 62 |
| 3.6 | Erreurs planimétriques pour $\theta_{v1} = 50^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 30° | 63 |
| 3.7 | Erreurs altimétriques pour $\theta_{v1} = 50^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 30° | 63 |
| 3.8 | Erreurs planimétriques pour $\theta_{v1} = 20^\circ, 50^\circ, 80^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 60° | 64 |
| 3.9 | Erreurs altimétriques pour $\theta_{v1} = 20^\circ, 50^\circ, 80^\circ$ et $\Delta\theta_v$ variant de 2° à 60° | 65 |
| 4.1 | Carte de relief de la zone étudiée et générée par Google Maps. | 69 |
| 4.2 | Image PR17429 de la paire stéréoscopique. | 69 |
| 4.3 | Image PR17310 de la paire stéréoscopique. | 70 |
| 4.4 | Détermination de la référence temporelle pour l'interpolation de la trajectoire. | 72 |
| 4.5 | Effet de la mise en géométrie épipolaire. | 73 |
| 4.6 | Calculs des courbes épipolaires (référence et secondaire). | 74 |
| 4.7 | Zone d'étude : extrait de l'image PR17310. | 75 |
| 4.8 | Tracé d'une courbe épipolaire dans l'image PR17429. | 77 |
| 4.9 | Tracé de la courbe d'épipolaire corrigée pour le pic de l'Agrenier dans l'image PR17429. | 79 |
| 4.10 | Corrélation entre l'image de référence et l'image secondaire. | 80 |
| 4.11 | Différents degrés de « confiance » sur le résultat de la corrélation. . . | 82 |
| 4.12 | Carte de disparités en distance obtenue sans traitement multi-échelle. | 84 |
| 4.13 | Corrélation obtenue sans traitement multi-échelle, pour un pixel situé dans une zone avec erreur. | 85 |
| 4.14 | Carte de disparités en distance obtenue avec traitement multi-échelle de 3 étapes. | 86 |
| 4.15 | Corrélation obtenue avec traitement multi-échelle, à l'étape 1, pour un pixel situé dans une zone avec erreur | 87 |
| 4.16 | Corrélation obtenue sans traitement multi-échelle, à l'étape 3, pour un pixel situé dans une zone avec erreur. | 88 |
| 4.17 | Erreurs de reconstruction planimétrique en longitude Δ_λ | 90 |
| 4.18 | Erreurs de reconstruction planimétrique en latitude Δ_ϕ | 90 |
| 4.19 | Erreurs de reconstruction en altitude Δ_h | 91 |
| 4.20 | Moyenne de l'erreur RMS Δ_{MNT} | 91 |
| 4.21 | Effet d'une erreur en azimuth sur la recherche de la solution. | 93 |
| 4.22 | Erreurs de reconstruction planimétrique en longitude Δ_λ | 94 |
| 4.23 | Erreurs de reconstruction planimétrique en latitude Δ_ϕ | 94 |
| 4.24 | Erreurs de reconstruction en altitude Δ_h | 95 |
| 4.25 | Moyenne de l'erreur RMS Δ_{MNT} | 95 |
| 4.26 | MNT généré - vue 3D. | 98 |
| 4.27 | MNT SRTM de la zone étudiée. | 99 |
| 4.28 | MNT généré et comparaison avec le MNT SRTM. | 99 |
| 5.1 | Méthode 1 : profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple. | 105 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.2 | Méthode 1 : produit des profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple. | 107 |
| 5.3 | Visualisation des deux fenêtres de corrélation pour un pixel dont l'appariement échoue. | 108 |
| 5.4 | Technique de dilatation en distance de la fenêtre de corrélation sur l'image secondaire. | 108 |
| 5.5 | Méthode 2 : profils de coefficients de corrélation, sans et avec dilatation de la taille de fenêtre, pour le pixel exemple. | 109 |
| 5.6 | Méthode 3 : profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple. | 110 |
| 5.7 | Méthode 3 : produit des profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple. | 111 |
| 5.8 | Erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape 1 du traitement multi-échelle. | 112 |
| 5.9 | Erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape finale du traitement multi-échelle (méthodes différentes pour l'étape 1 et méthode classique pour les étapes 2 et 3). | 114 |
| 5.10 | Erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape finale du traitement multi-échelle (méthode 3 utilisée pour l'étape 1 et méthodes différentes pour les étapes suivantes). | 116 |
| 5.11 | MNT générés à la résolution SRTM - vue 3D. | 117 |
| 5.12 | Evolution des cartes de disparités, pour l'étape 1 du traitement multi-échelle | 119 |
| 5.13 | Profils de coefficients de corrélation pour un pixel exemple. | 120 |
| 5.14 | Produit des profils de coefficients de corrélation pour le pixel exemple. | 121 |
| 5.15 | Evolution des erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape 1 du traitement multi-échelle. | 122 |
| 5.16 | Evolution des erreurs (en m) entre les MNT générés et le MNT SRTM, pour l'étape finale du traitement multi-échelle. | 125 |
| 5.17 | MNT générés à la résolution SRTM - vue 3D. | 125 |
| 5.18 | Comparaison entre le SRTM sur-échantillonné à la résolution 30×30 mètres et le MNT généré | 126 |
| 5.19 | MNT généré à la résolution 30×30 mètres - vue 3D. | 127 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|--|-----|
| 1.1 | Principales missions aéroportées. | 11 |
| 1.2 | Principales missions satellitaires. | 12 |
| 3.1 | Erreurs déterminées par F.Leberl sur le site de Cordon la Graza avec différents couples d'images SIR-B. | 56 |
| 3.2 | Erreurs déterminées par Leberl sur le site du Mont Shasta avec différents couples d'images SIR-B. | 56 |
| 4.1 | Paramètres d'acquisition des images SIR-C stéréoscopiques. | 70 |
| 4.2 | Obtention des coordonnées géocentriques du pic de l'Agrenier (localisation directe). | 76 |
| 4.3 | Obtention des coordonnées image az_s et rg_s du pic de l'Agrenier sur l'image secondaire (localisation inverse). | 76 |
| 4.4 | Points d'amer utilisés pour le couple d'images stéréoscopiques PR17310 et PR17429. | 78 |
| 4.5 | Coordonnées des sommets obtenues par localisation directe et inverse et différence avec les coordonnées vraies. | 78 |
| 4.6 | Configuration 1 : effet du décalage d'un pixel en distance. | 92 |
| 4.7 | Configuration 1 : effet d'un décalage d'un pixel en azimut. | 92 |
| 4.8 | Configuration 2 : effet d'un décalage d'un pixel en distance. | 96 |
| 4.9 | Configuration 2 : effet d'un décalage d'un pixel en azimut. | 96 |
| 4.10 | Valeurs des décalages de pixels en azimut et en distance pour l'erreur minimum de localisation. | 96 |
| 4.11 | Erreurs de localisation trouvées après application du décalage en azimut et en distance. | 97 |
| 4.12 | Valeurs maximum, minimum et moyenne des erreurs de localisation sur 7 points d'amer | 97 |
| 4.13 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur le MNT généré | 99 |
| 4.14 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes - valeurs présentées dans [56] | 100 |
| 4.15 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes - valeurs présentées dans [52] | 101 |
| 5.1 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape 1. | 113 |
| 5.2 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape finale (méthodes différentes pour l'étape 1 et méthode classique pour les étapes 2 et 3). | 113 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.3 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape finale (méthode 3 utilisée pour l'étape 1 et méthodes différentes pour les étapes suivantes). | 116 |
| 5.4 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape 1. | 121 |
| 5.5 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape 1. | 123 |
| 5.6 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape finale. | 124 |
| 5.7 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur les MNT générés à l'étape finale. | 124 |
| 5.8 | Pourcentage d'erreurs et erreurs moyennes ϵ_{moy} (m) sur le MNT généré à l'étape finale. | 127 |
| B.1 | Paramètres de dimensionnement de l'image | 141 |
| B.2 | Paramètres de projection cartographique | 141 |
| B.3 | Paramètres d'enregistrement | 142 |

Bibliographie

- [1] G. La PRADE, « An analytical and experimental study of stereo for radar ». *Photogrammetric Engineering*, vol. 29, n° 2, pages 294 – 300, 1963.
- [2] L. C. GRAHAM, « Synthetic interferometer radar for topographic mapping ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, n° 6, pages 763 – 768, 1974.
- [3] R. L. WILDEY, « Topography from single radar images ». *Sciences*, vol. 224, pages 153 – 156, 1984.
- [4] D. L. SCHULER, J. S. LEE et G. De GRANDI, « Measurement of topography using polarimetric SAR images ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, n° 5, pages 1266 – 1277, 1996.
- [5] F. LEBERL, *Radargrammetric image processing*. Artech House, 1990.
- [6] M.I. SKOLNIK, *Radar Handbook*. McGraw-Hill, 1970.
- [7] E. POTTIER et J. SAILLARD, « Fondements mathématiques de la polarimétrie et son application au domaine du radar ». *Annales des télécommunications*, vol. 47, n° 7-8, pages 314 – 336, 1992.
- [8] L. POLIDORI, *Cartographie Radar*. Gordon and Breach Science, 1997.
- [9] A. MARTINI, *Téledétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à partir de données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 2005.
- [10] M. SOUMEKH, *Synthetic aperture radar signal processing*. Wiley Interscience, 1999.
- [11] F. ADRAGNA et JM. NICOLAS, *Traitement des images de RSO, sous la direction de H. Maître*. Hermès, 2001.
- [12] S. MÉRIC, *Étude de l'influence et de la correction des mouvements du porteur pour imagerie ROS*. Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées, Rennes, France, Janvier 1996.
- [13] I. TANNOUS, « Modélisation paramétrique de la géométrie de prise de vue radar à ouverture synthétique embarqué sur satellite ». Master's thesis, Université Paris 7, Décembre 1991.
- [14] L. NOCERA, *Reconstruction du relief en imagerie radar à ouverture de synthèse : stéréoscopie et ombrages*. Thèse de Doctorat, Université de Paris 7 Jussieu, 1996.
- [15] JP. DUFOUR, *Introduction à la géodésie*. Coll. ENSG-IGN, Hermès, 2001.
- [16] Y. BELGUED, *Amélioration de la qualité géométrique des images spatiales radar - Méthodes de localisation et restitution du relief par radargrammétrie*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000.

- [17] P. BECKMAN et A. SPIZZICHINO, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Artech House, 1987.
- [18] F.T. ULABY, *Microwave remote sensing, active and passive*. Artech House, 1981.
- [19] J.C. CURLANDER, *Synthetic Aperture Radar, Systems & Signal Processing*. J.A. Kong, Wiley, 1991.
- [20] L. FERRO-FAMIL, E. POTTIER et J. S. LEE, « Classification and Interpretation of Polarimetric Interferometric SAR Data ». In *IGARSS'02*, Juin 2002.
- [21] J.W. GOODMAN, « Some fundamental properties of speckle ». *Journal of the Optical society of America*, vol. 66, n° 11, pages 1145 – 1150, Novembre 1976.
- [22] J.G. PROAKIS, *Digital Communications, third edition*. MacGraw-Hill, 1995.
- [23] L. PORCELLO, N. MASSEY, R. INNES et J. MARKS, « Speckle reduction in synthetic aperture radar ». *Journal of the Optical Society of America*, vol. 66, n° 11, pages 1305 – 1311, 1976.
- [24] V.S. FROST, J. STILES, K. SHANMUGAN et J. HOLTZMAN, « A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise ». *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-4, n° 2, pages 157 – 166, Mars 1982.
- [25] J.S. LEE, « Refined filtering of image noise using local statistics ». *Computer Graphics and Image Processing*, n° 15, pages 380 – 389, 1981.
- [26] D. T. KUAN, A. A. SAWCHUK, T. C. STRAND et P. CHAVEL, « Adaptive noise smoothing filter for images with signal dependant noise ». *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 7, n° 2, pages 165 – 177, 1985.
- [27] D. T. KUAN, A. A. SAWCHUK, T. C. STRAND et P. CHAVEL, « Adaptive restoration of images with speckle ». *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. ASSP-35, n° 3, pages 373 – 383, 1987.
- [28] Y. WU et H. MAÎTRE, « A speckle suppression method for SAR images using maximum homogeneous region filtering ». In *IGARSS'90*, vol. III, (Washington), pages 2413 – 2416, 1990.
- [29] G. H. ROSENFELD, « Stereo radar techniques ». *Photogrammetric Engineering*, vol. 34, pages 586 – 594, 1968.
- [30] G. GRACIE, J. W. BRICKER, R. K. BREWER et R. A. JOHNSON, « Stereo Radar Analysis ». *U.S. Engineering Topography Laboratory*, vol. Report FTR-1339-1, 1970.
- [31] T. TOUTIN et L. GRAY, « State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data ». *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 55, pages 13 – 33, 2000.
- [32] H. A. ZEBKER et R. M. GOLDSTEIN, « Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations ». *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, pages 4993 – 4999, 1986.
- [33] R. M. GOLDSTEIN, H. A. ZEBKER et C. L. WERNER, « Satellite radar interferometry : two-dimensional phase unwrapping ». *Radio Science*, vol. 23, n° 4, pages 713 – 720, 1988.

- [34] R. F. HANSEN, *Radar interferometry*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [35] D. MASSONNET et T. RABAUTE, « Radar interferometry : limits and potential ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, n° 2, pages 455 – 464, 1993.
- [36] D. PETIT, *Extraction du « 3D » par interférométrie radar à haute résolution*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2004.
- [37] D. SMALL, C. WERNER et D. NUESCH, « Geocoding of ERS-1 INSAR-derived digital elevation models ». *EARSel Advances in Remote Sensing*, vol. 4, n° 2, pages 26 – 39 et I – II, 1995.
- [38] G. R. VALENZUELA, « Scattering of electromagnetic waves from a tilted slightly-rough surface ». *Radio Science*, vol. 11, n° 3, pages 1057 – 1066, 1968.
- [39] D. L. SCHULER, J. S. LEE et K. W. HOPPEL, « Polarimetric SAR image signatures of the ocean and Gulf Stream features ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, n° 5, pages 1210 – 1221, 1993.
- [40] B. HORN, *The psychology of computer vision - Chap. 4 : obtaining shape from shading information*. McGraw-Hill, 1975.
- [41] G. LA PRADE et E. LEONARDO, « Elevations from radar imagery ». *Photogrammetric Engineering*, vol. 35, n° 4, pages 366 – 371, 1969.
- [42] R. L. WILDEY, « Radarclinometry for the Venus radar mapper ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, n° 1, pages 41 – 50, 1986.
- [43] S. PAQUERAULT, *Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie*. Thèse de Doctorat, Télécom Paris, 1998.
- [44] F. LEBERL, « Accuracy analysis of stereo side looking radar ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 45, n° 8, pages 1083 – 1096, 1979.
- [45] V. KAUPP, L. BRIDGES, M. PISARUK, H. MACDONALD et W. WAITE, « Simulation of spaceborne stereo radar imagery : experimental results ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 21, n° 2, pages 400 – 405, 1983.
- [46] G. DOMIK, « Evaluation of radar stereoviewability by means of simulation techniques ». In *IGARSS'84*, vol. ESA-SP-215, pages 623 – 646, 1983.
- [47] H. RAMAPRIYAN, J. STRONG, Y. HUNG et C. MURRAY, « Automated matching pairs of SIR-B images for elevation mapping ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 24, n° 4, pages 462 – 472, 1986.
- [48] H. RAGGAM et K. GUTJAHR, « DEM generation using RADARSAT stereo data ». In *ADRO'98*, 1998.
- [49] S. SYLVANDER, B. PETITNICOLAS, D. COUSSON et J-C. SOUYRIS, « Evaluation of the potential of RADARSAT images to the production of digital terrain model by radargrammetry ». In *ADRO'98*, 1998.
- [50] F. JACQUIS, *Techniques de corrélation pour la radargrammétrie - Filtrage et détection de structures - Application à des images satellites ROS-ERS1*. Thèse de Doctorat, Université de Joseph Fourier - Grenoble 1, 1997.
- [51] P. PAILLOU et M. GELAUTZ, « Relief reconstruction from SAR stereo pairs : the “optimal gradient” matching method ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, n° 4, pages 2099 – 2107, Juillet 1999.

- [52] G. OLLER, *Introduction à l'imagerie par Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) - Détection et extraction de contours dans les images RSO - Génération de Modèles Numériques de Terrain par radargrammétrie*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [53] K. YORITOMO, « Methods and instruments for the restitution of radar pictures ». In *Proc. 12th International Society for Photogrammetry Congress*, 1972.
- [54] J. K. FULLERTON, F. LEBERL et R. E. MARQUE, « Opposite side SAR image processing for stereo-viewing ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, n° 9, pages 1487 – 1498, 1986.
- [55] L. ROGNANT, *Triangulation contrainte de Delaunay : application à la représentation de MNT et à la fusion de MNT radar*. Thèse de Doctorat, Université de Joseph Fourier - Grenoble 1, 2000.
- [56] E. HERVET, *Appariement d'images Radar à Synthèse d'Ouverture en condition radargrammétiques*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, 2000.
- [57] P. Van LAARHOVEN et E. AARTS, *Simulated annealing : theory and applications*. D. Reidel Publishing, 1985.
- [58] H. MÜHLENBEIN, *Local search in combinatorial optimization - Evolutionary algorithms : theory and applications*. Wiley Editions, 1993.
- [59] A. DIPANDA, S. WOO, F. MARZANI et J. M. BILBAULT, « 3-D shape reconstruction in an active stereo vision system using genetic algorithms ». *Pattern Recognition*, vol. 36, pages 2143 – 2159, 2003.
- [60] P. FUA, « Combining stereo and monocular information to compute dense depth maps that preserve discontinuities ». In *IJCAI 1991*, (Sydney), pages 1292 – 1298, 1991.
- [61] D. MARR et E. HILLDRETH, « A theory of edge detection ». *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. B207, pages 187 – 217, 1980.
- [62] C. SCHMID, *Appariement d'images SAR par invariants locaux de niveaux de gris - Application à l'indexation d'une base d'objets*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [63] O. GERMAIN, *Segmentation d'images radar : caractérisation des détecteurs de bord et apport des contours actifs statistiques*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille, 2001.
- [64] J-P. DJAMDJI et A. BIJAOU, « Disparity analysis : a wavelet transform approach ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, n° 1, pages 67 – 76, Janvier 1995.
- [65] R. FJØRTOFT, *Segmentation d'images radar par détection de contours*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, 1999.
- [66] M. DENOS, « A pyramidal scheme for stereo matching SIR-B imagery ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 2, pages 387 – 392, 1992.
- [67] P. BURT et E. ADELSON, « The laplacian pyramid as a compact image code ». *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-31, n° 4, pages 532 – 540, Avril 1983.

- [68] I. DOWMAN, C. PU-HUAI, O. CLOCHEZ et G. SAUNDERCOCK, « Heighting from stereoscopic ERS-1 data ». In *Proceedings Second ERS-1 Symposium*, (Hambourg), pages 609 – 614, 1993.
- [69] E. SIMONETTO, *Extraction 3-D de structures industrielles sur des images Ramses haute résolution par radargrammétrie*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 2002.
- [70] G. BENELLI, A. GARZELLI et A. MECOCCHI, « Complete processing system that uses fuzzy logic for ship detection in SAR images ». *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, vol. 141, n° 4, pages 181 – 186, Août 1994.
- [71] T. TOUTIN, « Error Tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 5, pages 2227 – 2238, 1999.
- [72] L. POLIDORI et P. ARMAND, « On the use of SAR image simulation for the validation of topographic mapping techniques ». *EARSeL advances in remote sensing*, vol. 4, n° 2, pages 40 – 48, 1995.
- [73] L. RENOARD et F. PERLANT, « Geocoding SPOT products with ERS-1 SAR geometry ». In *Proceedings Second ERS-1 Symposium*, vol. ESA SP-361, (Hambourg), pages 653 – 658, 1993.
- [74] D. HU, J. LI, Y. CHEN, L. DENG, K. RAMLIB et G. PENG, « Radargrammetry DEM from RADARSAT imageries and accuracy validation, a case study in Malaysian rainforest areas ». *Proceedings of SPIE*, vol. 6419, pages 641906/1 – 641906/8, 2006.
- [75] Y. CHEN, P. SHI, J. LI, L. DENG, D. HU et Y. FAN, « DEM accuracy comparison between different models from different stereo pairs ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, pages 4217 – 4224, Octobre 2007.
- [76] B. PRADHAN, T. BOLCH et M.F. BUCHROITHNER, « Elevation modeling using radargrammetry : case of study from Malaysia ». In *Proc. 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, vol. 6419, pages 641906.1 – 641906.8, 2009.
- [77] T. TOUTIN, « RADARSAT-2 stereoscopy and polarimetry for 3D mapping ». *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n° 3, pages 496 – 503, 2004.

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse : Génération de MNT d'une zone montagneuse par radargrammétrie et approche multi-fenêtres

Nom Prénom de l'auteur : FAYARD Franck

Membres du jury : Monsieur NICOLAS
Monsieur WANG
Monsieur POTTIER
Monsieur DUMONT
Monsieur GARELLO
Monsieur MERIC

Président du jury : *Mr RENE GARELLO*

Date de la soutenance : 08/02/2010

Reproduction de la thèse soutenue :

- Thèse pouvant être reproduite en l'état
 Thèse ne pouvant être reproduite
 Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées


Le Directeur,

27
A. JIGOREL

Pour le Directeur,
par délégation,
Le Directeur des Formations,

Eric RAGNEAU

Rennes, le 08/02/2010

Signature du Président du jury



Résumé

Abstract

L'imagerie par Radar à Synthèse d'Ouverture (ROS) offre de nombreux axes de recherche en télédétection. Les capteurs ROS satellitaires peuvent fournir des images haute résolution, de jour comme de nuit, par tout temps. Parmi toutes les utilisations possibles de ces images radar, nous nous intéressons ici à l'obtention de Modèles Numériques de Terrain (MNT) à partir de couples d'images ROS stéréoscopiques : la radargrammétrie.

Une application radargrammétrique nécessite la maîtrise de la géométrie de la prise de vue, de la mise en correspondance (ou appariement) des images ainsi que de la reconstruction géométrique par résolution des équations de localisation multi-scènes. L'appariement se fait par corrélation, de façon similaire aux méthodes de photogrammétrie utilisées en imagerie optique. Pour améliorer les performances lors de l'appariement, il est intéressant de mettre en oeuvre un filtrage du speckle (bruit multiplicatif propre aux images radar), ainsi qu'une technique pyramidale afin d'accélérer les traitements et de réduire les erreurs d'appariement. De plus, l'utilisation de la mise en géométrie épipolaire permet de réduire la zone de recherche.

Dans la zone d'étude à forts reliefs qui nous concerne, ces méthodes permettent de générer un MNT satisfaisant mais encore imprécis. Les méthodes tirées de la photogrammétrie ne sont pas suffisantes pour être directement appliquées sur les images radar. Des méthodes spécifiques sont nécessaires et nous proposons alors une nouvelle approche, qui consiste à utiliser des fenêtres de corrélation de tailles différentes : l'approche multi-fenêtre. Nous procédons notamment à une dilatation en distance de la taille de ces fenêtres, afin de compenser le phénomène de compression d'une image à l'autre. Nous montrons que cette nouvelle méthode permet de fiabiliser l'appariement et d'améliorer les résultats de reconstruction altimétrique.

Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery offers many ways of research in remote sensing. The SAR satellite sensors can provide high resolution images whatever the weather is, by day or by night. Among all the possible uses of radar images, we focus here on the way to obtain Digital Elevation Models (DEM) from pairs of stereoscopic SAR images: the radargrammetry.

Radargrammetric application requires mastery of several steps: viewing geometry, image matching and geometric reconstruction solving 3D stereo intersection equations. The image matching method is an area correlation, coming from photogrammetric methods used in optical imagery. To improve performance during the matching step, it's interesting to implement speckle (particular multiplicative noise in radar images) filtering and to use a pyramid scheme in order to speed up the process and to reduce matching errors. Moreover, using epipolar geometry reduces the search area.

In our study area with high relief, these methods can generate a quite good DEM but not enough accurate. The methods coming from photogrammetry are not sufficient to be directly applied to radar images. Specific methods are needed, so we propose a new approach using different correlation windows sizes: the multi-window approach. We particularly reduce the correlation windows along the range axis depending on the image range compression. This technique allows to make a reliable matching and to improve the reconstruction results accuracy.