



HAL
open science

Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie

Sophie Paquerault

► **To cite this version:**

Sophie Paquerault. Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie. Interface homme-machine [cs.HC]. Télécom ParisTech, 1998. Français. NNT: . tel-00005664

HAL Id: tel-00005664

<https://pastel.hal.science/tel-00005664v1>

Submitted on 5 Apr 2004

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.



Département TSI

*Restitution du relief à partir d'images radar
par radarclinométrie*

Sophie PAQUERAULT

06 avril 1998

Jury

Mme Katia Laval (Président)
Mme Isabelle Herlin (Rapporteur)
M. Hervé Le Men (Rapporteur)
M. Laurent Polidori (Examineur)
M. Jean-Paul Rudant (Examineur)
M. Henri Maître (Directeur de thèse)

Table des matières

1	Introduction	13
2	Acquisition SAR et Présentation des Données	19
2.1	Principes du SAR	19
2.1.1	Intérêt des capteurs radar par rapport aux capteurs optiques	19
2.1.2	Signal délivré par l'antenne	20
2.2	Traitements SAR	25
2.2.1	Traitement en site	25
2.2.2	Traitement en azimut	26
2.3	Images radar utilisées	27
2.3.1	Les systèmes d'acquisition	27
2.3.2	Les régions du globe	29
3	Lien Géométrie-Radiométrie des Images Radar	33
3.1	Etude de la géométrie des images radar	33
3.1.1	Les distorsions géométriques	33
3.1.2	Approximation en onde plane	37
3.1.3	La notion de socle et de parcelle	38
3.1.4	Diverses relations géométriques	39
3.2	Etude de la radiométrie des images radar	41
3.2.1	Les caractéristiques radiométriques	41
3.2.2	Définitions de quelques unités radiométriques utiles	45
3.2.3	Modèle d'éclairement dans le cas du radar	48
4	Procédé de la Restitution du Relief	53
4.1	Expression de l'intensité rétrodiffusée	53
4.2	Stratégie d'estimation des altitudes	55
4.2.1	Justification de l'équation (Eq 4.10)	56
4.2.2	Résolution de l'équation (Eq 4.10).	57
4.2.3	Méthode d'intégration	58
4.2.4	Autre méthode d'intégration	60
4.3	L'approche markovienne	61
4.3.1	Principe	61
4.3.2	Restauration markovienne	63

4.3.3	Calcul des angles α et β	67
4.3.4	Choix des paramètres	68
4.3.5	Importance de l'initialisation	71
4.4	Une meilleure initialisation	73
4.4.1	Principe	73
4.4.2	Mise en œuvre	76
4.5	Exemple d'application	76
5	Quantification des Reliefs Obtenus à partir d'Images Radar Simulées	83
5.1	Principe et méthode d'une simulation	83
5.1.1	Simulation de relief	83
5.1.2	Simulation d'une image radar sans speckle	84
5.1.3	Simulation d'une image radar avec speckle	86
5.1.4	Définition des diverses géométries	88
5.2	Reconstruction par simple intégration selon §4.2	88
5.2.1	Reconstruction à partir d'images radar simulées sans speckle	88
5.2.2	Reconstruction à partir d'images radar simulées avec speckle	91
5.3	Reconstruction avec régularisation selon §4.3	93
5.3.1	Reconstruction à partir d'images radar simulées sans speckle	93
5.3.2	Reconstruction à partir d'images radar simulées avec speckle	95
5.4	Conclusion	97
6	Quantification des Reliefs Obtenus à partir d'Images Radar Réelles	101
6.1	Comparaison des reliefs restitués	101
6.1.1	Estimation des erreurs	101
6.1.2	Remarques sur les divers paramètres SAR	106
6.2	Comparaison à des données cartographiques	107
6.2.1	Utilisation d'un MNT	107
6.2.2	Utilisation d'une carte topographique	110
6.2.3	Utilisation d'un MNT engendré à partir des courbes de niveau	115
6.3	Conclusion	122
7	Retour sur Quelques Hypothèses	125
7.1	Radiométrie de sol plat	125
7.1.1	Considérations statistiques	126
7.1.2	Considérations analytiques	128
7.1.3	Evaluation du basculement	131
7.1.4	Démarche expérimentale	133
7.2	Cas d'une image non-homogène	138
7.2.1	Objets de petite taille	138
7.2.2	Mélange de couverts séparés	140
7.2.3	Evolution lente du couvert	141
7.3	Conclusion	141

8	Modèle de Rétrodiffusion	143
8.1	Les principaux mécanismes de réflexion	143
8.1.1	Position du problème	143
8.1.2	Information issue de l'image SAR	145
8.1.3	Rappels d'électromagnétisme	148
8.2	Estimation du modèle de rétrodiffusion	151
8.2.1	Evaluation par l'expérience	151
8.2.2	Evaluation par les reliefs restitués	153
8.3	Conclusion	161
9	Conclusion	163
A	Limite sur la Longueur en Site d'une Parcelle	167
A.1	Onde sphérique	167
A.2	Passage de l'onde sphérique à l'onde plane	169
B	D'autres Résultats	171
B.1	La Guyane	171
B.1.1	Zones 1, 2 et 3	171
B.1.2	Zones 4	171
B.1.3	Zone 5	173
B.1.4	Zone 6	176
B.2	France Métropolitaine	176
B.3	Le Cameroun	178

Résumé

La disponibilité des images radar à ouverture synthétique ouvre la possibilité de cartographier des zones du globe difficilement accessibles, et généralement peu visibles par les systèmes satellitaires optiques du fait d'une couverture nuageuse souvent importante. C'est le cas des régions tropicales et équatoriales, régions du globe qui sont aussi très mal cartographiées.

L'objectif de la thèse est de proposer un procédé de reconstruction à partir d'images radar donnant accès à des informations altimétriques des surfaces terrestres. Face au succès de deux grandes méthodes de reconstruction du relief, l'interférométrie et la radargrammétrie, nous exploitons en détails dans nos travaux une troisième méthode, la radarclinométrie. Son principal avantage est de permettre le calcul de données altimétriques à partir d'une seule et unique image SAR.

Notre procédé de restitution développé comporte deux phases principales, une phase d'intégration suivie d'une phase dite correctrice qui consiste en une restauration markovienne, permettant de vérifier la condition de continuité des surfaces du terrain. Les reliefs résultant de ce procédé sont ensuite largement évalués qualitativement et quantitativement, par des moyens très divers fonction des données de référence utilisées. La dernière étape du travail porte sur la vérification de deux principales hypothèses, portant l'une sur le modèle de rétrodiffusion choisi et l'autre sur la connaissance de la radiométrie d'un sol de référence. Cette vérification donne alors lieu au développement de plusieurs méthodes d'estimation.

La thèse a permis d'apporter des solutions originales pour le développement de la radarclinométrie. Elle permet d'obtenir, au prix de coûts humains et informatiques modestes, des reliefs de bonne qualité visuelle, sur des régions du globe, telles que la Guyane française, pour lesquelles les deux autres méthodes de restitution se soldent par un échec.

Abstract

Synthetic aperture radar (SAR) is an active ranging system which is very sensitive to terrain shape. The use of SAR images acquired by this system enables mapping regions which are not easy to accessed, or which are generally not visible with optical systems. This is the case of the tropical and equatorial regions, which frequently have significant cloudy cover, and for which precise maps are often not available, since the data are totally unknown.

The objective of our research is to propose a strategy for computing elevation models from SAR images. We first give details of radarclinometry, an existing method whose main advantage is to establish elevation data of a given imaged ground with the use of only one single radar image. In this regard, it is superior to the two widely used reconstruction methods of interferometry and radargrammetry.

Our reconstruction method consists in using two relatively fast steps, the first step corresponding to a line integration process, and the second to a Markovian restoration in order to assure that the surface is continuous. The elevation model obtained by this process are then qualitatively and quantitatively evaluated, using various techniques that rely on the reference data used.

The final aspect of our research investigates the validity of our underlying assumptions, a first one concerning the backscatter model chosen, and the second one that supposes the flat ground intensity is known. This study gives rise to the development of various estimation methods.

Our research provides original solutions for the radarclinometry process implementation. Elevation models can be computed easily for various surfaces of the globe such as French Guyana, where other reconstruction methods fail.

Remerciements

REMERCIER est nécessaire à tout travail qui réussit à voir le jour. Une page de ma vie est en train de se tourner, me laissant seule face à un avenir difficile à imaginer, car imprécis au moment où ces mots sortent de mon esprit. Tous ceux que je remercie sincèrement le savent bien, et ceci sans avoir à préciser le moindre nom, prénom ou surnom. Mais, il vous serait difficile à vous, lecteurs de ce manuscrit, de le savoir, aussi vais-je vous y aider en vous confiant quelques indices.

Tout d'abord, ce long travail n'aurait peut-être pas abouti si je n'avais pas eu l'entière confiance de mon directeur de thèse, Monsieur Henri Maître. Qu'il se sache remercié non seulement pour cette confiance mais également pour avoir su motiver mes neurones par des mots et des conseils qui seront toujours les bienvenus. Merci d'avoir cru en la réalité de la reconstruction du relief par radarclinométrie, technique qui avait très peu de succès au sein de la communauté scientifique.

L'aboutissement de ce travail a vu également le jour grâce au jury, qui a bien voulu y apporter sa caution scientifique. De ce fait, je remercie : la présidente du jury Madame Katia Laval, les deux rapporteurs Madame Isabelle Herlin et Monsieur Hervé Le Men et également les examinateurs Monsieur Laurent Polidori et Monsieur Jean-Paul Rudant.

Bien que tout thésard se sente généralement seul dans ses recherches, il bénéficie toutefois d'une écoute constante de la part de son entourage. Je me dois donc de remercier l'ensemble des permanents du Département TSI de l'E.N.S.T., et plus sûrement mes nombreux amis thésards/postdocs/invités/stagiaires pour avoir su égayer ma vie d'étudiante.

Tout au long de cette thèse, j'ai vraisemblablement été "invivable" par mes sautes d'humeur et négligente envers ma famille, en laissant passer le travail au premier plan. Qu'ils me pardonnent de tout ce que je leur ai fait subir et je les remercie vivement de la patience dont ils ont fait preuve à mon égard. Merci à mes parents, soeur, beau-frère, nièce, neveux, grands-parents, et à mon plus fidèle compagnon à qui seule la parole manque.

Enfin, merci à ceux dont le nom m'est parfois inconnu et qui ont contribué efficacement, par leur sourire, à rendre mes journées plus sereines et à vous qui êtes en train de lire ce début de thèse.

Merci à tous.

« *L'humeur donne du relief aux idées.* » Staël

« *L'auteur, dans son œuvre, doit être présent partout, et visible nulle part.* » Flaubert

A MATHILDE, VINCENT, ET THOMAS

Chapitre 1

Introduction

Depuis ces vingt dernières années, l'utilisation de données satellitaires pour les applications de télédétection est devenue de plus en plus populaire au sein des groupes de recherche. Sans nul doute, les avancées technologiques ont été marquées par le développement de systèmes d'acquisition actifs. Ces derniers constituent une preuve tangible d'un désir sans cesse plus important de mieux connaître notre environnement, aussi bien proche qu'éloigné, et plus précisément les différentes matières qui le constituent ainsi que sa morphologie. Le développement des capteurs radar, complémentaire des systèmes optiques, contribue efficacement à un apport de connaissance du milieu naturel. Plusieurs causes peuvent être citées, les principales étant la disponibilité des images qu'ils délivrent, et ceci quelles que soient les conditions météorologiques (zones tropicales et équatoriales à forte couverture nuageuse permanente), la couverture des latitudes extrêmes (pays nordique à faible luminosité hivernale), et la possibilité d'acquisitions de jour comme de nuit. Par ailleurs, ces causes expliquent l'usage actuel intensif des acquisitions radar plutôt qu'optiques.

Les domaines d'application de l'imagerie radar sont très divers. Citons en exemple, la surveillance de l'environnement (catastrophes naturelles ou humaines,...), l'occupation des sols (estimations de surfaces cultivées, rendements agricoles,...), la géologie (géomorphologie, prospection minière et pétrolière,...), l'océanographie (classification des zones côtières, état de surface,...), la cartographie, et la défense des territoires. Dans notre travail, nous nous intéressons tout particulièrement à l'un de ces domaines : il s'agit de la cartographie, et plus précisément du développement d'une technique monoscopique : la radarclinométrie. Les données radar révèlent particulièrement bien la présence de relief, ou encore l'orientation du terrain vis-à-vis du capteur. La méthode que nous proposons utilise pleinement cette information. Avant de détailler plus amplement l'objectif de nos travaux, il est toutefois nécessaire de préciser l'intérêt d'élaborer des cartes du globe.

La réalisation de cartes passe par une première étape de création d'un fond topographique, nécessitant la mesure des altitudes. Ces données d'altitude apparaissent de plus en plus importantes pour l'étude et la surveillance de l'environnement, par leur incidence sur les grands facteurs de l'équilibre écologique : couvert végétal, précipitations et ruissellements, cultures et déforestation, implantations industrielles et

minières, urbanisation, réseaux viaires de tous types. De plus, on peut encore indiquer que de nombreuses régions terrestres sont toujours à l'heure actuelle dites mal-connues telles que le Brésil, la Guyane, certaines régions d'Afrique, ..., du fait qu'aucune carte n'ait été établie.

Dans notre étude, nous proposons de restituer le relief par radarclinométrie, ce qui permettra très certainement de contribuer à la constitution des fonds topographiques manquants pour certaines régions du globe. Cette méthode, ne nécessitant l'usage que d'une seule et unique image radar, se trouve concurrente de deux autres procédés de restitution : l'interférométrie radar et la radargrammétrie.

- L'interférométrie, méthode récente et moderne de restitution, a été fondée par H.A.Zebker en 1986 [ZEBK-86]. C'est une méthode spécifique au radar qui utilise l'information différentielle de phase du signal estimée à partir de deux acquisitions du capteur. Elle fait à l'heure actuelle l'objet de très nombreux travaux de recherches [MASS-93], [TROU-96]. Cette popularité s'explique par ses performances tout à fait exceptionnelles permettant de déterminer avec une haute précision les altitudes sur des champs parfois très vastes. Grâce à son mode différentiel, elle autorise également un suivi très précis de l'évolution du relief, tel que le suivi de la lave lors de l'éruption d'un volcan ou l'analyse d'un tremblement de terre. Néanmoins, la mise en œuvre des techniques interférométriques est encore très complexe, et comporte de multiples problèmes toujours mal résolus. Les principaux sont la difficulté d'obtenir des couples interférométriques à l'aide des satellites actuellement en orbite et non dédiés à cette application, et le domaine restreint de paysages où elle peut s'appliquer (reliefs peu prononcés, couvert végétal ras, ...). Par ailleurs, si certaines conditions ne sont pas remplies, cette méthode peut alors conduire à des résultats médiocres. De plus, certains phénomènes encore mal compris en limitent la fiabilité [DUPO-97].
- La radargrammétrie est une technique stéréoscopique appliquée aux images radar [LEBE-90], également très actuelle du fait d'une mise en œuvre relativement simple. Elle est également plus appropriée pour la reconstruction de reliefs plus accentués. Néanmoins, la principale difficulté de cette méthode provient de la mise en correspondance entre les images radar. En effet, par la présence d'un important bruit dans de telles données, cette technique s'appuie sur des processus de corrélation plus complexes que ceux utilisés sur les images optiques. D'autre part, sachant que ses capacités en résolution altimétrique sont limitées, cette méthode est donc généralement utilisée conjointement avec d'autres techniques de restitution [NOCE-96].

Le principe de la radarclinométrie consiste à évaluer les paramètres géométriques d'un terrain à partir de l'intensité rétrodiffusée vers le satellite. On peut également indiquer que cette méthode de reconstruction peut tirer profit d'images acquises par des capteurs de résolution, de polarisation et de bandes très différentes, ainsi que

d'orbites ascendantes et descendantes. Ces qualités ne permettent pas d'expliquer pourquoi la radarclinométrie a été moins étudiée que les deux autres techniques sur les images radar. C'est en partant de ce dernier constat que nous proposons l'étude complète et le développement de cette méthode.

La radarclinométrie découle de nombreux travaux de *Shape from shading* réalisés dans le domaine de l'imagerie optique. La forme à partir de l'ombrage est une technique classique permettant d'établir la carte d'altitude d'une surface, partant d'une carte de lumières réfléchies par cette surface de réflectance bidirectionnelle connue. Explorée par B.Horn dès les années 70 [HORN-75], de nombreux travaux théoriques lui ont été consacrés, et depuis une dizaine d'années, ses capacités sont raisonnablement connues. On connaît d'une part des schémas mathématiques efficaces pour résoudre un problème intrinsèquement mal-posé (pas d'unicité de la solution locale). On sait également le rôle des conditions aux limites, des solutions initiales et des singularités dans la résolution du problème. En revanche, on maîtrise encore mal le rôle du bruit et de la discrétisation dans la recherche d'une solution [HORN-90]. On connaît surtout très mal la façon d'adapter le *Shape from shading* aux scènes complexes composées de matériaux divers.

Dans le domaine de l'imagerie radar, R.L.Widley a été le premier à transposer ces méthodes: "*Thus, as radargrammetry is to photogrammetry, so radarclinometry is to photoclinometry*" [WIDL-86a]. Cette phrase résume rigoureusement l'état d'esprit dans lequel il a mené ses recherches. Reprenant les travaux du *shape from shading*, il les a appliqués aux systèmes de visée du radar avec beaucoup de succès lors d'application sur les paysages de Vénus rapportés par la sonde Magellan [WIDL-86b]. Mais, il faut dire que, bien évidemment, ses résultats n'ont pu recevoir à ce jour une véritable validation sur le terrain. Malgré cette entrée en scène remarquée, et face à l'avancée des techniques interférométriques, la radarclinométrie a fait alors l'objet de très peu de travaux de recherche. R.T.Frankot et R.Chellappa [FRAN-87], [FRAN-88], [FRAN-90] ont proposé diverses variantes de l'algorithme de Brooks et Horn, certaines tirant profit, en particulier, de la connaissance de quelques données altimétriques à basse résolution. Plus récemment, L.Nocera [NOCE-96] a adopté un modèle ascendant de résolution qui inverse l'équation radiométrique par gradient conjugué sous une contrainte de continuité dans une fenêtre. M.Tonon [TONO-93] d'une part et P.Vissière [VISS-94] ont porté leur attention sur le rôle du modèle de réflectométrie radar par une évaluation manuelle ou automatique de la pente. Enfin, H.Taud [TAUD-95] a proposé une technique approchée de développement de l'altitude le long des lignes en distance, utilisant une simple sommation de l'intensité de la réflectance radar. Bien que la radarclinométrie a suscité très peu de travaux, ses résultats (Fig 1.1) apparaissent convainquants quant à la robustesse de cette technique, mais restent toutefois succincts quant au nombre d'applications qui ont été réalisées.

1. La radargrammétrie est à la photogrammétrie, ce que la radarclinométrie est à la photoclinométrie.

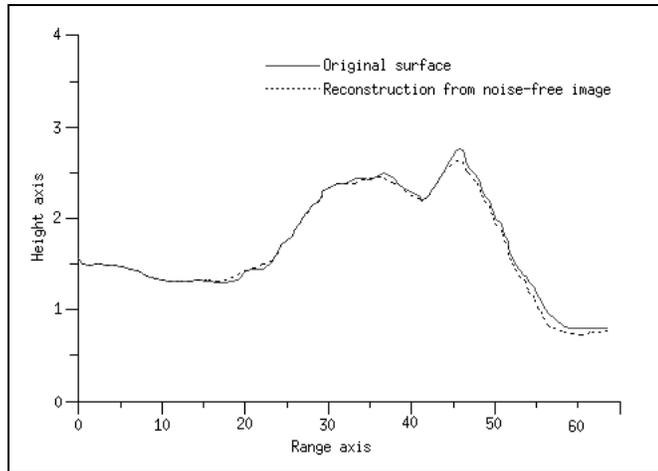


FIG. 1.1 – *Profils altimétriques de coupes extraites de la carte d'altitude obtenue par R.T.Frankot, et du modèle de référence (schéma extrait de [FRAN-87]). Les unités n'ont pas été précisées par l'auteur.*

A partir de ces travaux de référence, nous proposons de reprendre en détail le développement de la méthode de la radarclinométrie, afin d'en établir un procédé original permettant d'avoir accès rapidement à des données d'altitude du terrain. Pour cela, la démarche qui va être suivie au cours de nos travaux peut se regrouper en 4 principales étapes.

- La première étape, rassemblant les chapitres 2 et 3, donne succinctement des éléments sur le principe du fonctionnement des systèmes radar satellitaires, et sur l'analyse de l'image délivrée par un tel système. Ces deux études vont permettre d'identifier les diverses contraintes de la méthode de reconstruction, et certaines hypothèses utiles pour établir la relation de base de nos travaux qui relie la radiométrie fournie par l'image radar aux paramètres liés à l'orientation du terrain.
- Cette relation de base est plus amplement étudiée et utilisée au cours de la seconde étape qui fait l'objet du chapitre 4. La stratégie de reconstruction proposée comprend 3 phases distinctes. Une première phase d'inversion nécessitant de poser une hypothèse sur la connaissance de la radiométrie d'un sol de référence, puis d'intégration, permet l'obtention d'une première carte d'altitude. Cette dernière souffrant de nombreux défauts est alors corrigée dans une deuxième phase de restauration markovienne. Les résultats de cette phase sont d'une part très satisfaisants, mais nous démontrons la nécessité d'avoir une bonne initialisation. De ce fait, nous présentons dans la dernière phase, une méthode appropriée à fournir une carte d'altitude initiale correcte et réaliste .
- Comme toute méthode de restitution existante, le procédé développé demande à être validé. Cette troisième étape, regroupant les chapitres 5 et 6, présente deux tech-

niques d'évaluation ; l'une d'elles utilise des images radar simulées, l'autre diverses données cartographiques. Malgré tous les moyens employés lors de cette évaluation, il ne nous est malheureusement pas possible de conclure quant à la précision des cartes d'altitude obtenues par notre méthode de restitution.

- Enfin, une dernière étape porte sur la justification de deux grandes hypothèses posées au cours de nos travaux. la première concerne la connaissance d'une radiométrie de référence, et la seconde sur la vérification de la validité du modèle de rétrodiffusion employée. Ceci est largement détaillé au chapitre 7 et 8, donnant lieu à des procédés d'estimation.

Chapitre 2

Acquisition SAR et Présentation des Données

Ce chapitre présente brièvement nos connaissances sur le principe et les divers traitements du radar à ouverture synthétique. Nombreux sont les ouvrages qui traitent de ce mode d'imagerie. Parmi ceux-ci, nous avons utilisé [SKOL-70], [ELAC-88], [FITC-88], [JUNG-89], [CURL-91], [OLMS-93] et [HARD-95]. Précisons que les notions décrivant l'acquisition SAR ne sont données qu'à titre indicatif, aucune utilisation majeure n'en sera faite par la suite. En revanche, nous terminerons ce chapitre par la présentation des systèmes SAR embarqués sur satellite et par un bref descriptif des régions sur lesquelles les tests de la radarclinométrie seront effectués.

2.1 Principes du SAR

2.1.1 Intérêt des capteurs radar par rapport aux capteurs optiques

Le radar (**radio detection and ranging**) est un système actif centimétrique de télédétection. Le sens actif rend compte de l'autonomie du radar ; il délivre ses propres faisceaux d'ondes électromagnétiques (émetteur) et capte les ondes rétrodiffusées par les éléments initialement illuminés par son faisceau d'ondes (récepteur). Par comparaison, les capteurs optiques sont des systèmes passifs puisqu'ils jouent uniquement le rôle de récepteur, et de ce fait, utilisent généralement une source lumineuse naturelle telle que le soleil, ce qui limite leur application. Le radar a donc la possibilité de réaliser des acquisitions de jour comme de nuit, fait d'autant plus important que certaines régions terrestres, situées aux pôles, souffrent du manque d'ensoleillement une grande partie de l'année. Pour la même raison, ce système actif a également permis de grands progrès dans l'étude des planètes et divers objets célestes du système solaire. A ce titre, on peut citer la bonne performance technique en matière de cartographie de la sonde Magellan [FORD-93].

Le caractère actif n'est pas le seul avantage qui fait que l'on utilise de plus en plus le système radar. Le caractère centimétrique a également son importance. Le radar opère aux petites fréquences du spectre électromagnétique, fréquences comprises

entre 300GHz et 1GHz ce qui correspond à des longueurs d'onde respectives de 1mm et 30cm. Cette portion du spectre (Fig 2.1) est d'autant plus avantageuse pour l'imagerie, qu'à ce niveau, il n'y a pas ou peu d'atténuation atmosphérique. Ceci rend ainsi possible les acquisitions SAR quelles que soient les conditions météorologiques ce qui n'est pas le cas des capteurs optiques et Infra-Rouge.

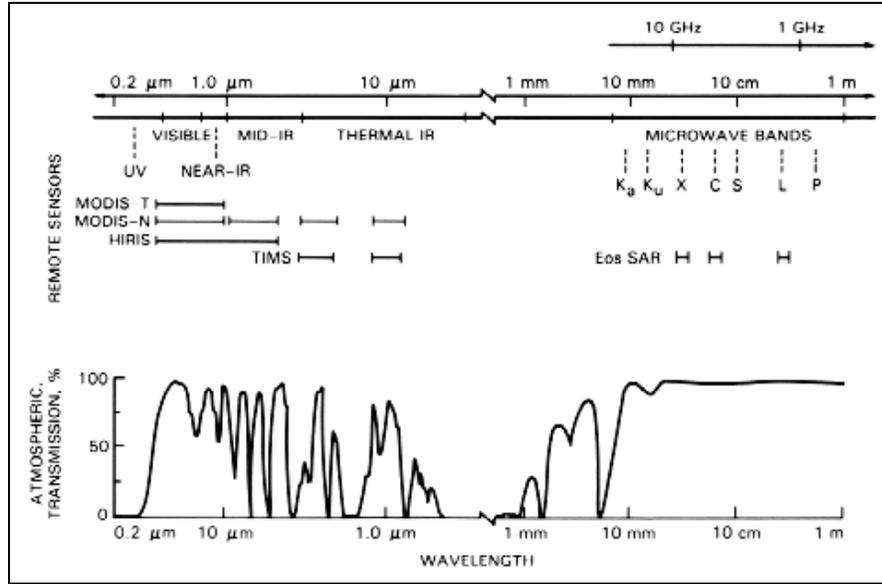


FIG. 2.1 – Spectre électromagnétique et atténuation atmosphérique (graphique extrait de [RICA-96]).

2.1.2 Signal délivré par l'antenne

Forme du signal émis

Le système radar à visée latérale délivre des impulsions d'énergie, chacune illuminant une région sur la surface de la terre. Ces impulsions sont émises à un rythme régulier couramment appelé FRI (**F**réquences de **R**épétition des **I**mpulsions) de sorte qu'une même région au sol soit illuminée de nombreuses fois, permettant ainsi de procéder au traitement de la synthèse d'ouverture.

La forme de l'onde émise par le radar est donc composée de N impulsions de durée τ_p , et de bande passante Δf . Ces impulsions sont espacées d'un intervalle $\Delta\tau_p$ en temps. La forme mathématique de la $n^{\text{ième}}$ impulsion est :

$$s_n(t) = a(t) \cos(2\pi(ft + \frac{1}{2}\alpha t^2)) \quad (2.1)$$

avec $a(t)$ l'enveloppe des impulsions, f la fréquence, α coefficient de modulation de la fréquence tel que : $\alpha = \Delta f/\tau_p$, et t le temps mesuré à partir du centre de l'émission d'une impulsion ($t_c = n\Delta\tau_p$) tel que : $-\tau_p/2 \leq t \leq \tau_p/2$.

La surface de terrain illuminée par une impulsion est couramment appelée empreinte (*footprint*). Deux directions définissent l'empreinte :

- *direction en site (ou distance)* : repérée par la direction de la projection de la visée du radar au sol. Sur cet axe, l'empreinte définit la fauchée.
- *direction azimutale* : repérée par la trajectoire du satellite.

Paramètres utiles

A partir de la figure 2.2 schématisant le principe de visée du radar, définissons un certain nombre de paramètres utilisés tout au long de ce manuscrit¹ :

- H_s : altitude du satellite (*),
- L_{sar} : longueur de l'antenne SAR (*),
- l_{sar} : largeur de l'antenne SAR (*),
- V_s : vitesse du satellite (*),
- λ : longueur d'onde (*),
- θ : angle moyen entre l'axe central du lobe et le nadir (*),
- $\delta\theta$: ouverture du lobe en site (**),
- $\delta\theta_a$: ouverture du lobe en azimut (**),
- τ_p : durée d'une impulsion (*),
- L_f : longueur de la portion de terrain illuminée par le radar ou fauchée (**),
- l_f : largeur de la portion de terrain illuminée par le radar (**),
- r_f : distance entre le point central de la surface au sol illuminée et l'antenne (**),
- (OX) : axe horizontal perpendiculaire à la trajectoire du satellite et appelé axe en site (ou distance),
- (OY) : axe azimutal, axe au sol parallèle à la trajectoire du satellite,
- (OZ) : axe du nadir.

1. Deux indices (*) et (**) sont utilisées pour désigner la nature de certains paramètres. Le premier (*) indique que le paramètre est lié au choix du constructeur ; le deuxième (**) indique que le paramètre est lié aux paramètres (*).

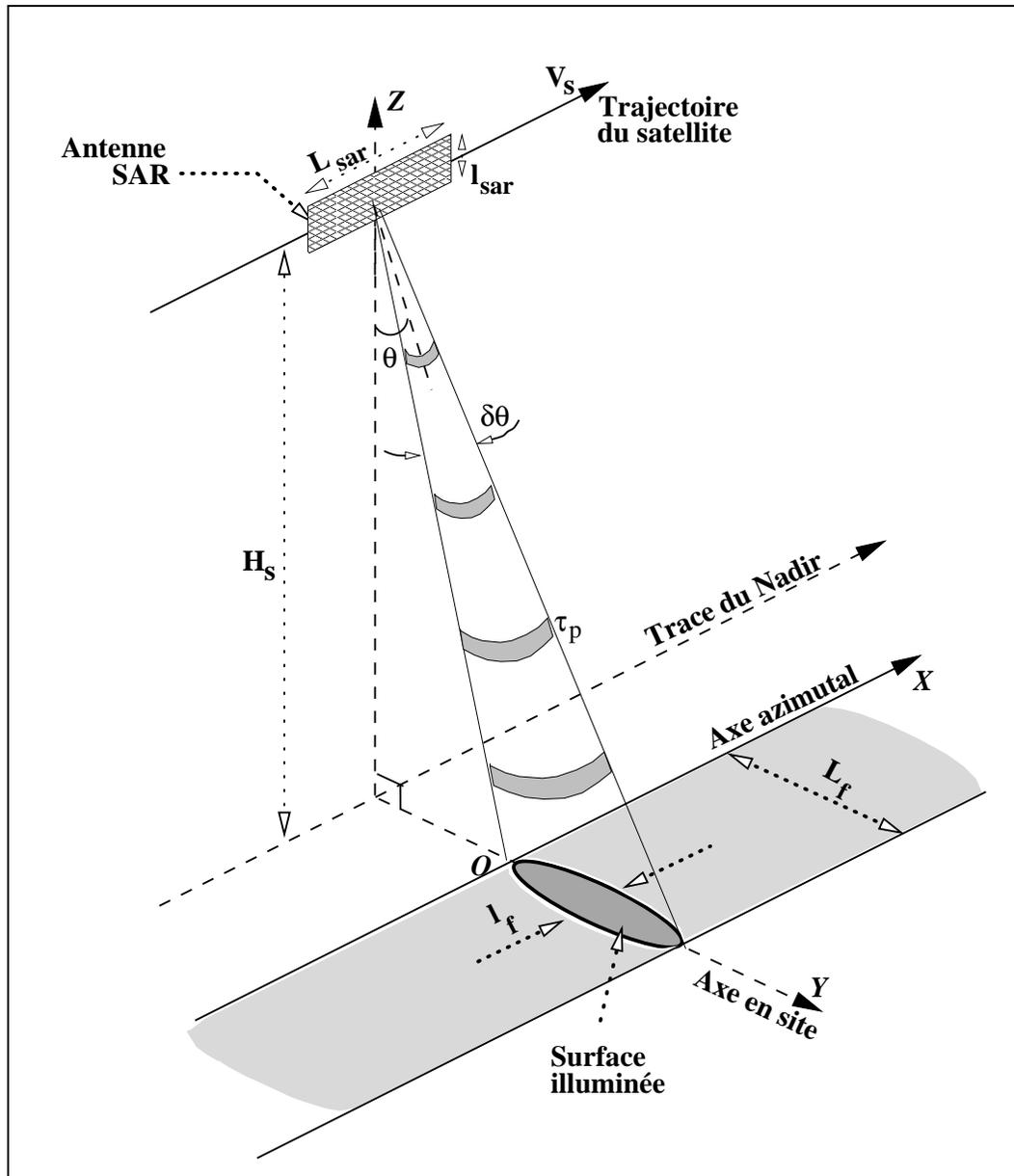


FIG. 2.2 – Schématisation du mode de visée du système SAR.

A partir des paramètres liés au choix du constructeur, il est possible de définir les autres paramètres. La largeur de l'antenne permet de déterminer l'ouverture¹ du lobe en site $\delta\theta$, telle que :

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{l_{sar}} \quad (2.2)$$

ainsi que la fauchée L_f :

$$L_f \approx \frac{\lambda r_f}{l_{sar} \cos \theta} \quad (2.3)$$

Réciproquement, la longueur de l'antenne permet de déterminer l'ouverture du lobe en azimut $\delta\theta_a$ telle que :

$$\delta\theta_a = \frac{\lambda}{L_{sar}} \quad (2.4)$$

ainsi que la largeur de l'empreinte l_f :

$$l_f \approx r_f \delta\theta_a \quad (2.5)$$

Une notion reste à définir avant de voir plus en détail les traitements effectués sur le signal rétrodiffusé. Il s'agit de la résolution.

Résolution en distance

La résolution en distance (Fig 2.4) est définie comme étant la distance minimale qui permet de distinguer séparément deux cibles voisines par un même système radar. Considérons deux cibles identiques A et B, telles que la cible A soit plus proche de l'axe du nadir que la cible B. Si le signal rétrodiffusé par la cible A est capté par le radar suffisamment en avance par rapport au signal rétrodiffusé par la cible B, alors ces deux cibles apparaîtront distinctement l'une de l'autre. La résolution minimale entre ces deux cibles est obtenue par l'expression :

$$\delta R_d = \frac{c\tau_p}{2 \sin \theta} \quad (2.6)$$

avec c la vitesse de la lumière.

Pour obtenir une fine résolution, la durée d'une impulsion τ_p doit alors être aussi faible que possible. Or, cette impulsion doit pouvoir être générée avec une énergie suffisamment forte, afin de capter un signal rétrodiffusé suffisamment important vis-à-vis du bruit. Pour avoir toutes ces conditions, la technique de compression [CURL-91], fondée sur l'émission d'un "chirp" (signal dans la fréquence centrale

1. On choisit une définition de lobe d'antenne "à 3.92 dB" dans lequel le signal a une énergie au moins égale à 60% du maximum.

varie linéairement avec le temps), est couramment employée ce qui permet d'obtenir une résolution en distance bien plus fine :

$$\delta R_d = \frac{c}{2\Delta f \sin \theta} \quad (2.7)$$

Un des avantages primordiaux de cette expression est son indépendance vis-à-vis de la distance d'observation.

Résolution en azimuth

En ne prenant pas en compte la synthèse d'ouverture qui consiste à utiliser plusieurs positions de l'antenne pour construire l'image, la résolution azimuthale δR_a se définit comme étant la distance au sol entre deux cibles, appartenant à un même axe parallèle à la trajectoire du satellite. Ces deux cibles seront donc vues distinctement par le système radar à condition qu'elles ne soient pas illuminées en même temps par le faisceau (Fig 2.3). De ce fait, la résolution azimuthale (Eq 2.5) correspond à la largeur de l'empreinte au sol du faisceau. Cependant, l'intérêt d'utiliser la synthèse d'ouverture [CURL-91] permet de considérer l'ensemble des réponses d'une même cible lors de son passage dans le lobe de l'antenne, et d'obtenir une résolution en azimuth plus fine de la forme :

$$\delta R_a = \frac{L_{sar}}{2} \quad (2.8)$$

Cette relation est la propriété fondamentale du radar à ouverture synthétique. Elle a la qualité d'être indépendante de la longueur d'onde, de la vitesse du satellite et de son altitude. L'unique paramètre est la longueur de l'antenne. Il semblerait que l'on ait intérêt à la choisir très petite. Mais, il existe certaines conditions à respecter, en particulier sur la surface de l'antenne SAR, puisque l'utilisation d'une antenne extrêmement petite poserait des problèmes au niveau du bilan énergétique.

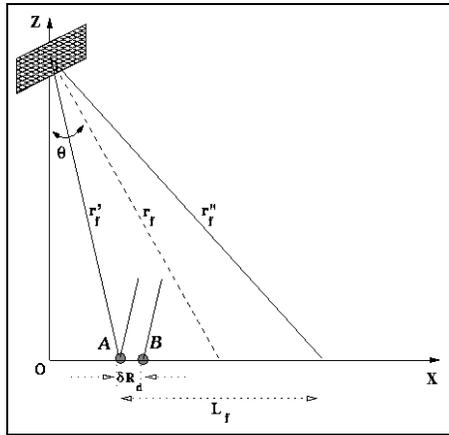


FIG. 2.3 – Résolution en distance.

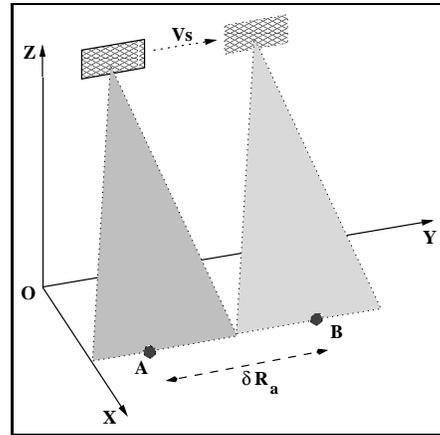


FIG. 2.4 – Résolution en azimuth.

2.2 Traitements SAR

Cette partie présente succinctement les divers traitements réalisés sur le signal reçu par le radar. Comme nous l'avons vu précédemment, le radar émet des impulsions dont l'expression est donnée par (Eq 2.1). Après interaction avec les divers éléments du terrain, une partie de l'énergie est rétrodiffusée vers le satellite. Le signal rétrodiffusé $r_n(t)$ provenant de la $n^{ième}$ impulsion émise se met alors sous la forme :

$$r_n(t) = A s_n(t - t_o) \quad (2.9)$$

avec t_o le temps de propagation aller-retour de l'onde entre le radar et le sol. Ce temps vaut $2r_o/c$, avec r_o la distance séparant le radar et le sol, dépendant du temps t puisque cette distance varie d'une impulsion à l'autre avec le déplacement du radar le long de sa trajectoire. A est une constante liée essentiellement à la nature et à la réflectivité du terrain, mais également au signal émis, ainsi qu'aux pertes durant le trajet de l'onde et aux divers gains en émission et réception de l'antenne. Cette constante donnera la valeur radiométrique du pixel de l'image.

Généralement, on considère les signaux émis et reçus complexes, que l'on notera respectivement $\hat{s}_n(t)$ et $\hat{r}_n(t)$. Le signal émis $\hat{s}_n(t)$ s'écrit alors :

$$\hat{s}_n(t) = a(t) \exp(2\pi i (ft + \frac{1}{2} \alpha t^2)) \quad (2.10)$$

En remplaçant $\hat{s}_n(t)$ par son expression, le signal reçu devient donc :

$$\hat{r}_n(t) = A \underbrace{\exp(-2\pi i ft_o)}_{azimut} \underbrace{\left[a(t - t_o) \exp(2\pi i (ft + \frac{1}{2} \alpha (t - t_o)^2)) \right]}_{distance} \quad (2.11)$$

Cette expression montre le découplage des réponses du terrain en azimut et en distance, que l'on notera respectivement $\hat{r}_n^a(t)$ et $\hat{r}_n^d(t)$. Dans ce qui suit, nous présentons les traitements en site (ou compression d'impulsion) et en azimut, qui permettent ainsi d'obtenir la forme générale de la fonction image.

2.2.1 Traitement en site

Considérons la $n^{ième}$ impulsion émise, à l'instant t_n , le signal en site est :

$$\hat{r}_n^d(t) = a(t - t_o) \exp(2\pi i (ft + \frac{1}{2} \alpha (t - t_o)^2)) \quad (2.12)$$

Par l'utilisation d'un filtre adapté, ce signal subit une détection, réalisée en le corrélant avec la réplique conjuguée du signal émis. La réponse $\hat{g}_d(\tau_d)$ à ce filtre est donc :

$$\hat{g}_d(\tau_d) = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{r}_n^d(t) \hat{s}_n^*(t - \tau_d) dt \quad (2.13)$$

Par calcul de l'intégrale, cette réponse (Eq 2.13) se met sous la forme d'un sinus cardinal, pondéré par l'expression d'une fenêtre triangulaire centrée en t_c et de largeur $2\tau_p$ [NICO-97]. L'amplitude de cette réponse est maximale pour $\tau_d = t_o = 2r_o/c$. Or, nous avons vu en introduction de cette partie, que cette distance r_o séparant le radar du sol illuminé varie en fonction du temps t d'émission. Ceci implique que le temps t_o de propagation aller-retour de l'onde dépend également de ce temps t d'émission. Cette dépendance temporelle entraîne la répartition sur plusieurs lignes de la réponse du sol illuminé, appelée migration en distance. Une fois la migration corrigée, il est possible de considérer la différence $(t_o - \tau_d)$ comme constante dans le cas des satellites.

Après ce traitement en site, et en posant $\tau_d = 2r/c$, le signal reçu $\hat{r}^{(d)}$ approximé devient donc :

$$\hat{r}^{(d)}(r, t) = A \exp(2\pi i f t_o(t)) \text{sinc} \pi \alpha \tau_p (\tau_d - t_o) \quad (2.14)$$

2.2.2 Traitement en azimut

A la $n^{\text{ième}}$ impulsion émise, le signal en azimut s'écrit :

$$\hat{r}_n^a(t) = \exp(2\pi i f t_o(t)) \quad (2.15)$$

Le traitement en azimut va prendre en compte la variation de t_o d'une impulsion à l'autre. Comme pour le traitement en site, ce traitement consiste à réaliser un filtrage adapté. La réponse azimutale s'écrit alors :

$$\hat{g}_a(\tau_a) = \frac{1}{T_a} \int_{-\frac{T_a}{2}}^{+\frac{T_a}{2}} \hat{r}_n^a(t) \hat{r}_n^{a*}(t - \tau_a) dt \quad (2.16)$$

En considérant le temps t_o sous la forme suivante :

$$t_o(t) = \frac{2r_o(t)}{c} \quad (2.17)$$

et en utilisant le développement limité de la distance $r_o(t)$ séparant le radar du sol considéré :

$$r_o(t) = r_o^{(o)} + r_o^{(1)}t + r_o^{(2)}t^2 + o(t^3) \quad (2.18)$$

avec $r_o^{(o)}$ la distance radiale séparant le radar du sol, $r_o^{(1)}$ la vitesse radiale, et $r_o^{(2)}$ le terme d'accélération radiale tel que : $r_o^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{V_s^2}{r_o^{(o)}}$,

la réponse azimutale (Eq 2.16) est alors approximée à :

$$\hat{g}_a(\tau_a) = \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda} (r_o^{(1)} \tau_a)\right) \text{sinc}\left(\frac{4\pi}{\lambda} r_o^{(2)} \tau_a T_a\right) \quad (2.19)$$

avec T_a le temps d'éclairement du terrain considéré.

Suite au traitement en azimut, l'enveloppe C du signal reçu $\hat{r}^{(d,a)}$ s'écrit :

$$C(\hat{r}^{(d,a)}(\tau_d, \tau_a)) = \text{sinc} \pi \alpha \tau_p (\tau_d - t_o) \cdot \text{sinc} \left(\frac{4\pi}{\lambda} r_o^{(2)} \tau_a T_a \right) \quad (2.20)$$

En l'absence d'apodisation, le module du signal aura donc la forme d'un sinus cardinal bidimensionnel (Fig 2.5). Ce module donne ainsi, directement la valeur du pixel de l'image radar dans le cas d'un écho isolé. Tous les pixels correspondant à chaque cible sont ensuite répartis sur une grille rectangulaire, formant ainsi l'image radar.

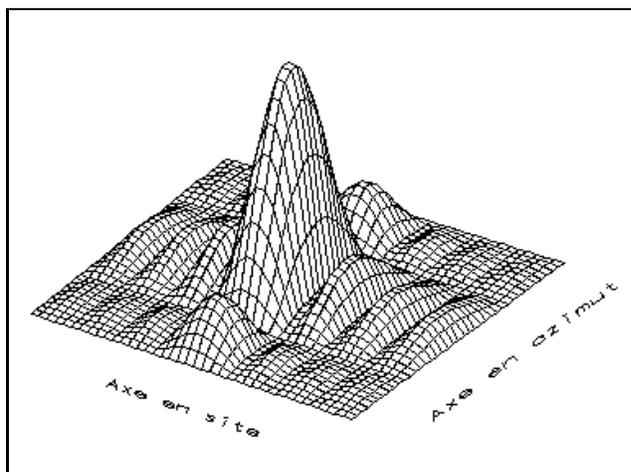


FIG. 2.5 – Représentation de la réponse impulsionnelle du signal reçu par le radar après traitement en site et en azimut.

2.3 Images radar utilisées

Le jeu d'images radar dont nous disposons est important, recouvrant diverses régions du globe, et acquises par des systèmes radar différents. Toutes ces données sont des produits PRI (*precision image*), donnant en chaque pixel l'amplitude du signal reçu par le radar.

2.3.1 Les systèmes d'acquisition

Ces images ont été acquises par différents systèmes radar : ERS-1 satellite européen¹, JERS-1 satellite japonais¹, et RADARSAT satellite canadien². Ces trois systèmes sont différents selon le tableau (Tab 2.1) par leurs caractéristiques : fréquence, longueur d'onde, angle d'incidence du faisceau d'onde électromagnétique, polarisation des ondes à l'émission et à la réception. Un seul paramètre est identique pour des images acquises par ces trois systèmes radar : la dimension des pixels qui est de 12.5 mètres en distance et en azimut.

1. Images obtenues grâce à Mr. J.P. Rudant que nous tenons à remercier ici.

2. Images provenant du projet canadien ADRO 425, auquel nous avons participé.

	ERS-1	JERS-1	RADARSAT
Fréquence	5.3 GHz	1.275 GHz	5.3 GHz
Longueur d'onde	5.66 cm (Bande C)	23.5 cm (Bande L)	5.66 cm (Bande C)
Polarisation	VV	HH	HH
Angle d'incidence	23 deg.	35 deg.	de 20 à 50 deg. (7 incidences possibles)
Longueur de fauchée	100 km	75 km	de 50 à 500 km
Résolution au sol	30 m	25 m	25 m
Dimension des pixels	12.5 m	12.5 m	12.5 m
Altitude	785 km	568 km	798 km
Inclinaison	97.5 deg.	98.5 deg.	98.6 deg.
Cycle	35 jours	44 jours	24 jours

TAB. 2.1 – *Caractéristiques des trois systèmes radar utilisés.*

Les caractéristiques les plus importantes sont celles liées à l'onde électromagnétique émise par ces systèmes. La longueur d'onde apporte des informations sur la nature et la dimension des éléments constituant le terrain imagé. En imagerie cohérente, un pixel est obtenu par sommation des amplitudes complexes des divers échos issus de la zone du sol imagée [GOOD-76]. Par la suite, un sol sera lisse ou rugueux selon que ses aspérités seront petites ou grandes devant la longueur d'onde. Ainsi le critère de Rayleigh [LEBE-90] a-t-il été proposé pour discriminer ces deux situations :

$$\text{si } h_{asp} < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}, \quad \text{le sol est dit lisse,}$$

$$\text{si } h_{asp} > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}, \quad \text{le sol est dit rugueux,}$$

avec h_{asp} la hauteur des aspérités du sol.

La conséquence directe de ce critère est qu'il permet d'avoir directement une information sur le modèle de réflexion à utiliser pour le sol considéré. En effet, si le sol est dit rugueux, la réflexion sera alors plutôt diffuse. Au contraire, si le sol est considéré comme lisse vis-à-vis de la longueur d'onde, la réflexion sera alors spéculaire.

La polarisation de l'onde incidente et de l'onde en réception sont également des caractéristiques importantes. Leur principal intérêt porte sur la disposition spatiale de chaque élément constituant la portion de terrain imagé [MOOR-91]. Cette caractéristique a donc également une incidence sur le modèle de réflexion.

En ce qui concerne l'angle de visée du radar, les effets de ce paramètre seront détaillés dans le chapitre 3. Remarquons simplement ici qu'en fonction du couvert végétal considéré, il a également une influence sur la réflexion des ondes.

2.3.2 Les régions du globe

Le jeu de données, dont nous disposons, présente l'avantage d'être très divers vis-à-vis des régions du globe qu'elles imagent (Tab 2.2). Ces régions se différencient surtout par la nature de leur couvert végétal (forêt tropicale, forêt européenne, etc), mais aussi par la morphologie de leur relief. Détaillons le contenu spécifique de chacune de ces régions imagées.

Régions	Latitude	Longitude	Dimensions	Système SAR	Angle	Orbite
Guyane	5°14 N	53°18 W	8114×9343	RADARSAT	22°	desc.
	5°16 N	53°43 W	7957×10311	RADARSAT	34°	desc.
	5°17 N	53°27 W	8220×9128	RADARSAT	46°	desc.
	5°24 N	53°16 W	8000×8000	ERS-1	23°	desc.
	4°34 N	54°80 W	8000×8000	ERS-1	23°	desc.
	4°34 N	54°08 W	8000×8000	ERS-1	23°	desc.
	5°24 N	53°16 W	8000×8000	JERS-1	35°	desc.
Cévennes	44°27 N	3°61 E	8062×9357	RADARSAT	22°	asc.
	44°41 N	3°13 E	8061×9307	RADARSAT	22°	desc.
	44°33 N	3°86 E	7983×9156	RADARSAT	46°	asc.
Provence	43°40 N	5°40 E	8208×7690	ERS-1	23°	desc.
Vosges	47°75 N	7°00 E	8202×9340	RADARSAT	46°	desc.

TAB. 2.2 – *Positions et dimensions des régions imagées par les différents systèmes SAR et utilisées tout au long de cette thèse. La dimension des zones est exprimée en nombre de pixels (nombre de ligne et nombre de colonne).*

– La Guyane :

Ce département situé sur le continent américain se caractérise par son homogénéité. Sa végétation est essentiellement composée de forêt tropicale, mis à part sur la côte Nord bordant l'Océan Atlantique. En cette région, le couvert végétal y est au contraire très divers : savanes, prairies, terres cultivées, mangrove, forêts dégradées situées sur des zones inondables, et marais. C'est également dans cette région que se concentre la majeure partie de la population, expliquant ainsi la présence d'agglomérations, de zones industrielles et de réseaux routiers. Du fait de sa diversité, et de la quasi-absence de relief, cette région ne sera pas utilisée lors des tests de la radarclinométrie. En revanche, toutes les autres régions pourront être exploitées. Remarquons qu'en ces zones, la forêt est très largement entrecoupée de fleuves et de rivières, mais cette caractéristique n'affecte en réalité que très peu le caractère homogène de cette région. En ce qui concerne le relief de la Guyane, il est en réalité très peu marqué, composé de chaînes montagneuses et de nombreuses collines ne dépassant pas les 850 mètres d'altitude. Par ses formes relativement douces, ce type de relief

se prêtera bien à notre étude de la radarclinométrie. Quatre massifs seront plus amplement utilisés :

1. *Montagnes Françaises (GAA KABA)* situées à l'Ouest, proche du fleuve Maroni, frontière avec le Surinam,
2. *Montagne Trois Roros* située à une centaine de kilomètres au Sud du village Organabo en bordure de l'Océan Atlantique,
3. *Montagnes Plomb*, chaînes montagneuses situées à une quinzaine de kilomètres au Sud Est du barrage de Petit Saut,
4. *Montagne Marie-Hilaire* située à une quinzaine de kilomètres au Sud Ouest du barrage de Petit Saut.

– **Les Cévennes :**

Cette région de France, de type Méditerranéen, est située au Sud-Est du Massif Central. Sa principale caractéristique est sa richesse en paysages, marquée par la diversité de ses reliefs et de son couvert végétal. En ce qui concerne sa végétation, elle est surtout composée de forêts alternant des feuillus en basse altitude et des résineux et broussailles en haute altitude, mais également la présence par endroits d'impressionnants déserts de pierres granitiques, des champs cultivés et quelques marais. En ce qui concerne son relief, il est très contrasté, constitué de vastes plateaux et de zones montagneuses accidentées recouvrant une gamme d'altitude allant de 400 mètres au fond des vallées à plus de 1200 mètres au sommet. Les données radar recouvrent la région comprenant les villes de Marjevols et de Mende, ainsi que d'innombrables villages ou hameaux, en moyenne pas moins d'un lieu d'habitation tous les 5 km, expliquant ainsi l'important réseau routier s'y trouvant. L'utilisation de cette région très hétérogènes nous donnera très certainement les limites de la radarclinométrie.

– **La Provence :**

Cette région située au Sud Est de la France recouvre le Sud Est du sillon rhodanien, la quasi-totalité des Alpes du Sud, du Lautaret à la Méditerranée. Son climat est la principale caractéristique de cette région, marqué par de redoutables sécheresses expliquant la présence de grandes steppes de pierres et de broussailles. Cette caractéristique explique également la présence de grands aménagements pour l'irrigation spontanée, destinée à la fois au progrès agricoles et à la satisfaction des besoins urbains et industriels. En ce qui concerne le relief, il se trouve enchevêtré entre des plis d'origine pyrénéenne d'Ouest à l'Est et alpine du Nord au Sud, alternant des massifs montagneux puissants (Ventoux : 1912 mètres, Lure : 1827 mètres), des chaînons abrupts (Sainte-Victoire : 1101 mètres, Sainte-Baume : 1147 mètres), des dômes et des collines présentant des vallées étroites et souvent exigües où se concentre l'habitat. Les données radar ne recouvrent pas la totalité de la Provence, mais juste une zone de plus de 100 km sur 100, délimitée au Nord par la montagne de Lure, au Sud

par la mer Méditerranée, à l'Ouest par l'étang de Berre et à l'Est par la fin du massif de la Sainte-Baume. Cette zone imagée comprend les villes de Marseille, de Toulon, d'Aix en Provence, de Pertuis ainsi que d'innombrables villages reliés par un important réseau routier, marquant surtout les données par ses grands axes (autoroutes). Le relief imagé, essentiel pour notre application, est principalement constitué par les chaînes abruptes de la Sainte-Victoire et de la Sainte-Baume, recouvrant ainsi une gamme étendue et diverse de déclivité.

– **Les Vosges :**

Cette région du Nord Est de la France se situe entre le plateau lorrain à l'Ouest et la plaine d'Alsace à l'Est. Les Vosges s'étirent sur une longueur de 120 km environ, entre la porte de Bourgogne au Sud et le seuil de Saverne au Nord ; au-delà, elles se prolongent par le massif de la Hardt. Cette région se trouve à l'emplacement de montagnes plissées, qui furent arrasées à la fin du primaire. Puis, dès la fin du secondaire, il se manifeste une tendance à l'exhaussement, tandis que, au milieu du tertiaire, le fossé rhénan s'amorce. La dissymétrie entre le plan occidental (pente douce) et le versant alsacien (faille), déterminant l'aspect actuel du massif, se crée ultérieurement.

L'altitude des basses Vosges au Nord est souvent inférieure à 500 mètres, et la couverture forestière de l'ensemble atténue la différence entre les deux versants. Dans les vallées entaillant les plateaux gréseux se maintient une polyculture vivrière. Au Sud, les Hautes Vosges affirment nettement l'opposition caractéristique entre les deux versants. Une autre caractéristique des montagnes vosgiennes provient de la forme parfois arrondie de ses sommets, ce qui leur vaut le nom de "ballon". La végétation de cette région est très peu contrastée, essentiellement composée de forêt. Mais, on y trouve également de nombreux vergers situés dans les vallées, qui généralement entourent les villages. Enfin, pour finir, indiquons que la spécificité de cette région provient de son habitat très dispersé, mais aussi de son fort potentiel industriel.

Chapitre 3

Lien Géométrie-Radiométrie des Images Radar

Ce chapitre présente une analyse des propriétés des images radar. Nous proposons donc deux études distinctes concernant d'une part la géométrie, et d'autre part la radiométrie de ces images. Ces deux études sont destinées à mettre en évidence les distorsions et divers problèmes liés à ce système d'imagerie, et également de justifier un certain nombre d'hypothèses, qui nous seront fort utiles pour établir la stratégie de restitution du relief par radarclinométrie.

3.1 Etude de la géométrie des images radar

Cette partie est spécialement consacrée à la géométrie des images radar, dont l'interprétation visuelle est très fréquemment difficile. Ceci nous conduira directement à définir les divers types de distorsions qui sont dues au système de visée du radar. Ces distorsions indiqueront les limites de la radarclinométrie. Puis, nous chercherons à savoir quel est l'angle de visée du capteur qu'il est préférable d'utiliser pour ne pas avoir trop de distorsions dans les données. Précisons que cette étude n'aura pas d'incidence directe sur la méthode de la radarclinométrie qui sera proposée au chapitre 4. Elle est donc présentée à titre indicatif. La suite de l'étude de la géométrie sera plus amplement employée. Elle consiste tout d'abord à la justification d'une approximation simplificatrice concernant la forme des ondes électromagnétiques délivrées par le capteur SAR. Puis, suite à une modélisation de la surface imagée, nous établirons diverses relations rendant compte de la géométrie du terrain vis-à-vis du système de visée radar.

3.1.1 Les distorsions géométriques

Sur les zones terrestres possédant du relief, les images d'amplitude obtenues à partir des capteurs SAR à visée latérale sont bien différentes de celles obtenues à partir des capteurs optiques. La morphologie des reliefs induit des distorsions géométriques bien particulières dans les images radar. Il existe trois types de distorsion

géométrique. Parmi celles-ci, nous verrons que deux d'entre elles induisent une perte d'information irréversible sur le relief réel. La figure 3.1 présente les schémas simplifiés de ces trois types de distorsions.

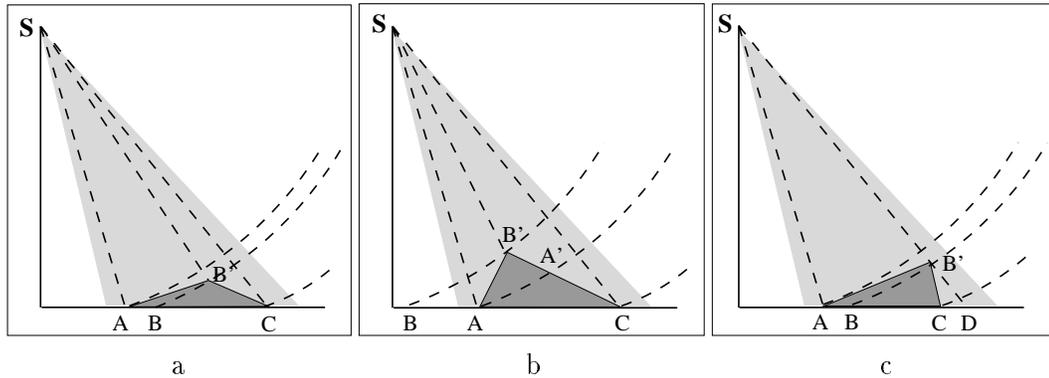


FIG. 3.1 – Les diverses distorsions géométriques dues à la morphologie du relief: a-compression des pentes orientées face radar (et inversement, dilatation des pentes orientées face opposée au radar), b-recouvrement, c-ombre.

Le premier schéma (Fig 3.1 a) illustre la distorsion géométrique la plus courante, généralement représentée par des zones de compression dans l'image radar. Cette distorsion est couramment appelée *foreshortening*. Sur ce schéma, nous avons indiqué trois éléments distincts A, B' et C du relief, tels que AB' est la pente du terrain orientée face au radar, avec un angle inférieur à l'angle de visée du capteur. Suite à l'illumination par le faisceau d'onde radar, leurs échos sont représentés par trois points distincts A, B et C dans le plan image. Il est clair que la distance AB dans le plan image est plus petite que la distance AB' du relief réel. La limite de cette distorsion est obtenue lorsque la pente AB' est perpendiculaire au faisceau d'onde électromagnétique. En effet, dans ce cas particulier, toute l'énergie rétrodiffusée par cette portion de terrain se retrouve complètement compressée dans un seul et unique pixel de l'image. Ce cas limite montre également celui du recouvrement.

Le recouvrement est illustré par le second schéma (Fig 3.1 b). Cet autre type de distorsion géométrique est couramment appelée repliement (*layover*). Nous venons de voir son cas limite précédemment, mais expliquons son principe général. Sur ce schéma, on remarque que la pente AB' orientée face au radar est supérieure à l'angle d'incidence du faisceau d'onde. L'illumination de cette portion de terrain produit une inversion dans l'image radar BA, mais également la superposition des signaux rétrodiffusés par la portion de terrain précédant la pente AB', et par la portion de terrain B'A' dont la pente est orientée face opposée au radar. Dans cette région de l'image radar, il est impossible de distinguer les échos provenant de ces trois portions de terrain. Cette perte d'information du relief réel est malheureusement irrémédiable.

La dernière distorsion géométrique, que l'on peut rencontrer sur les images radar, est le phénomène d'ombres, plus couramment appelé *shadowing*. Ce phénomène est

représenté par le schéma (Fig 3.1 c), où l'on peut remarquer qu'une portion de terrain B'C, orientée face opposé au radar, n'est pas illuminée par le faisceau radar. Ceci se produit généralement lorsque la déclivité de B'C est supérieure, en valeur absolue, à l'angle complémentaire de visée du radar ($\theta - 90^\circ$). Ce phénomène présente donc une perte d'information irrémédiable qui touche non seulement la portion B'C, mais également la portion de terrain CD.

Comme décrit précédemment, parmi ces trois types de distorsions géométriques, deux d'entre elles représentent une perte d'information sur la morphologie précise du relief réel. Il est alors intéressant de connaître la proportion de pixels de l'image affectés par ces deux distorsions, en fonction de l'angle de visée du capteur SAR [GOUJ-95]. Pour cela, nous utilisons un modèle numérique de terrain de la région d'Aix en Provence¹, de dimension au sol de 20 km en distance et en azimuth, et de résolution 50 mètres \times 50 mètres.

A partir de ce MNT, il est possible d'estimer la proportion de pixels d'une zone de recouvrement et d'une zone d'ombre en fonction de l'angle de visée du capteur. Pour cela, nous déterminons les angles en site de chaque pixel par l'expression :

$$\alpha_{(i,j)} = \arctan \left(\frac{H_{(i,j)} - H_{(i,j-1)}}{R_d} \right)$$

avec (i, j) la position du pixel dans l'image (i : ligne, j : colonne), $H(i, j)$ son altitude, et R_d la résolution en site. Puis, nous établissons l'histogramme, d'où la loi de répartition des angles (Fig 3.2).

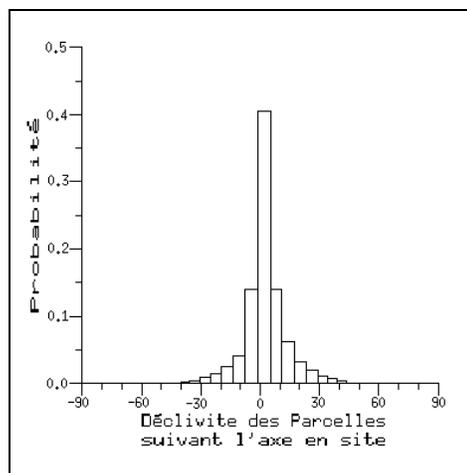


FIG. 3.2 – Loi de répartition des angles α en site du MNT d'Aix en Provence.

A partir de cet histogramme, nous estimons la proportion de pixels affectés par l'une des deux distorsions en fonction de l'angle d'incidence considéré. Le résultat est illustré par la figure (Fig 3.3). L'inconvénient de cette procédure est qu'elle ne

1. MNT obtenu grâce à Mr. André Beaudoin que nous tenons à remercier ici.

permet pas de connaître de manière exacte la proportion de pixels affectés par les distorsions. En effet, elle ne prend pas en compte les effets de recouvrement des pixels se situant en amont dans le cas de parcelles d'orientation supérieure à l'angle d'incidence, et en aval dans le cas de parcelles d'orientation telle qu'elles ne sont pas vues par le capteur. Seule la simulation par lancé de rayon permet de connaître exactement le nombre de pixels affectés par l'une des deux distorsions.

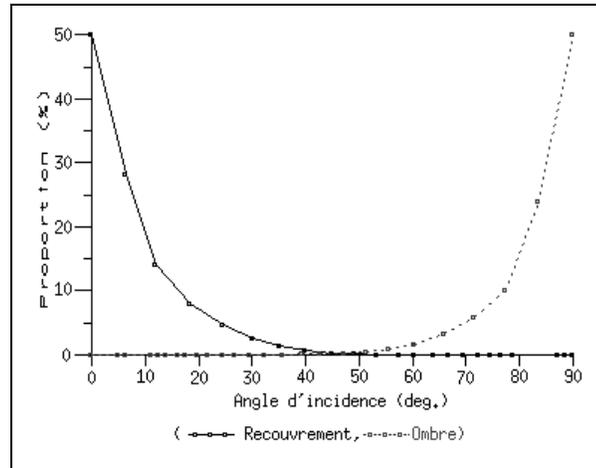


FIG. 3.3 – Proportion de pixels du MNT de la région d'Aix en Provence affectés par les deux distorsions (layover et ombre) en fonction de l'angle de visée du capteur, estimée à partir de l'histogramme des angle en site (Fig 3.2).

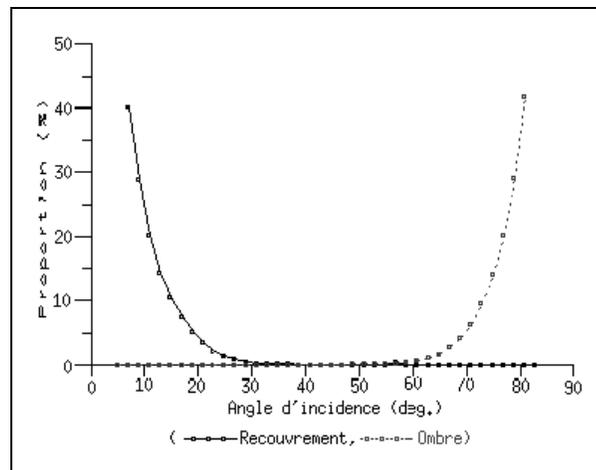


FIG. 3.4 – Proportion de surface du MNT de la région d'Aix en Provence affectés par les deux distorsions (layover et ombre) en fonction de l'angle de visée du capteur, estimée par simulation (lancé de rayons).

Nous avons procédé à ces simulations; le résultat est illustré par la figure (Fig 3.4). On remarque tout d'abord que la forme des deux courbes (Fig 3.3) et (Fig

3.4) est très proche. Elles donnent des indications élémentaires quant au choix de l'angle de visée à utiliser. En effet, plus l'angle d'incidence est faible, plus le relief présente des zones de recouvrement, et moins de zones d'ombre. Au contraire, plus l'angle d'incidence est important, plus le relief est affecté par des zones d'ombre, et moins de zones de recouvrement. Dans un cas comme dans l'autre, il y a une perte irrémédiable d'information sur la morphologie précise du relief. Par ces deux figures, on constate également que les deux distorsions (recouvrement et ombre) peuvent apparaître simultanément sur l'image radar. Ceci se produit pour des angles d'incidence du faisceau radar compris entre 40° et 50° , mais n'affecte en réalité que très peu de pixels du MNT. Cette gamme d'angle d'incidence est donc la plus valable pour les diverses applications utilisant une seule et unique image radar. Or, ce schéma n'est malheureusement pas généralisable puisque les distorsions sont non seulement induites par l'angle d'incidence radar utilisé, mais également étroitement liées à la forme du terrain considéré.

3.1.2 Approximation en onde plane

Comme nous l'avons décrit au chapitre 2, un satellite radar, se situant à une altitude H_s , émet des fronts d'onde électromagnétique, chacun caractérisé par un vecteur d'onde, dont l'angle d'incidence avec le nadir est noté θ . Une première hypothèse peut être faite ici ; elle consiste à considérer les fronts d'onde comme plans. La justification de cette approximation découle du calcul de l'erreur entre la courbure réelle des fronts électromagnétiques au sol et les plans tangents.

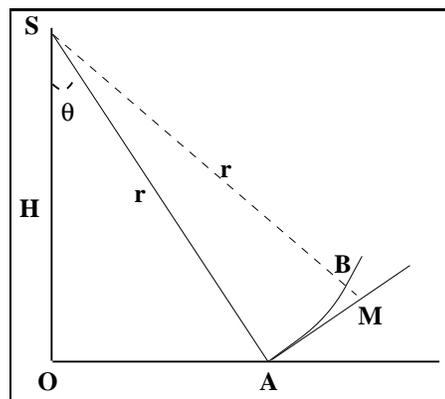


FIG. 3.5 – Schématisation de l'erreur due à l'approximation en onde plane.

De la figure (Fig 3.5), on déduit :

$$MB \simeq \frac{MA^2}{2r} \quad (3.1)$$

Prenons comme exemple, le cas du satellite ERS-1, se situant à une altitude $H_s = 800$ km environ, et émettant avec un angle d'incidence de 23° . A 10 m du point A, l'erreur commise est de l'ordre de 0.06 mm ; à une distance de 1 km du

point A, l'erreur est alors de 0.6 m, ce qui reste encore négligeable, compte tenu des dimensions de la cellule de résolution et montre que l'hypothèse sur la modélisation en onde plane peut être utilisée, du moins dans notre contexte (ce ne sera pas le cas en interférométrie).

3.1.3 La notion de socle et de parcelle

Le socle est le plan de référence (XOY) tangent à la surface terrestre (Fig 2.2). Une parcelle est la portion de terrain interceptée par une cellule de résolution du radar et imagée en un pixel ; on la suppose plane, sa surface est donc celle d'un parallélogramme d'angles α et β , et de côtés $L(\alpha)$ et $l(\beta)$ (Fig 3.6 a). Ces deux angles α et β sont les angles d'Euler. Définissons précisément ces deux angles :

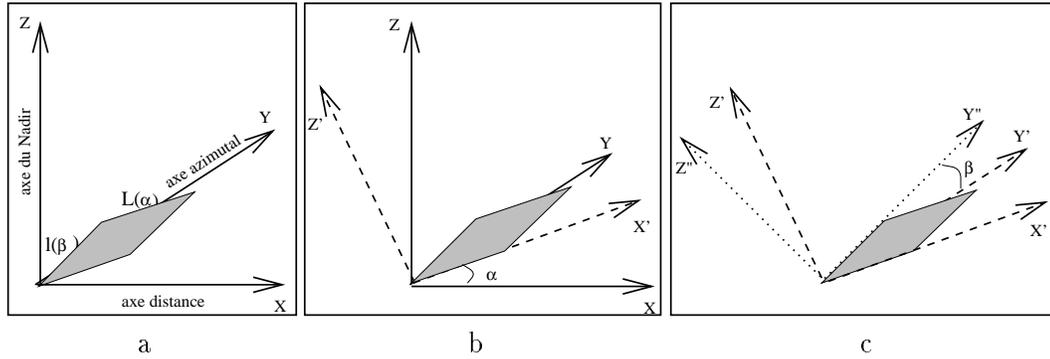


FIG. 3.6 – Schématisation d'une parcelle et représentation des divers angles la définissant

- α angle obtenu par une rotation d'axe (OY), c'est à dire la direction du satellite, du repère R_{socle} (OXYZ) (Fig 3.6 b). Le repère (OX'YZ') ainsi obtenu est tel que :

$$\vec{x}' = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ 0 \\ \sin \alpha \end{pmatrix}_{R_{socle}} \quad \vec{y}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{R_{socle}} \quad \vec{z}' = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{pmatrix}_{R_{socle}}$$

- β angle de la rotation d'axe (OX'), du repère (OX'YZ') (Fig 3.6 c) ; le repère (OX''YZ''), obtenu par cette rotation est tel que la parcelle imagée par le radar est contenue dans le plan (X'OY''), et tel que :

$$\vec{x}'' = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ 0 \\ \sin \alpha \end{pmatrix}_{R_{socle}} \quad \vec{y}'' = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \end{pmatrix}_{R_{socle}} \quad \vec{z}'' = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}_{R_{socle}}$$

3.1.4 Diverses relations géométriques

Pour établir les diverses relations géométriques d'une parcelle, nous désignons par R_d et R_a les dimensions¹ selon (OX) et (OY) d'un pixel de l'image radar, et nous utilisons le vecteur \vec{K} , correspondant à la direction des ondes électromagnétiques incidentes ; son expression dans le repère (OXYZ) est :

$$\vec{K} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{pmatrix}_{R_{\text{socte}}}$$

Nous pouvons alors établir les équations donnant les deux longueurs $L(\alpha)$ et $l(\beta)$ de la parcelle, et ainsi exprimer la surface $A(\alpha, \beta)$ d'une parcelle imagée en un pixel par le radar.

Expression de la longueur $L(\alpha)$ de la parcelle

Dans le plan (X'OZ'), la longueur de la parcelle vérifie :

$$\vec{L}(\alpha) \cdot \vec{K} = R_d \vec{x} \cdot \vec{K} \quad \text{avec} \quad \vec{L}(\alpha) = L(\alpha) \vec{x}' = L(\alpha) \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ 0 \\ \sin \alpha \end{pmatrix}$$

D'où :

$$L(\alpha) = \frac{R_d \sin \theta}{\sin(\theta - \alpha)} \quad \text{si } \alpha \in]-90^\circ + \theta, \theta[\cup]\theta, 90^\circ]. \quad (3.2)$$

Elle n'est pas définie pour $\alpha = \theta$, et n'a pas de sens pour $\alpha \in [-90^\circ, -90^\circ + \theta[$ (zone d'ombre puisqu'il y a absence d'onde incidente). Notons deux situations différentes :

- Pour $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, la facette fait face au radar et est éclairée par lui (Fig 3.7). Dans la position où la facette est orthogonale au faisceau du radar, la facette tend vers l'infini, perdant toute résolution au sol (c'est pour éviter cette configuration défavorable que le radar a une visée latérale).
- Pour $-90^\circ + \theta < \alpha < 0^\circ$, la facette est orientée dans la direction opposée à la visée du radar, mais éclairée par celui-ci (Fig 3.8).

Si l'on considère le problème de détermination de l'angle de la facette connaissant sa longueur, nous pouvons faire deux remarques :

- ▷ d'une part la longueur devrait être infinie pour un angle α égal à θ , ce qui sera bien sûr impossible. On peut trouver une limite à cette longueur en considérant le front d'onde non plus plan, mais sphérique. Ceci est détaillé dans l'annexe A.
- ▷ D'autre part pour chaque longueur, 2 solutions sont possibles (Fig 3.9).

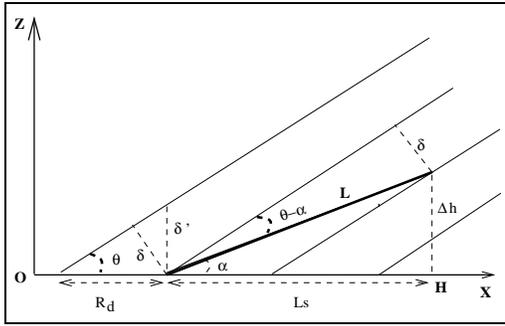


FIG. 3.7 – Pente orientée face radar avec $0 \leq \alpha < \theta$.

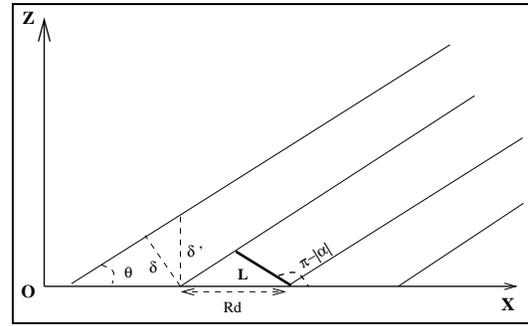


FIG. 3.8 – Pente orientée face opposée au radar avec $-90^\circ + \theta < \alpha \leq 0^\circ$.

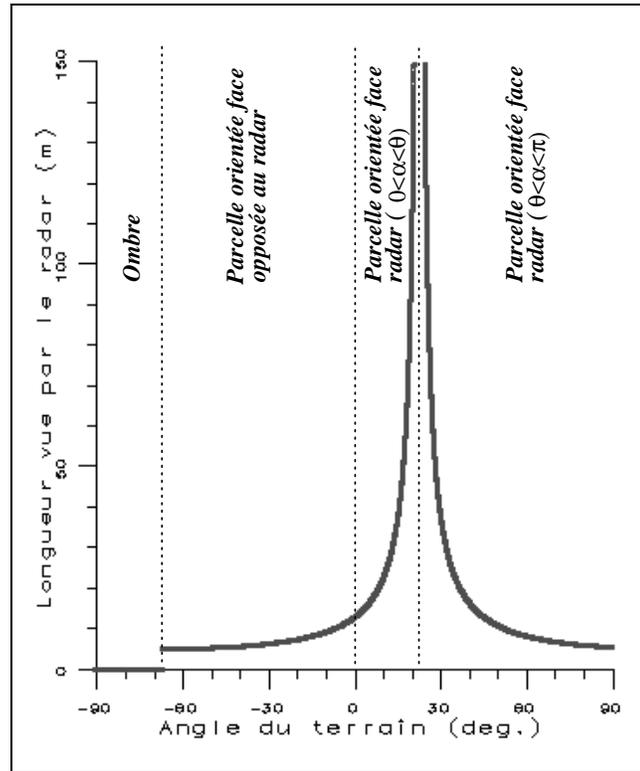


FIG. 3.9 – Longueur d'une parcelle vue par le radar en fonction de sa pente.

Expression de la longueur $l(\beta)$ de la parcelle

La longueur de la parcelle en fonction de son angle β , vérifie :

$$\vec{l}(\beta) \cdot \vec{y} = R_a \quad \text{avec} \quad \vec{l}(\beta) = l(\beta) \vec{y}^n = l(\beta) \begin{pmatrix} -\sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \end{pmatrix}$$

1. Ces dimensions sont en fait le pas d'échantillonnage et non la résolution de l'image.

son expression est :

$$l(\beta) = \frac{R_a}{\cos \beta} \quad \text{pour } \beta \in] - 90^\circ, 90^\circ[. \quad (3.3)$$

Expression de la surface $A(\alpha, \beta)$ de la parcelle

D'après les expressions des longueurs établies précédemment, il est alors possible de connaître la surface de terrain imagée en un pixel par le radar :

$$A(\alpha, \beta) = \| \vec{L}(\alpha) \wedge \vec{l}(\beta) \| \quad (3.4)$$

Le repère $(0X'Y''Z'')$ étant orthonormé, $L(\alpha)$ étant colinéaire à \vec{x}' et $l(\beta)$ colinéaire à \vec{y}'' , on a :

$$A(\alpha, \beta) = L(\alpha).l(\beta) = \frac{R_d R_a \sin \theta}{\sin(\theta - \alpha) \cos(\beta)}. \quad (3.5)$$

3.2 Etude de la radiométrie des images radar

Dans cette partie, nous nous intéressons à la radiométrie d'une image radar. Tout d'abord, nous décrirons ses caractéristiques, et plus particulièrement le bruit présent qui entache la lisibilité des données. A titre indicatif, nous présenterons les lois de ce bruit, ainsi que les filtres permettant de le réduire qui font toujours à l'heure actuelle l'objet de nombreuses recherches. Les éléments décrits lors de cette étude ne seront pas utiles pour la mise en œuvre du procédé de la radarclinométrie, mais ils apportent un détail du contenu des données SAR qui seront amplement exploitées lors des tests. Cette étude sera ensuite suivie de quelques rappels de photogrammétrie sous la forme de définitions, qui seront alors appliqués au système de visée du radar. Il en découlera ainsi une relation entre géométrie-radiométrie de l'image radar qui sera à la base de tout le procédé de la radarclinométrie.

3.2.1 Les caractéristiques radiométriques

Comme nous l'avons décrit au chapitre 2, la radiométrie des pixels de l'image radar, que l'on notera $rad_{i,j}$ (i et j indiquant respectivement la ligne et la colonne du pixel de l'image), dépend non seulement des divers paramètres du système d'acquisition SAR, mais également des propriétés physiques et géométriques des éléments recouvrant le sol. Cette radiométrie est égale à l'amplitude du signal $\mathbf{A} = |A|$ dans le cas d'une détection linéaire, et égale à l'intensité du signal $I = |A|^2$ dans le cas d'une détection quadratique. Sa dépendance vis-à-vis du système SAR et de la nature du couvert du terrain donne lieu à une texture granulaire de l'image (Fig 3.10).

Ce phénomène, couramment appelé speckle (ou chatolement), est causé par l'interférence aléatoire des ondes électromagnétiques. En effet, chaque cellule de résolution

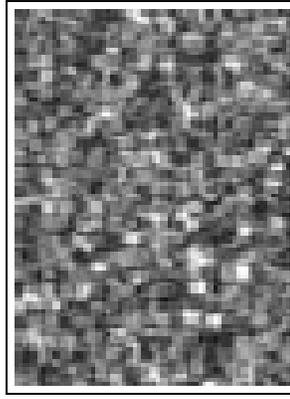


FIG. 3.10 – *Détail d'une image radar ERS-1 montrant l'aspect granulaire dû au speckle.*

du radar est divisible en un ensemble de N_d éléments diffuseurs distribués aléatoirement, provoquant ainsi ces interférences. En considérant a_n et ϕ_n respectivement l'amplitude et la phase du $n^{i\grave{e}me}$ élément diffuseur, ϕ_n prenant en compte la position au sein de la cellule de résolution, la contribution totale pour chaque cellule s'écrit alors :

$$A = \sum_{n=0}^{N_d} a_n \exp(i\phi_n) \quad (3.6)$$

Dans le cas d'un speckle totalement développé [GOOD-75], la densité de probabilité suit une loi de Rayleigh dans le cas d'une image en amplitude :

$$P(A) = \frac{A}{\zeta^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\zeta^2}\right) \quad (3.7)$$

et une loi exponentielle dans le cas d'image en intensité :

$$P(I) = \frac{1}{2\zeta^2} \exp\left(-\frac{I}{2\zeta^2}\right) \quad (3.8)$$

$2\zeta^2$ est l'espérance mathématique de l'intensité.

Les moyennes μ_A et μ_I , correspondant respectivement aux densités de probabilité $P(A)$ et $P(I)$, ont pour expression :

$$\mu_A = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\zeta \quad (3.9)$$

$$\mu_I = 2\zeta^2 \quad (3.10)$$

Les écarts-types respectifs de ces densités de probabilité présentent la caractéristique d'être proportionnels à leurs valeurs moyennes :

$$\frac{\sigma_A}{\mu_A} = 0.523 \quad (3.11)$$

$$\frac{\sigma_I}{\mu_I} = 1 \quad (3.12)$$

Le fait que l'écart-type varie proportionnellement à la moyenne donne le nom de bruit multiplicatif au speckle.

Généralement, les images radar utilisées sont le résultat d'un moyennage d'images multi-vues (*multi-look*), statistiquement indépendantes. En considérant L le nombre de vues, la densité de probabilité $P_L(I)$, pour une image en intensité, suit alors la loi du χ^2 d'ordre L :

$$P_L(I) = \frac{L}{\Gamma(L)} \frac{1}{2\zeta^2} \left(\frac{LI}{2\zeta^2} \right)^{(L-1)} \exp\left(-\frac{LI}{2\zeta^2}\right) \quad (3.13)$$

Les coefficients de variation (Eq 3.11) et (Eq 3.12) deviennent alors respectivement :

$$\frac{\sigma_{A_L}}{\mu_{A_L}} = \sqrt{\frac{L\Gamma^2(L)}{\Gamma^2(L+0.5)} - 1} \quad (3.14)$$

$$\frac{\sigma_{I_L}}{\mu_{I_L}} = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (3.15)$$

Mais, ceci n'est qu'un cas particulier d'images en zones homogènes ; il existe bien d'autres lois de probabilité selon que l'on considère une image en amplitude ou en intensité, mono-vue ou multi-vues, en présence de texture. Ces lois de probabilité, établies par [LAUR-89], sont regroupées dans le tableau (Tab 3.1).

Le fait de moyenner L images mono-vues provoque une réduction du bruit de speckle. Cette réduction n'est certes pas totale, puisque le nombre de vues pour la formation d'une image multi-vues est généralement assez restreint ($L = 3$ pour le capteur ERS-1), et se fait au détriment de la résolution. L'élimination du speckle a fait l'objet du développement de nombreux filtres. On dénombre trois types de filtres :

- les filtres de base de traitement des images : filtre moyenne, filtre médian, ... , [HOLE-93]. Leurs utilisations sur les images radar permettent une bonne élimination du bruit. Cependant, ces filtres provoquent un effet de flou, une dégradation de la résolution et un lissage trop important des structures de l'image.

Type	Loi	Statistiques			
		μ_{max}	μ	σ	$\frac{\sigma}{\mu}$
I L-vue	$P(I) = \frac{1}{2\zeta^2} e^{-\frac{I}{2\zeta^2}}$	0	$2\zeta^2$	$2\zeta^2$	1
I L-vues	$P_L(I) = \frac{I^L}{(2\zeta^2)^L \Gamma(L)} I^{L-1} e^{-\frac{I}{2\zeta^2}}$	$\frac{L-1}{L} 2\zeta^2$	$2\zeta^2$	$\frac{2\zeta^2}{\sqrt{L}}$	$\frac{1}{\sqrt{L}}$
\sqrt{I} L-vue	$P(A) = \frac{2A}{2\zeta^2} e^{-\frac{A^2}{2\zeta^2}}$	ζ	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \zeta$	$\sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} \sqrt{2} \zeta$	0.523
\sqrt{I} L-vues	$P_L(A) = \frac{2I^L}{(2\zeta^2)^L \Gamma(L)} A^{2L-1} e^{-\frac{LA^2}{2\zeta^2}}$	$\sqrt{1 - \frac{1}{2L}} \sqrt{2} \zeta$	$\frac{\Gamma(L+0.5)}{\sqrt{L} \Gamma(L)} \sqrt{2} \zeta$	$\sqrt{1 - \frac{\Gamma^2(L+0.5)}{L \Gamma^2(L)}} \sqrt{2} \zeta$	$\sqrt{\frac{L \Gamma^2(L)}{\Gamma^2(L+0.5)}} - 1$
A L-vue	$P(A) = \frac{2A}{2\zeta^2} e^{-\frac{A^2}{2\zeta^2}}$	ζ	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \zeta$	$\sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} \sqrt{2} \zeta$	0.523
A L-vues	?	ζ	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \zeta$	$\frac{\sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} \sqrt{2} \zeta}{\sqrt{L}}$	$\frac{0.523}{\sqrt{L}}$

TAB. 3.1 – Lois du chatoiement ROS

- Les filtres prenant en compte les statistiques du speckle [LAUR-89], [NEZR-92] : filtre de Lee [LEE-80], filtre de Kuan [KUAN-85], filtre de “Maximum Homogeneous Region” [WU-90], Ces filtres permettent incontestablement de réduire le speckle, mais provoquent une modification de la texture des images radar.
- Les filtres considérant le speckle comme un bruit additif, après une transformation logarithmique de l’image [ARSE-84], [ARSE-86], Les filtres développés ressemblent au filtre de Lee. L’amélioration apportée par leur utilisation se situe au niveau des structures présentes dans l’image radar telles que les contours. En revanche, l’information radiométrique de l’image se retrouve dégradée à la suite de ces filtrages.

3.2.2 Définitions de quelques unités radiométriques utiles

1) Angle solide

Le flux énergétique (Fig 3.11), qui est transmis de la source (radar) dS à la surface dA (surface de la parcelle définie précédemment), est délimité spatialement par un cône issu de la source dS , et s’appuyant sur le contour de dA d’orientation quelconque.

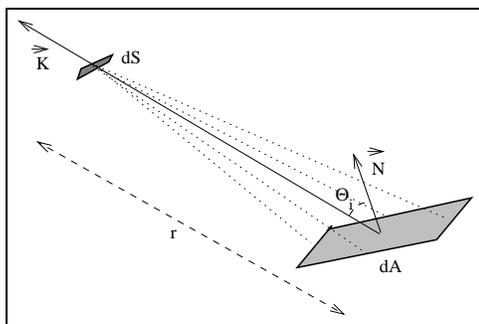


FIG. 3.11 – Représentation des notations utilisées.

L’angle solide s’exprime en fonction de l’angle entre la normale \vec{N} à dA et la direction du cône \vec{K} , par :

$$d\Omega = dA \frac{\vec{N} \cdot \vec{K}}{r^2} \quad (3.16)$$

r étant la distance séparant le radar de l’élément de surface dA .

On pose : $\vec{N} \cdot \vec{K} = \cos \Theta_i$ (Fig 3.11). nous cherchons à exprimer Θ_i en fonction des angles α , β et θ . Pour cela, utilisons les expressions des vecteurs \vec{N} et \vec{K} dans le repère lié au socle.

Dans R_{socle} , rappelons que \vec{K} et \vec{N} ont pour composantes respectives :

$$\vec{K} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{pmatrix}_{R_{socte}} \quad \vec{N} = \vec{x}' \wedge \vec{y}' = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}_{R_{socte}}$$

d'où :

$$\vec{N} \cdot \vec{K} = \cos \beta \cos(\theta - \alpha)$$

L'expression de l'angle solide s'écrit alors :

$$d\Omega = dA \frac{\cos \beta \cos(\theta - \alpha)}{r^2} \quad (3.17)$$

2) Flux d'énergie

Le flux d'énergie $d\Phi_i$ (exprimé en *Watt*) représente la quantité d'énergie dQ passant dans ce cône par unité de temps :

$$d\Phi_i = \frac{dQ}{dt}$$

C'est encore la quantité d'énergie transportée par un rayonnement dans un faisceau donné. Soit \vec{P} le vecteur de Poynting de l'onde :

$$\vec{P} = \frac{1}{\mu_o} \vec{E} \wedge \vec{B}$$

Le flux d'énergie a alors pour expression :

$$d\Phi_i = |\vec{P}| d\Omega = |\vec{P}| dA \frac{\cos \beta \cos(\theta - \alpha)}{r^2}$$

3) Intensité

Une source émet un faisceau de rayons dans un cône d'angle solide $d\Omega$; l'intensité de la source (en *Watt/sr*) a pour expression :

$$I_i = \frac{d\Phi_i}{d\Omega}$$

4) Eclaircement

Chaque élément de surface dA éclairé reçoit une quantité de lumière $d\Phi_i$. L'éclaircement E_i (en *Watt/m²*) se met sous la forme :

$$E_i = \frac{d\Phi_i}{dA}$$

et, peut, grâce à la formule (Eq 3.17) et (Eq 3.2.2), se développer en :

$$E_i = \frac{I_i d\Omega}{dA} = I_i \frac{\cos \beta \cos(\theta - \alpha)}{r^2} \quad (3.18)$$

que l'on peut alors représenter en fonction des angles α et β par la figure 3.12.

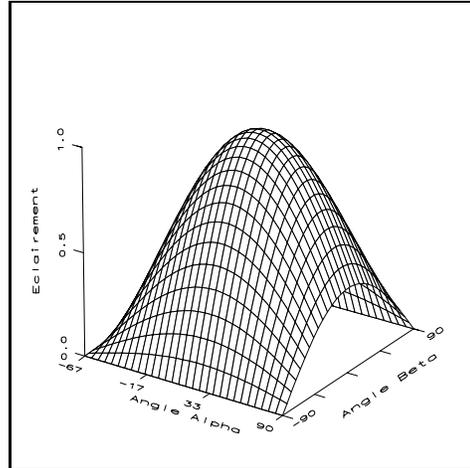


FIG. 3.12 – Eclaircement reçu par une surface, pour un radar d'angle $\theta = 23^\circ$, en fonction des angles α et β de la surface. Le maximum est atteint pour $\alpha = \theta$ et $\beta = 0$.

5) Emittance

L'émittance M s'exprime en $Watt/m^2$. C'est le rapport du flux total rayonné Φ_r par un élément de surface dA :

$$M = \frac{d\Phi_r}{dA}$$

6) Luminance incidente

Cette quantité est définie comme le flux lumineux émis par une surface, dans une direction donnée. Si dS est l'élément de surface de l'émetteur, alors sa surface apparente est $(\vec{n}_{dS} \cdot \vec{K})dS$, avec \vec{K} la direction d'émission et \vec{n}_{dS} la normale à la surface dS . Dans le cas du radar, on suppose que \vec{K} est confondu à la normale à dS du capteur ; la surface apparente est donc égale à dS . De ce fait, la luminance L_i (exprimée en $Watt m^{-2} sr^{-1}$) a pour expression :

$$L_i = \frac{dI_i}{dS}$$

7) Réflexion Bidirectionnelle

La réflexion bidirectionnelle R_{bd} a été proposé par Nicodemus et al. en 1977 [NICO-77]. Elle sert à caractériser la réflectance d'une surface. Cette réflexion correspond au rapport entre la luminance L_r émise par la surface dA dans la direction

\vec{V} du capteur, et l'éclairement dE_i de la surface, reçu de la source l'éclairant dans la direction \vec{K} (Fig 3.13), (notons que ces deux vecteurs sont confondues, mais de directions opposées dans le cas du système de visée d'un radar).

$$R_{bd}(\vec{K}, \vec{N}, \vec{V}) = \frac{L_r(\vec{K}, \vec{N}, \vec{V})}{E_i(\vec{K}, \vec{K})} \quad (3.19)$$

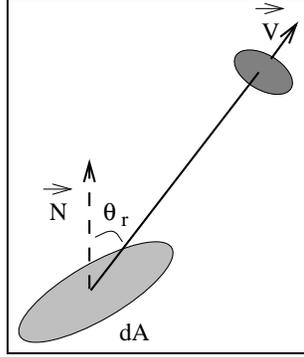


FIG. 3.13 – Schématisation de la réflexion.

En remplaçant l'expression de l'éclairement E_i (Eq 3.18), cette quantité devient :

$$R_{bd}(\vec{K}, \vec{N}, \vec{V}) = \frac{L_r(\vec{K}, \vec{N}, \vec{V})}{I_i(\vec{K}) \frac{\cos \beta \cos(\theta - \alpha)}{r^2}} \quad (3.20)$$

3.2.3 Modèle d'éclairement dans le cas du radar

Suite à ces rappels, nous établissons, dans cette partie, la relation entre l'énergie incidente émise par le radar sur une surface, et l'énergie réfléchi par cette surface atteignant le même radar. Nous utilisons le schéma de la figure (Fig 3.14).

1) Relation entre l'éclairement d'une surface et la luminance de la source

Cette relation va tenir compte de l'angle solide $d\Omega$ établi précédemment, et de l'angle solide $d\omega_i$:

$$d\omega_i = \frac{dS}{r^2}. \quad (3.21)$$

La luminance L_i vue de dA a pour expression :

$$L_i = \frac{dI_i}{dS} \quad \text{avec} \quad I_i = \frac{d\Phi_i}{d\Omega}$$

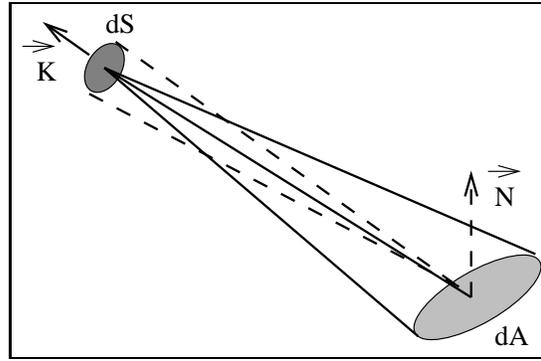


FIG. 3.14 – Modèle d'éclairément.

$$L_i = \frac{d^2\Phi_i}{dS d\Omega} = \frac{d^2\Phi_i}{dS dA \frac{\cos\beta \cos(\theta-\alpha)}{r^2}}$$

$$L_i = \frac{d^2\Phi_i}{d\omega_i dA \cos\beta \cos(\theta - \alpha)}$$

$$d^2\Phi_i = L_i d\omega_i dA \cos\beta \cos(\theta - \alpha)$$

D'où, l'éclairément dE_i de la surface dA , recevant le flux $d^2\Phi_i$ a pour expression :

$$dE_i = L_i d\omega_i \cos\beta \cos(\theta - \alpha) \quad (3.22)$$

2) Application de la loi de Lambert

Pour pouvoir établir l'expression de l'intensité rétrodiffusée, c'est-à-dire la relation entre l'image et les paramètres géométriques du terrain, il est nécessaire de considérer certaine hypothèse simplificatrice concernant le modèle de rétrodiffusion à appliquer, telle que la loi de Lambert. Avant de rappeler le principe de cette loi, notons qu'il existe de nombreux modèles de rétrodiffusion, d'une part théoriques et d'autre part empiriques, dont nous donnons quelques détails succincts ci-dessous.

Les modèles théoriques [ELLI-94] [LEVO-96] existants ont généralement été établis pour des objets géométriques simples, et ne prennent pas simultanément en compte les interactions de surface et de volume telles qu'elles se présentent dans les couverts naturels. Cependant, nous pouvons remarquer que ces modèles théoriques se décomposent suivant deux groupes distincts.

Le premier groupe prend uniquement en compte la réflexion spéculaire des éléments. La surface est alors modélisée par des micro-facettes d'orientation aléatoire. Du fait de cette orientation, certaines d'entre elles ne sont pas illuminées par l'onde incidente; elles ne sont donc pas prises en compte dans le modèle. Ces micro-facettes

sont, de plus, considérées comme des miroirs parfaits ce qui permet de caractériser entièrement la réflexion par la formule de Fresnel. Parmi les modèles physiques développés, donnons en exemple le modèle de Torrance-Sparrow-Blinn-Cook [TORR-67] dont le coefficient de réflexion ρ_r est :

$$\rho_r = \frac{D G \rho_\lambda}{(\vec{N} \cdot \vec{K})(\vec{N} \cdot \vec{V})\pi}$$

avec D la distribution des micro-facettes, c'est à dire la fraction de micro-facettes par orientation \vec{H} , telle que :

$$D = \frac{1}{4 m^2 \cos^4 \beta_m} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta_m}{m^2}\right)$$

avec

$$\beta_m = \arccos(\vec{N} \cdot \vec{H})$$

et, m l'écart-type des pentes des micro-facettes.

G est un facteur modélisant l'atténuation géométrique :

$$G = \min \left[1, \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{V})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})}, \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{K})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})} \right]$$

ρ_λ est le coefficient de réflexion de Fresnel :

$$\rho_\lambda = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left(1 + \frac{[c(g + c) - 1]^2}{[c(g - c) - 1]^2} \right)$$

avec $c = (\vec{K} \cdot \vec{H})$ et $g = \sqrt{\left(\frac{n_{2\lambda}}{n_{1\lambda}}\right)^2 + (\vec{K} \cdot \vec{H})^2} - 1$, $n_{1\lambda}$ et $n_{2\lambda}$ étant les indices respectifs des deux milieux (air-micro-facette).

Pour utiliser ce modèle, il faut bien évidemment avoir connaissance de la distribution de ces micro-éléments, ce qui n'est pas notre cas.

Le deuxième groupe de modèles théoriques est davantage fondé sur la réflexion diffuse. Ces modèles prennent alors en compte les effets d'inter-réflexion dans le modèle des micro-facettes, également les effets de cibles sous-jacentes à la surface des micro-facettes. Comme précédemment, ces modèles sont difficilement utilisables dans notre application puisqu'ils demandent la connaissance de diverses fonctions de distribution pour modéliser l'objet imagé.

En ce qui concerne les modèles empiriques [BAYE-91], ils sont nombreux et, tous, ont été établis par ajustement aux données. Cet ajustement a été réalisé par une méthode itérative fondée sur un calcul de moindres carrés. Ces modèles se regroupent suivant trois principales catégories : les modèles en cosinus, les modèles polynomiaux et les modèles de niveau de gris moyen. Le tableau (Tab 3.2) présente les modèles les plus courants. A la vue de ces modèles, une question se pose : lequel est le plus adapté à notre problème ? Généralement, le modèle est déterminé par l'utilisation d'un modèle numérique de terrain de référence. Or, sans cette référence ce qui est notre cas, il est impossible de choisir un modèle plutôt qu'un autre. Comme indiqué précédemment, nous avons donc préféré considérer de simples hypothèses physiques sur le terrain, évitant ainsi le problème de choix.

Modèles en Cosinus	$r = m \cos(i)$
	$r = m \cos^2(i)$
	$r = m \cos^q(i) + b$
	$r = m \cos^q(i + \text{offset}) + b$
	$r = 10 \log \left(\frac{\cos^{\nu+1}(i)}{\sin^\mu(i)} \right)$
Modèles Polynomiaux	$r = a * i^2 + b * i + c$
	$r = a * i^3 + b * i^2 + c * i + d$
	$r = \begin{cases} a * i^2 + b * i + c, & \text{si } i \leq r \\ d * i + e, & \text{si } i > r \end{cases}$
	$r = a * i_r + b * i_a + c * i_r^2 + d * i_a^2 + e * i_r * i_a + f$
	$r = a * sl + b * as + c * sl^2 + d * as^2 + e * sl * as + f$
Modèles de niveau de gris Moyen	$r = \bar{r}(i)$
	$r = \bar{r}(sl)$
	$r = \bar{r}(as)$

i : angle d'incidence local, i_r et i_a : composantes respectives de i en site et en azimuth, sl et as : pente et aspect, $a, b, c, d, e, f, m, q, \text{offset}, \mu, \nu$: coefficients, exposants, et offsets.

TAB. 3.2 – Différents modèles de rétrodiffusion empiriques, décrivant les variations de niveaux de gris de l'image (r) en fonction des divers paramètres géométriques du terrain.

Rappelons la loi de Lambert [LEVI-68]. Une surface *lambertienne* est une surface diffusant uniformément l'intensité lumineuse I_r dans toutes les directions. Cette intensité I_r est fonction du cosinus de l'angle θ_r entre la direction de réémission \vec{V} de la lumière et la normale à la surface dA de la parcelle.

$$I_r = I_o \cos \theta_r \quad (3.23)$$

L'expression de la luminance réfléchie se met sous la forme : $L_r = \frac{I_r}{dA \cos \theta_r}$

D'après [LEVI-68], L_r est constante quelle que soit la direction de réémission (ce qui veut dire qu'une surface *lambertienne* apparaît également brillante indépendamment de la direction selon laquelle elle est vue), on a donc :

$$I_o = L_r dA \quad (3.24)$$

Le flux lumineux Φ_i , incident sur une parcelle de surface dA , considérée *lambertienne*, est totalement dispersé en un flux réfléchi Φ_r dans toutes les directions du demi-espace défini par cette surface (l'absorption due au contenu de la parcelle est considérée comme négligeable).

$$\Phi_r = R_L \Phi_i$$

$$I_r = \frac{d\Phi_r}{d\omega_r} \quad \text{avec} \quad d\omega_r = 2\pi \sin \theta_r d\theta_r$$

$$\Phi_r = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi I_o \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r$$

$$\Phi_r = \pi I_o$$

$$L_r = \frac{I_o}{dA} = \frac{\Phi_r}{\pi dA} = \frac{R_L \Phi_i}{\pi dA}$$

$$L_r = \frac{R_L}{\pi} I_i(\vec{K}) \frac{\cos \beta \cos(\theta - \alpha)}{r^2}$$

Dans le cas du radar, $R_L = \sigma_o$ est le coefficient de rétrodiffusion du matériau. L'expression de l'intensité rétrodiffusée en fonction de l'intensité incidente et de l'orientation de la parcelle est donc :

$$I_r = \frac{\sigma_o}{\pi} I_i(\vec{K}) dA \frac{\cos^2 \beta \cos^2(\theta - \alpha)}{r^2} \quad (3.25)$$

Cette formule sera à la base de nos travaux de radarclinométrie. Elle suppose le sol lambertien, ce qui n'est probablement pas vrai. Cette hypothèse sera étudiée et discutée au chapitre 7.

Chapitre 4

Procédé de la Restitution du Relief

Après avoir procédé à l'analyse de la géométrie et de la radiométrie des images radar, nous obtenons l'expression de l'intensité rétrodiffusée I_r . Nous proposons une stratégie pour l'estimation des altitudes de chaque pixel de l'image radar. Elle s'appuie sur une première étape de résolution directe d'une expression simplifiée de l'intensité rétrodiffusée, et sur une seconde étape de résolution itérative de l'équation exacte.

4.1 Expression de l'intensité rétrodiffusée

A partir de l'expression de l'intensité rétrodiffusée établie au chapitre précédent (Eq 3.25), nous pouvons effectuer un certain nombre de simplifications en considérant les constantes de calibration du système d'acquisition radar. Pour cela, considérons la puissance reçue au niveau du radar. Cette puissance s'exprime par l'intermédiaire de l'équation du radar, qui prend en compte toutes les pertes subies par l'onde électromagnétique sur son trajet cible (parcelle imagée) - antenne [NASR-89]:

$$P_r = \frac{P_e G_e}{L_e} \frac{1}{4\pi r_e^2 L_{me}} \sigma \frac{1}{4\pi r_r^2 L_{mr}} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi L_r} \frac{1}{L_p} \quad (4.1)$$

$$(1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5) \quad (6)$$

Le terme (1) représente la puissance émise, avec P_e la puissance de l'émetteur, G_e le gain de l'émetteur dans la direction de la cible, et L_e le facteur d'absorption dans l'émetteur.

Le terme (2) représente la propagation vers la cible, avec r_e la distance entre l'antenne émettrice et la cible, et L_{me} les pertes sur le trajet (antenne-cible) de l'onde électromagnétique.

Le terme (3) concerne la cible ; plus couramment, il est appelé surface équivalente radar (SER).

Le terme (4) représente la propagation vers l'antenne, avec r_r la distance entre l'antenne réceptrice et la cible, et L_{mr} les pertes sur le trajet (cible-antenne) de l'onde électromagnétique.

Le terme (5) représente la surface d'absorption de l'antenne réceptrice, avec G_r le gain à la réception de l'onde, λ la longueur d'onde du radar, et L_r les pertes dans le récepteur.

Le terme (6) correspond aux effets de la polarisation, L_p étant les pertes dues à la polarisation.

Lorsque l'on parle de puissance ou d'intensité pour un système radar donné, on pose généralement K_s paramètre de proportionnalité, également appelé constante de calibration, qui traduit le bilan énergétique d'une liaison radar [HARD-95]; son expression est :

$$K_s = \frac{P_e G_e G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 r_e^2 r_r^2} \frac{1}{L_{me} L_{mr} L_e L_r L_p} \quad (4.2)$$

qui simplifie l'équation (Eq 4.1) en :

$$P_r = K_s \sigma \quad (4.3)$$

Ce paramètre de proportionnalité se retrouve dans l'expression de l'intensité (Eq 3.25). Il s'écrit alors :

$$K_s = \frac{I_i(\vec{K})}{\pi r^2} \quad (4.4)$$

avec σ , correspondant aux paramètres liés au terrain, et qui s'écrit selon notre approche :

$$\sigma = \sigma_o dA \cos^2 \beta \cos^2(\theta - \alpha) \quad (4.5)$$

où σ_o est le coefficient de rétrodiffusion du matériau.

Nous obtenons une équation simplifiée de l'intensité rétrodiffusée en remplaçant la surface dA par son expression :

$$I_r = K_s \sigma_o R_d R_a \frac{\sin \theta \cos^2(\theta - \alpha)}{\sin(\theta - \alpha)} \cos \beta \quad (4.6)$$

La radarclinométrie traite donc l'équation (Eq 4.6), avec pour objectif de déterminer l'altitude de chaque pixel du sol, à partir de la connaissance de I_r en chaque pixel, par intégration des angles α et β .

Avant de présenter la stratégie qui a été adoptée pour la radarclinométrie, il est utile de rappeler la relation entre cette intensité ainsi établie, et la radiométrie des pixels d'une image radar, notée $rad_{i,j}$ (chapitre 3). Cette valeur peut se trouver sous différentes formes : valeur complexe, ou réelle. Ainsi, en ce qui concerne les systèmes d'imagerie radar ERS-1, JERS-1, et RADARSAT, cette valeur est généralement réelle (images PRI) ; c'est en fait l'amplitude du signal rétrodiffusé en direction du radar. Donc, pour avoir l'intensité rétrodiffusée, il suffit d'élever cette amplitude au carré. En faisant apparaître les différentes inconnues, on pose :

$$I_r = rad_{i,j}^2(K_s, \sigma_o, \theta, \alpha, \beta) \quad (4.7)$$

Reste également à déterminer la valeur des diverses constantes du problème, telles que K_s la constante de calibration du radar et σ_o le coefficient de rétrodiffusion des éléments du terrain. Ces deux inconnues seront évaluées simultanément au chapitre 7. En effet, en considérant un sol plat tel que les deux angles α et β du terrain soient égaux à 0° , l'équation (Eq 4.6), avec (Eq 4.7) devient :

$$I_{r_{solplat}} = rad_{i,j}^2(K_s, \sigma_o, \theta, 0, 0) = K_s \sigma_o R_d R_a \cos^2 \theta \quad (4.8)$$

En réalisant le rapport entre l'intensité rétrodiffusée par une parcelle d'orientation quelconque (Eq 4.6) et l'intensité rétrodiffusée par un sol plat (Eq 4.8), les deux constantes disparaissent. Ce rapport $Q(\theta, \alpha, \beta)$ s'écrit :

$$Q(\theta, \alpha, \beta) = \frac{\sin \theta \cos^2(\theta - \alpha) \cos \beta}{\cos^2 \theta \sin(\theta - \alpha)} \quad (4.9)$$

Notre objectif est maintenant d'établir une stratégie pour déterminer l'altitude en chaque pixel.

4.2 Stratégie d'estimation des altitudes

D'après l'équation de l'intensité (Eq 4.9), nous allons établir une méthode pour estimer la hauteur en chaque pixel. Pour cela, on peut tout d'abord remarquer que l'équation (Eq 4.9) n'est généralement pas inversible (équation à trois inconnues). En effet, nous ignorons généralement les angles α et β de la parcelle. Par contre, l'angle d'incidence du faisceau radar θ peut être déterminé à partir des paramètres orbitaux. Le problème revient donc à inverser une équation à deux inconnues, soit estimer les deux angles α et β à partir de (Eq 4.9). Cette estimation reste bien évidemment un problème sous-dimensionné.

Notre démarche se fera donc en deux étapes. Tout d'abord, nous négligerons l'angle azimutal β , et plus précisément en posant $\beta = 0$. Cette approximation se retrouve également dans les travaux de *shape from shading* et plus sûrement lorsqu'il s'agit

du système d'imagerie radar [GUIN-90]. Ceci nous permettra de dresser une carte d'altitude approximative, par inversion de (Eq 4.9) simplifiée en :

$$Q(\theta, \alpha, 0) = \frac{\sin \theta \cos^2(\theta - \alpha)}{\cos^2 \theta \sin(\theta - \alpha)} \quad (4.10)$$

et intégration le long des lignes de l'image. Puis, dans une deuxième étape, nous corrigerons cette carte par une méthode itérative prenant en compte α et β dans un schéma sous contrainte de continuité.

Nous allons tout d'abord apporter quelques éléments pouvant justifier le passage de l'équation (Eq 4.9) à (Eq 4.10).

4.2.1 Justification de l'équation (Eq 4.10)

Les deux angles α et β sont les inclinaisons de la parcelle imagée par rapport aux directions distance d'une part, et azimut d'autre part. Ils ont a priori un même domaine de variation lié au relief de la région d'intérêt.

Etablissons une approximation par développement limité par rapport à α et β de l'équation (Eq 4.9), ou plutôt de la fonction f , telle que :

$$f(\alpha, \beta) = \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} Q(\alpha, \beta)$$

avec

$$f(\alpha, \beta) = \frac{\cos^2(\theta - \alpha) \cos \beta}{\sin(\theta - \alpha)}$$

La fonction approchée de f , notée f_d s'écrit :

$$\begin{aligned} f_d(\alpha + \delta\alpha, \beta + \delta\beta) &= f(\alpha, \beta) + \frac{\partial f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} \delta\alpha + \frac{\partial f(\alpha, \beta)}{\partial \beta} \delta\beta + \\ &\quad \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha^2} \delta\alpha^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f(\alpha, \beta)}{\partial \beta^2} \delta\beta^2 + \frac{\partial^2 f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha \partial \beta} \delta\alpha \delta\beta \end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} &= 2 \cos(\theta - \alpha) \cos \beta + \frac{\cos^3(\theta - \alpha) \cos \beta}{\sin^2(\theta - \alpha)} \\ \frac{\partial f(\alpha, \beta)}{\partial \beta} &= -\frac{\cos^2(\theta - \alpha) \sin \beta}{\sin(\theta - \alpha)} \\ \frac{\partial^2 f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha^2} &= 2 \sin(\theta - \alpha) \cos \beta + 3 \frac{\cos^2(\theta - \alpha) \cos \beta}{\sin(\theta - \alpha)} + 2 \frac{\cos^4(\theta - \alpha) \cos \beta}{\sin^3(\theta - \alpha)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 f(\alpha, \beta)}{\partial \beta^2} = -\frac{\cos^2(\theta - \alpha) \cos \beta}{\sin(\theta - \alpha)}$$

$$\frac{\partial^2 f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha \partial \beta} = -2 \cos(\theta - \alpha) \sin \beta - \frac{\cos^3(\theta - \alpha) \sin \beta}{\sin^2(\theta - \alpha)}$$

Prenons un exemple concret, le cas du système radar ERS-1 ; son angle d'incidence θ est de 23° . Considérons également des valeurs pour les angles de la parcelle, au voisinage de $\alpha = 0$ et $\beta = 0$. La fonction approchée f_d a pour expression :

$$f_d(\delta\alpha, \delta\beta) = 2.17 + 6.99\delta\alpha + 15.84\delta\alpha^2 - 1.08\delta\beta^2$$

Par cet exemple particulier, le développement limité de $f(\alpha, \beta)$ met en évidence la prédominance de l'angle α dans la variation du rapport entre l'intensité rétrodiffusée par une parcelle d'orientation quelconque et l'intensité rétrodiffusée par un sol plat, ce qui permet en partie de justifier l'hypothèse d'un angle $\beta = 0$. Ceci aurait pu être constaté pour d'autres jeux de valeur de θ , α et β , à condition que α ne soit pas trop proche de θ .

4.2.2 Résolution de l'équation (Eq 4.10).

Grâce à la justification établie précédemment, on peut négliger, en première approximation, le terme en β , et donc on inversera une équation à une inconnue α connaissant le rapport Q (Eq 4.10). Pour résoudre cette équation, on pose :

$$Q' = Q(\theta, \alpha, 0) \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta}$$

et

$$x = \sin(\theta - \alpha)$$

Il faut alors résoudre l'équation du second degré en x :

$$x^2 + Q'x - 1 = 0 \quad (4.11)$$

En tenant compte du domaine de variation de l'angle α , établi lors de l'étude de la géométrie des images radar (§ 3.1), la solution retenue a la forme suivante :

$$x_s = \sin(\theta - \alpha_s) = -\frac{Q'}{2} + \frac{\sqrt{Q'^2 + 4}}{2}$$

Le choix du “+” pour la solution est nécessaire pour avoir $x_s > 0$ et donc $\alpha_s < \theta$.

Donc, l'angle α_s vérifiant l'équation (Eq 4.10) a pour expression :

$$\alpha_s = \theta - \arcsin \left(-\frac{Q'}{2} + \frac{\sqrt{Q'^2 + 4}}{2} \right) \quad (4.12)$$

Le calcul de l'angle α permet ainsi d'évaluer les différences d'altitude locale δh en un pixel (i, j) :

$$\delta h_{i,j}(\alpha) = L(\alpha) \sin \alpha \quad (4.13)$$

avec $L(\alpha)$ la longueur de terrain vue par le faisceau radar dans le plan (XOZ) , vérifiant (Eq 3.2).

4.2.3 Méthode d'intégration

Le problème est alors d'évaluer les altitudes $H_{i,j}$ réelles en chaque pixel de l'image. Pour cette évaluation, on réalise un traitement par ligne. Considérons la ligne i de l'image. Nous évaluons alors les altitudes $h_{i,j}$ de chaque pixel de cette ligne en sommant les différences d'altitude locale jusqu'au pixel considéré :

$$h_{i,j}(\alpha) = \sum_{k=0}^j \delta h_{i,k}(\alpha) \quad (4.14)$$

Puis, nous translatons ces altitudes ainsi établies, de façon que l'altitude minimale de chaque ligne corresponde à une altitude h_o constante que l'on fixe égale à 0 m. L'altitude $H_{i,j}$ pour un pixel (i, j) donné s'écrit donc :

$$H_{i,j}(\alpha) = h_{i,j}(\alpha) - \min_j \{h_{i,j}(\alpha)\} + h_o \quad (4.15)$$

Ce procédé de calcul des altitudes en chaque pixel de l'image ne dépend pas du sens de la sommation des différences d'altitude locale. Pour démontrer cette indépendance vis à vis du sens de la sommation, considérons en un pixel (i, j) donné, l'altitude $H_{i,j}$ obtenue par sommation de gauche à droite des $\delta h(\alpha)$, telle que :

$$H_{i,j}(\alpha) = h_i^o + \sum_{k=0}^j \delta h_{i,k}(\alpha) \quad (4.16)$$

$$h_i^o = h_o - \min_j \left\{ \sum_{k=0}^j \delta h_{i,k}(\alpha) \right\}$$

et l'altitude $\tilde{H}_{i,j}$ obtenue par sommation de droite à gauche des $\delta h(\alpha)$, telle que :

$$\tilde{H}_{i,j}(\alpha) = \tilde{h}_i^o - \sum_{k=j+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) \quad (4.17)$$

$$\tilde{h}_i^o = h_o + \min_j \left\{ \sum_{k=j+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) \right\}$$

On remarque que :

$$H_{i,j}(\alpha) - \tilde{H}_{i,j}(\alpha) = h_i^o - \tilde{h}_i^o + \sum_{k=0}^n \delta h_{i,k}(\alpha) = Cte$$

puisque

$$\sum_{k=0}^n \delta h_{i,k}(\alpha) = Z = Cte$$

On considère alors j_o , tel que :

$$h_i^o = h_o - \min_j \left\{ \sum_{k=0}^j \delta h_{i,k}(\alpha) \right\} = h_o - \sum_{k=0}^{j_o} \delta h_{i,k}(\alpha)$$

c'est à dire, j_o est tel que :

$$\begin{aligned} \forall j', \sum_{k=0}^{j'} \delta h_{i,k}(\alpha) &\geq \sum_{k=0}^{j_o} \delta h_{i,k}(\alpha) \\ \Rightarrow \forall j', \sum_{k=0}^{j'} \delta h_{i,k}(\alpha) + Z &\geq \sum_{k=0}^{j_o} \delta h_{i,k}(\alpha) + Z \\ \Rightarrow \forall j', \sum_{k=j'+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) &\geq \sum_{k=j_o+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) \end{aligned}$$

Donc, j_o vérifie aussi :

$$\tilde{h}_i^o = h_o + \min_j \left\{ \sum_{k=j+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) \right\} = h_o + \sum_{k=j_o+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha)$$

Au pixel (i, j_o) , on a donc :

$$H_{i,j_o}(\alpha) = h_i^o + \sum_{k=0}^{j_o} \delta h_{i,k}(\alpha) = h_o - \sum_{k=0}^{j_o} \delta h_{i,k}(\alpha) + \sum_{k=0}^{j_o} \delta h_{i,k}(\alpha) = h_o \quad (4.18)$$

de même :

$$\tilde{H}_{i,j_o}(\alpha) = \tilde{h}_i^o - \sum_{k=j_o+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) = h_o + \sum_{k=j_o+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) - \sum_{k=j_o+1}^n \delta h_{i,k}(\alpha) = h_o \quad (4.19)$$

Ceci montre que l'altitude $H_{i,j}(\alpha)$ obtenue par une sommation de gauche à droite (Eq 4.18), est égale à l'altitude $\tilde{H}_{i,j}(\alpha)$ obtenue par une sommation de droite à gauche (Eq 4.19), et ainsi démontre l'indépendance des altitudes vis à vis du sens de la sommation.

L'évaluation de l'altitude en chaque pixel de l'image radar dans cette étape, est donc assez simple, puisque connaissant le rapport Q , il est possible de calculer α et ainsi selon cette étape d'évaluer les altitudes. Or, le rapport Q demande la connaissance de la radiométrie d'un sol plat que l'on va supposer connue pour la suite, ce point délicat étant traité plus loin (chapitre 7).

4.2.4 Autre méthode d'intégration

Une autre méthode d'intégration a été proposée par Hind TAUD [TAUD-95], consistant à sommer initialement l'intensité des pixels jusqu'au pixel considéré, sur une même ligne de l'image radar préalablement filtrée. Précisons que la relation de base utilisée dans ces travaux est différente de celle que nous proposons. En effet, elle dépend uniquement du terme surfacique, le modèle de rétrodiffusion étant supposé constant quels que soit l'orientation et le couvert du terrain considéré. Cette méthode donne alors directement l'altitude du point considéré, mais il ne s'agit que d'une valeur approchée de son altitude. La démonstration est fort simple ; calculons l'altitude au pixel j_p , connaissant celle d'un pixel de référence j_o . Par sommation, l'intensité du pixel j_p devient :

$$I_{j_p}^{j_o} = \sum_{j=j_o}^{j_p} I_j$$

Considérons alors la fonction F , qui donne la différence d'altitude en un pixel par rapport à un autre pixel, connaissant la valeur de l'intensité ; dans notre cas, en posant :

$$\frac{1}{I_c} = \frac{\cos^2 \theta}{2 I_o \sin \theta}$$

la fonction F a pour expression :

$$F(I) = \frac{\sin \theta}{-\frac{I}{I_c} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{I}{I_c}\right)^2 + 4}} \sin \left(\theta - \arcsin \left(-\frac{I}{I_c} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{I}{I_c}\right)^2 + 4} \right) \right)$$

On a donc :

$$F(I_{j_p}^{j_o}) = F\left(\sum_{j=j_o}^{j_p} I_j\right)$$

Or, la somme ne peut pas commuter avec la fonction F (sauf si F est une fonction linéaire, ce qui n'est pas notre cas). D'où :

$$F(I_{j_p}^{j_o}) \neq \sum_{j=j_o}^{j_p} F(I_j)$$

ce qui implique : $\Delta H_{j_p}^{j_o} \neq \sum_{j=j_o}^{j_p} \delta h_j$

Ce résultat indique que la valeur $\Delta H_{j_p}^{j_o}$ de l'altitude, estimée par cette méthode, ne peut être qu'une valeur approchée. De ce fait, cette méthode n'a pas été retenue pour la stratégie de restitution, optant ainsi pour la sommation des différences d'altitudes.

4.3 L'approche markovienne

4.3.1 Principe

La stratégie d'estimation des altitudes, décrite précédemment, repose essentiellement sur le fait que l'angle azimutal des parcelles peut être négligé. En pratique, en l'absence de speckle dans l'image radar initiale, cette approximation entraîne un léger biais sur les altitudes restituées comme nous le vérifierons au chapitre 5. Or, les images radar souffrent malheureusement de la présence du speckle (chapitre 3). Par intégration ligne par ligne telle que nous le proposons, un biais bien plus important sur les altitudes se propage en chaque pixel de l'image de relief, créant ainsi d'importantes discontinuités suivant la direction azimutale. L'image de relief (Fig 4.2), obtenue à partir de l'image radar (Fig 4.1), illustre ces discontinuités, se traduisant par un fort lignage. Ce défaut très important masque en pratique celui dû à l'approximation de l'angle β , et la seconde étape de la reconstruction devra tout autant corriger ce défaut que tenir compte de l'approximation. Nous allons donc corriger ces discontinuités par une méthode itérative, sous contrainte de continuité des parcelles, prenant en compte les deux angles du terrain α et β . Ceci sera réalisé

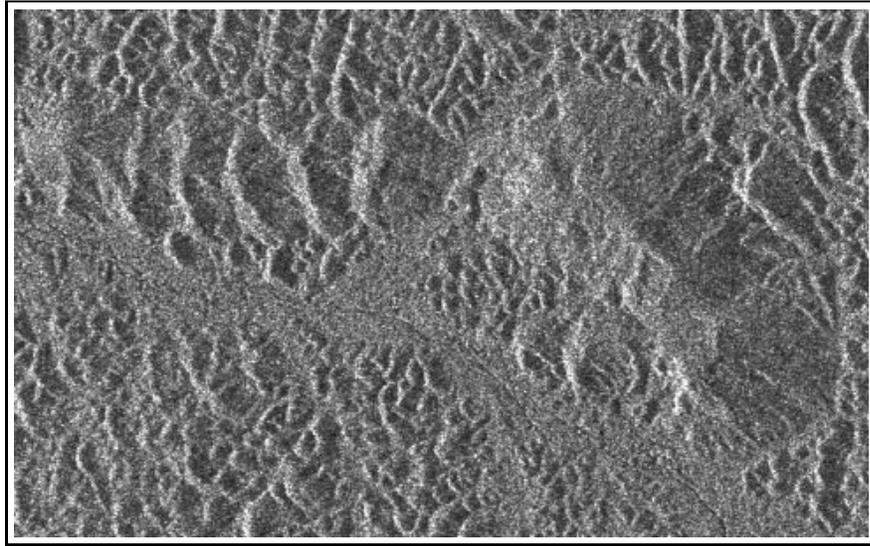


FIG. 4.1 – Image radar d'une région de la Guyane (montagne Marie-Hilare) acquise par le système ERS-1 (© ESA).

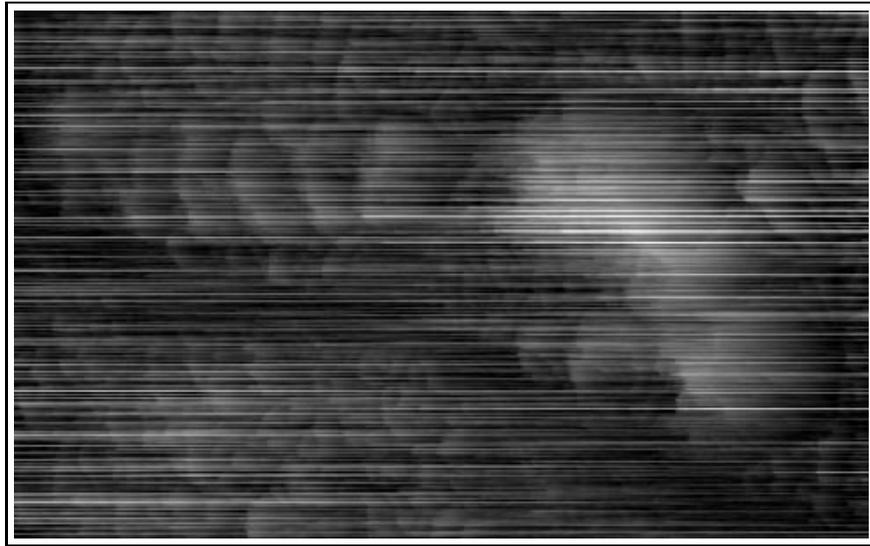


FIG. 4.2 – Relief obtenu à partir de l'image radar (Fig 4.1), et résultant de la restitution par simple approximation d'angles azimutaux nuls. La présence du speckle dans les données radar initiales provoque d'importantes discontinuités dans la carte d'altitude.

par une restauration markovienne, utilisant un recuit simulé. Pour cela, il est, tout d'abord, nécessaire de mettre en évidence les propriétés que doit vérifier un modèle numérique de terrain.

Propriétés des MNT

Au niveau des données altimétriques, il doit être possible d'extraire des courbes de niveau continues. Celles-ci doivent également avoir la propriété d'être fermées (mis à part aux bords des cartes), et surtout sans croisement entre elles. De plus, quelle que soit l'échelle en altitude utilisée, ces données doivent préserver un certain nombre de détails fins des formes du relief. Sur l'image de relief (Fig 4.2), ces détails se devinent malgré l'importance du lignage.

Au niveau des différences d'altitude inter-pixel, des propriétés statistiques doivent également être respectées. Ces propriétés sont quasiment identiques, pour les dénivelés déterminés suivant l'axe en site et suivant l'axe en azimuth (Fig 4.3 a). Les mesures statistiques ont été estimées sur un grand nombre de MNT¹, mettant ainsi en évidence la robustesse de l'écart-type (Fig 4.4), quasiment égal quelle que soit la direction utilisée pour estimer les différences d'altitude. On constate sur la figure (Fig 4.3 b) que ces critères ne sont pas respectés pour la carte d'altitude calculée précédemment (Fig 4.2).

4.3.2 Restauration markovienne

Nous proposons d'exprimer la qualité d'une solution trouvée comme la somme de deux termes. L'un mesurera la capacité de la surface obtenue à fournir une intensité proche de celle observée dans l'image. Ce terme est appelé terme d'attache aux données dans la littérature des champs markoviens. L'autre mesurera la qualité de continuité de la surface. Ce terme est appelé terme de régularisation. Ces deux termes s'exprimeront comme des énergies et l'on cherchera à minimiser l'énergie globale par une technique de modification itérative de la solution. Afin de résoudre ce difficile problème d'optimisation, nous nous placerons dans l'hypothèse markovienne : l'énergie en un point ne dépend que d'un petit voisinage autour de ce point, et l'énergie globale est la somme des énergies en un point.

L'énergie en un pixel à la $k^{\text{ième}}$ itération peut alors s'écrire :

$$U^{(k)}(x) = U_I^{(k)}(x) + \nu U_v^{(k)}(x). \quad (4.20)$$

avec ν un paramètre de pondération entre $U_v^{(k)}$ l'énergie de régularisation et $U_I^{(k)}$ l'énergie d'attachement aux données.

$U_I^{(k)}$ est égale à :

1. 24 Modèles Numériques de Terrain de région du continent américain (Honolulu, états du Colorado, de Californie, de Virginie, etc) ont été récupérés via ftp du site //spectrum.xeros.com/pub/map/dem/. Leur résolution au sol est de 30 mètres × 30 mètres, la précision est de 1 mètre sur l'altitude. La surface de ces régions cartographiées tourne autour de 144 km², ce qui représente 160.000 points sur le MNT

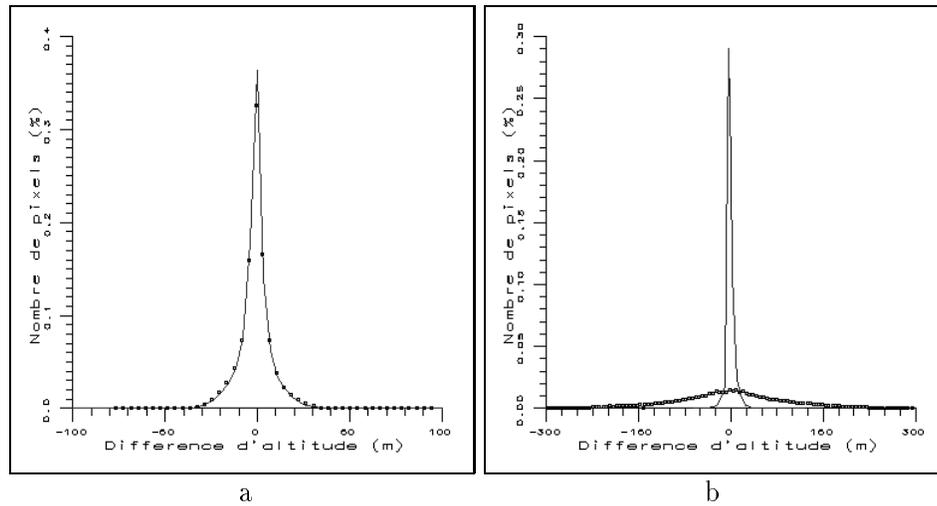


FIG. 4.3 – Histogrammes des différences d'altitude inter-pixel déterminées suivant l'axe en site (—) et suivant l'axe en azimut (. . .), en a : à partir du MNT de la région d'Aix en Provence (France), et en b : à partir de la carte d'altitude (Fig 4.2) obtenue par simple approximation sur l'angle azimutal.

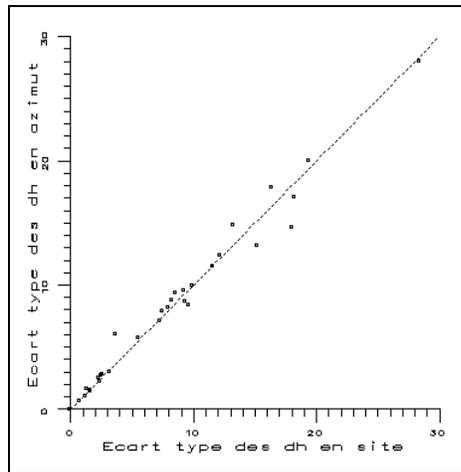


FIG. 4.4 – Ecart type des différences d'altitude estimées pour divers modèles numériques de terrain et suivant deux directions perpendiculaires entre elles (site/azimut).

$$U_I^{(k)}(x) = \begin{cases} \gamma^2 & \text{si } \frac{|I(x) - I(\theta, \alpha^k, \beta^k)|}{I(\theta, 0, 0)} > \gamma \\ \left(\frac{|I(x) - I(\theta, \alpha^k, \beta^k)|}{I(\theta, 0, 0)} \right)^2 & \text{sinon} \end{cases}$$

avec

$$I(\theta, \alpha^k, \beta^k) = K_s \sigma_o A(\theta, \alpha^k, \beta^k) \cos^2(\theta - \alpha^k) \cos^2 \beta^k \quad (4.21)$$

$I(x)$ est l'intensité du pixel x donnée par l'image radar. $I(\theta, 0, 0)$ représente la valeur de l'intensité du sol plat, que l'on suppose connue. Sa détermination sera plus amplement traitée au cours du chapitre 7. α^k et β^k sont les $k^{i\grave{e}me}$ estimations des angles α et β ; leurs expressions exactes sont établies dans la partie 4.3.3. $U_I^{(k)}(x)$ est essentiellement une énergie quadratique en fonction de l'erreur de reconstruction de l'intensité I par changement d'orientation de la facette. Cette énergie a pour effet de faire évoluer l'orientation de la surface reconstruite de façon que la différence $I(x) - I(\theta, \alpha^k, \beta^k)$ soit nulle. Mais, afin de tenir compte d'un bruit de speckle possiblement très fort, nous limitons la pénalité à la valeur γ^2 pour des écarts supérieurs à γ (Fig 4.5). Ainsi, un pixel affecté d'un très fort bruit de speckle ne dégradera pas la totalité de la surface.

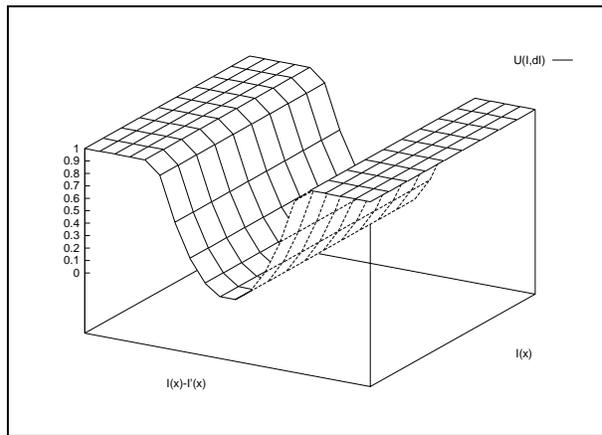


FIG. 4.5 – Comportement de l'énergie d'attache aux données en fonction de $I(x)$: intensité de l'image radar, et de $I(x) - I'(x)$, où $I'(x)$ est l'intensité estimée par la relation de base de nos travaux.

Et, $U_v^{(k)}$ correspond au terme contextuel, ce qui contraint le terrain à être continu et régulier :

$$U_v^{(k)} = \sum_{x_c} (H^{(k)}(x_c) - H^{(k)}(x))^2$$

avec x_c les pixels voisins à x en 8-connexité.

Après avoir posé la contribution en énergie de chaque pixel, considérons alors le fonctionnement de l'optimisation. C'est une méthode itérative ; chaque itération va consister à traiter tous les pixels de l'image, tirés dans un ordre aléatoire, et à modifier l'orientation de la facette qu'ils recouvrent. C'est une méthode de recuit simulé, c'est à dire que l'on changera l'orientation d'un pixel, non seulement si la nouvelle orientation fournit une énergie (Eq 4.20) plus faible que l'orientation courante, mais aussi parfois si elle dégrade cette énergie. Cette stratégie expliquée ci-dessous, permet de trouver l'optimum global de l'énergie et non pas seulement un optimum local dépendant de la solution initiale $I_x^{(0)}$.

Supposons que l'itération k soit terminée, ayant permis d'obtenir la carte d'altitude notée H^k , et de calculer, pour chaque pixel de l'image, les angles α^k et β^k , l'intensité $I(\theta, \alpha^k, \beta^k)$, et l'énergie $U^{(k)} = U_I^{(k)} + \nu U_v^{(k)}$. Cette itération k a utilisé une variable $T^{(k)}$ appelée "température" dont nous expliciterons l'usage plus loin.

Réalisons alors le traitement de l'itération suivante $k + 1$. Nous commençons tout d'abord par calculer une température $T^{(k+1)}$. Puis, nous allons traiter successivement tous les pixels en les visitant l'un après l'autre dans un ordre aléatoire. Considérons plus particulièrement ici, le traitement d'un pixel de position (i, j) dans l'image (avec i et j , respectivement la ligne et la colonne de l'image). Pour ce pixel, nous proposons une nouvelle altitude $H^{(k+1)}$, établie par la relation :

$$H_{(i,j)}^{(k+1)} = H_{(i,j)}^{(k)} + \Delta H$$

avec ΔH une variable aléatoire de loi uniforme comprise entre $-\eta$ et η . La détermination de la valeur η prend en compte les considérations suivantes :

- utiliser une valeur très forte, de l'ordre de l'altitude maximale du relief, demandera de très nombreuses itérations, et donc un temps de calcul important, pour obtenir la convergence de l'algorithme, puisque la probabilité de tomber sur la valeur exacte sera très faible.
- utiliser une faible valeur de l'ordre du mètre, voire plus petite, permettra d'avoir des altitudes avec une très grande précision. Mais, tout comme précédemment, ce choix nécessitera également un nombre important d'itérations, pour assurer la convergence de l'algorithme.

Nous effectuons alors les calculs suivants :

- le calcul des angles α^{k+1} et β^{k+1} à partir de $H^{(k+1)}$, par les formules 4.22 et 4.23 ci-dessous.
- le calcul de l'intensité $I(\theta, \alpha^{k+1}, \beta^{k+1})$ par la formule 4.21,
- le calcul de la contribution en énergie $U^{(k+1)} = U_I^{(k+1)} + \nu U_v^{(k+1)}$.

A partir des deux énergies $U^{(k)}$ et $U^{(k+1)}$, nous avons le choix pour chaque pixel de l'image, de conserver la valeur de l'altitude $H^{(k)}$, ou de la remplacer par $H^{(k+1)}$. Cette décision est réalisée par recuit simulé [GEMA-84], [SIGE-93], faisant intervenir la différence d'énergie ΔU :

$$\Delta U = U^{(k+1)} - U^{(k)}$$

Suivant le signe et la valeur de cette différence d'énergie, plusieurs configurations sont possibles :

- si $\Delta U < 0$, alors on remplace la valeur $H^{(k)}$ par $H^{(k+1)}$,
- si $\Delta U > 0$, alors deux cas de configuration sont encore possibles :

On calcule : $\zeta = -\log(\eta)$, avec η variable aléatoire de loi uniforme, comprise entre 0 et 1,

- ▷ si $\zeta > \frac{\Delta U}{T^{(k+1)}}$, alors on remplace la valeur $H^{(k)}$ par $H^{(k+1)}$,
- ▷ sinon on conserve la valeur d'altitude $H^{(k)}$.

Ce processus fait intervenir la température $T^{(k)}$ que nous faisons décroître à chaque itération. La loi de $T^{(k)}$ qui garantit l'optimum global devrait être logarithmique, néanmoins nous suivons l'exemple de [GEMA-84] et choisissons une décroissance plus rapide de la forme :

$$T^{(k+1)} = 0.98 T^{(k)}$$

4.3.3 Calcul des angles α et β

Le calcul de l'énergie fait intervenir celui des angles α^k et β^k de chaque pixel de l'image, à chaque itération. Etablissons tout d'abord l'expression de l'angle en site α^k . Pour cela, il faut prendre en compte le fait que les cartes d'altitude restituées sont représentées en géométrie radar. La figure (Fig 4.6) illustre cette géométrie. Sur celle-ci, nous avons également indiqué divers paramètres utiles pour l'établissement de l'expression de cet angle.

Deux relations géométriques sont déduites de cette figure :

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{H_{(i,j)}^{(k)} - H_{(i,j-1)}^{(k)}}{R_d + \Delta R} \\ \tan \theta = \frac{H_{(i,j)}^{(k)} - H_{(i,j-1)}^{(k)}}{\Delta R} \end{cases}$$

En éliminant la longueur ΔR inconnue, on obtient l'expression de l'angle en site α^k :

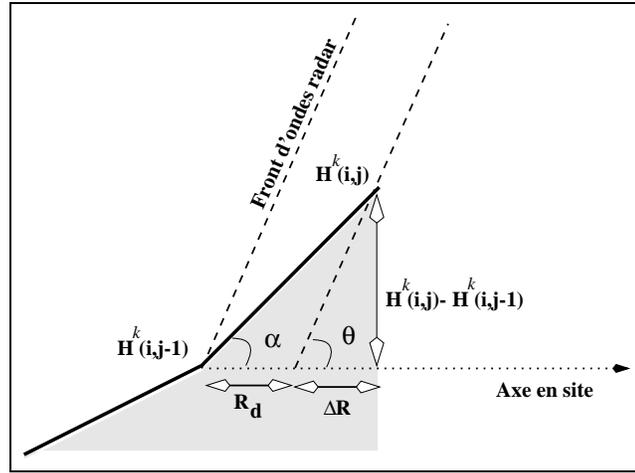


FIG. 4.6 – Représentation d'un MNT en géométrie radar et des divers paramètres pour le calcul de l'angle α en site.

$$\alpha_{(i,j)}^k = \arctan \left(\frac{(H_{(i,j)}^{(k)} - H_{(i,j-1)}^{(k)}) \tan \theta}{R_d \tan \theta + (H_{(i,j)}^{(k)} - H_{(i,j-1)}^{(k)})} \right) \quad (4.22)$$

L'expression de l'angle en azimut β s'obtient plus facilement :

$$\beta_{(i,j)}^k = \arctan \left(\frac{H_{(i,j)}^{(k)} - H_{(i-1,j)}^{(k)}}{R_a} \right) \quad (4.23)$$

Les expressions de ces deux angles tiennent compte des résolutions R_d et R_a respectives en site et en azimut d'un pixel de l'image radar.

4.3.4 Choix des paramètres

A partir de l'expression (Eq 4.20) de l'énergie, nous pouvons remarquer que deux paramètres ν et γ restent à déterminer. Le premier est une pondération. Sa valeur dépend de l'importance que l'on donne à l'énergie d'attache aux données par rapport à l'énergie contextuelle. Le deuxième, défini précédemment, est donc un simple seuil. Ce seuil est introduit pour tenir compte du bruit. Il introduit une saturation de la pénalisation lorsque la valeur restituée s'écarte des mesures. Au delà de la valeur γ entre $I(x)$ et $I(\theta, \alpha^k, \beta^k)$, tous les écarts seront pénalisés du même terme γ^2 , ce qui évitera de tirer le relief vers de fausses valeurs en cas de fort speckle. Le réglage de ces deux paramètres est réalisé de façon manuelle. Nous allons regarder les cas limites ($\nu = 0$ et $\nu \rightarrow \infty$), puis progressivement approcher les valeurs qui permettent d'avoir les propriétés décrites précédemment. Pour ce premier réglage, nous utilisons

comme initialisation de ce procédé, le relief obtenu par simple approximation d'angle azimutal nul, et représenté par l'image (Fig 4.2).

Nous explicitons ci-dessous quelques cas particuliers de valeurs de potentiel :

- Pour cette première restitution, posons $\nu = 0$, et pas de seuil γ dans l'énergie d'attaches aux données. La seule contrainte revient donc à vérifier en chaque pixel l'équation :

$$I(x) - I(\theta, \alpha^k, \beta^k) = 0 \quad (4.24)$$

Par les variations d'altitude en chaque pixel, on réalise une modification du couple d'angle (α^k, β^k) . Il est évident que de nombreux couples de valeur d'angles sont solutions à l'équation précédemment citée (ils correspondent à des facettes situées sur un cône d'axe θ). Il est donc clair que cette unique contrainte ne permet pas de converger vers un relief vérifiant les propriétés décrites au début de cette partie.

- Conservons $\nu = 0$, et utilisons un seuil dans l'énergie d'attache aux données. Nous avons indiqué précédemment l'effet de ce seuil. Nous pouvons effectivement constater que son utilisation évite d'accrocher les points de speckle se caractérisant par une trop forte ou au contraire une trop faible intensité. Cependant, comme dans le cas précédent, aucune amélioration n'est apportée par ce seuil. Les formes du relief, initialement noyées dans un bruit de ligne, tendent à disparaître progressivement au cours du recuit, laissant place à un à des modèles possibles et solutions de l'équation (Eq 4.24).
- Prenons le cas inverse où $\nu \rightarrow \infty$. Cette application revient à prendre uniquement en compte le terme contextuel dans le bilan énergétique. On cherche à minimiser une simple différence d'altitude entre le point considéré et chacun de ses huit plus proches voisins. Le minimum de l'énergie est en partie atteint pour des différences d'altitude nulles. Il est donc également évident ici que les structures du relief, initialement présentes (Fig 4.2), vont totalement disparaître. En effet, au cours des itérations, le relief apparaît de plus en plus flou, ces altitudes estimées de plus en plus homogènes entre elles. Le terrain résultant de cette application peut donc être modélisé par une surface uniformément plate.
- Par les résultats des cas limites décrits précédemment, il a été montré qu'un choix judicieux des paramètres s'avère nécessaire, afin d'assurer la convergence du processus vers un unique relief solution. Ceci consiste donc à prendre en compte conjointement, et de manière équilibrée, un terme d'attache aux données et un autre de voisinage dans le bilan énergétique. Dans cette dernière application, nous cherchons le jeu de paramètres qui assure d'une part l'élimination des discontinuités, et d'autre part la préservation des structures fines du

relief. Cette recherche est réalisée de manière progressive, utilisant des critères visuels quant à la validation du résultat, soit du jeu de paramètre. La figure (Fig 4.7) illustre le résultat pour le jeu de paramètre assurant le juste équilibre entre les termes énergétiques. On remarque que ce traitement a permis de réduire un certain nombre de discontinuités tout en préservant les structures fines liées au relief. Ce modèle obtenu vérifie bien mieux les propriétés d'un MNT (Fig 4.8) que le modèle initial (Fig 4.3 b), bien qu'il subsiste un défaut dans la carte d'altitude se traduisant par un léger étalement du lignage suivant l'axe azimutal.

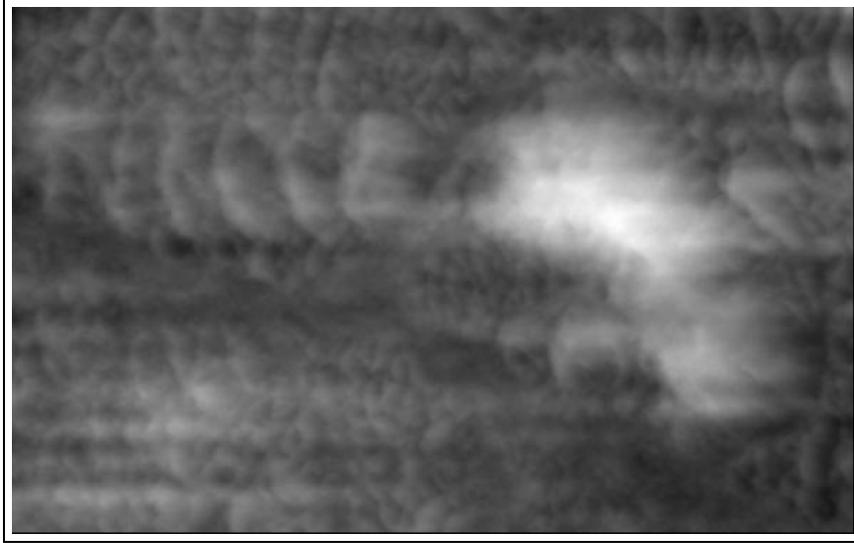


FIG. 4.7 – Relief de la montagne Marie-Hilaire obtenu par restauration markovienne avec le jeu de paramètres le plus adapté, et à partir de l'image radar (Fig 4.1) et de la restitution du relief initiale (Fig 4.2).

Pour remédier totalement aux défauts de lignage du relief encore observables (Fig 4.7), plusieurs méthodes sont envisageables. Une des méthodes que nous traiterons dans la partie suivante portera sur l'initialisation de la restauration markovienne. Nous mettrons alors en évidence son importance dans le processus de la restitution. Une autre méthode peut cependant être envisagée. Elle consiste à réitérer la restauration markovienne en l'initialisant par la carte d'altitude obtenue à la restitution précédente, jusqu'à convergence vers un unique relief solution. En ce qui concerne le relief de la montagne Marie-Hilaire traité comme exemple d'application ici, quatre restaurations markoviennes ont été nécessaires. La figure (Fig 4.9) illustre ce relief. On constate une réduction quasi-totale des défauts qui étaient initialement dus à l'intégration du speckle (Fig 4.2). Certaines déformations sont cependant toujours présentes, et caractérisées par un important étalement du lignage. Par ailleurs, ce procédé a un inconvénient majeur. En effet, il nécessite un important temps de calcul. Pour le traitement de données de 500×500 pixels, ce temps est d'environ 8 heures sur une SPARC Ultra-1 sous Solaris version 2.5.

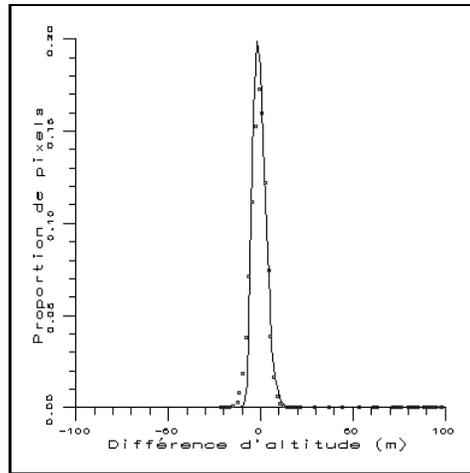


FIG. 4.8 – Histogrammes quasiment semblables des différences d'altitude inter-pixel déterminées suivant l'axe en site (-) et suivant l'axe en azimuth (...) à partir de la carte d'altitude (Fig 4.7). L'écart-type est de 6.28 mètres en site, et de 8.25 mètres en azimuth, montrant ainsi l'existence d'une légère discontinuité du relief suivant l'axe azimuthal.

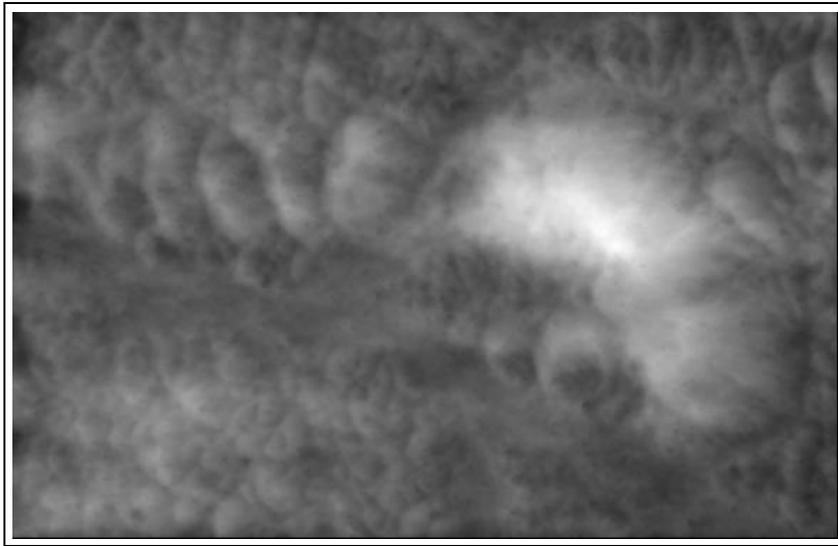


FIG. 4.9 – Relief de la montagne Marie-Hilaire obtenu suite à quatre restaurations markoviennes successives, avec le jeu de paramètres le plus adapté, et à partir de l'image radar (Fig 4.1).

4.3.5 Importance de l'initialisation

Nous venons de montrer précédemment les effets de la restauration markovienne. Il faut insister sur le fait que cette restauration prend en compte le relief résultant de la première étape de la restitution. Rappelons que cette étape consiste à négliger

les angles azimutaux des parcelles, puis à sommer les différences d'altitude ligne par ligne.

Or, en général, un algorithme de recuit simulé ne dépend pas de son initialisation. Cependant, nous allons montrer ici que le processus de restitution employé est une méthode plutôt locale, et, du fait de son caractère local, l'initialisation de la restauration s'avère importante. Pour cette démonstration, réalisons la restauration markovienne à partir d'un relief dont les altitudes sont établies aléatoirement, mais en conservant néanmoins le jeu de paramètres établi précédemment. Le fait de ne pas utiliser de carte d'altitude initiale revient à faire abstraction de la première étape de la restitution, et donc de ne pas employer la méthode d'intégration ligne à ligne. On constate par le relief résultant de cette considération et illustré par la figure (Fig 4.10) que la restauration donne une apparence de données radar filtrées et non d'une carte d'altitude. La restauration a visiblement échoué. Tout comme précédemment, on pourrait réitérer le processus markovien. Mais, on ne constate aucune amélioration, toujours une impression de carte de différences d'altitude et non de carte d'altitude. Cette impression se confirme également par la position des maxima et minima de cette restitution. En effet, les maxima se situent au centre des zones de déclivité supérieure à 0, et de même les minima se situent au centre des zones face opposée au radar. Donc réitérer indéfiniment le processus markovien n'apporterait aucune modification quant à l'aspect et au contenu du résultat.

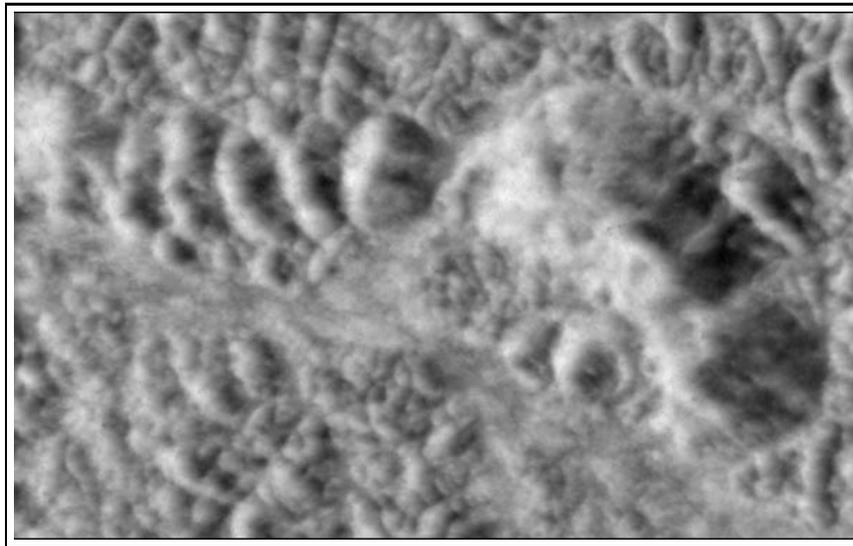


FIG. 4.10 – Relief de la montagne Marie-Hilaire obtenu par restauration markovienne sans carte d'altitude initiale précise, et à partir de l'image radar (Fig 4.1).

Que conclure de cette expérience? L'échec de la convergence du recuit simulé vers la solution attendue ne condamne pas notre approche. Il ne fait que souligner que notre recuit ne suit pas la loi infiniment lente qui est exigée par la théorie. Une telle remarque a déjà été faite dans [MANG-95] et dans [TUPI-97]. Si l'optimisation met

en jeu des variables fortement couplées, le système reste fréquemment prisonnier de configurations locales “auto-bloquantes”. C’est apparemment ce qui se produit dans notre cas où des facettes, mal orientées initialement, ne peuvent retrouver l’orientation convenable. Pour éviter ces configurations, il sera nécessaire de faire remonter l’énergie.

Ainsi nous mettons en évidence l’importance d’avoir une très bonne solution initiale. Considérons le relief représenté par l’image (Fig 4.11). Ce relief dont les lignes apparaissent filtrées est le résultat d’une méthode d’intégration différente de celle jusqu’à présent utilisée, et qui fera l’objet d’une description au chapitre 7. Partant de cette initialisation, le relief résultant (Fig 4.12) de la restauration markovienne semble bien plus proche de la réalité. Aucun étalement du lignage n’est constaté. Les discontinuités initiales ont totalement disparues, et les structures fines du relief ont été préservées lors de ce procédé. Ce relief vérifie également les propriétés d’un MNT décrites au début de cette partie, en exemple les courbes de niveau extraites tous les 10 mètres (Fig 4.13) ainsi qu’un rendu 3D (Fig 4.14). De plus, sans évaluation particulière, la gamme d’altitude établie par cette méthode semble correcte, s’étalant entre 0 mètre et 365 mètres pour le maxima. Cette évaluation sera plus largement développée au chapitre 6.

4.4 Une meilleure initialisation

4.4.1 Principe

Dans cette nouvelle étape d’initialisation, nous conserverons l’objectif de résoudre l’équation simplifiée 4.10, et de l’intégrer le long de lignes, mais afin d’éviter d’être tributaire du speckle sur la droite d’intégration comme au paragraphe 4.2, nous proposons d’utiliser plusieurs droites pour aboutir au même point M (Fig 4.15). Sur chaque droite, un raisonnement identique à celui appliqué en 4.2 nous permet d’évaluer l’altitude $H(M)$ par intégration. Après avoir utilisé suffisamment de droites (donc autant de trajets indépendants), nous pouvons prendre la décision d’attribuer à M une valeur d’altitude fonction de l’ensemble des résultats. Parmi toutes les estimations possibles de $H(M)$, en l’absence de statistiques précises sur le bruit, nous choisissons la médiane qui est robuste au bruit non gaussien (il est probable que l’erreur d’estimation de H sur chaque droite n’est pas gaussienne).

Comment choisir les droites d’intégration? Nous avons intérêt à ce qu’elles soient nombreuses pour améliorer l’estimation, mais pas trop pour ne pas pénaliser le temps de calcul et, nous le verrons, la place en mémoire. Par ailleurs, si nous souhaitons que l’équation 4.10 reste valable, il convient que l’angle maximal fait avec l’axe des distances reste faible. Enfin, si l’on souhaite que les chemins d’intégration soient indépendants, et compte tenu de la discrétisation de l’espace, il est inutile de prendre un incrément angulaire très faible. Ceci nous a amené par tâtonnements à choisir entre 80 et 160 droites séparées de 0.5° ou de 1° , dans des angles de $\pm 30^\circ$ autour de la direction des distances. On voit sur la figure (Fig 4.16) quelques reconstructions avec des paramètres divers.

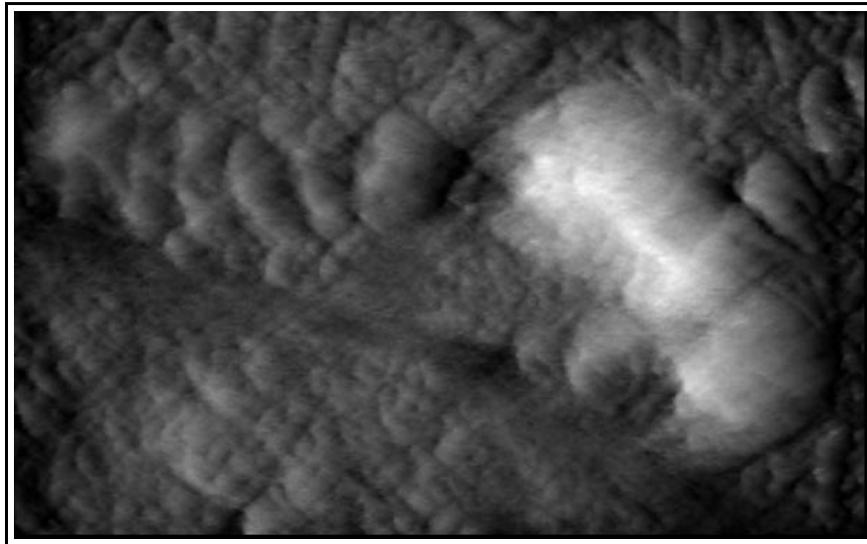


FIG. 4.11 – Carte d'altitude filtrée de la montagne Marie-Hilaire, initialisant la restauration markovienne.

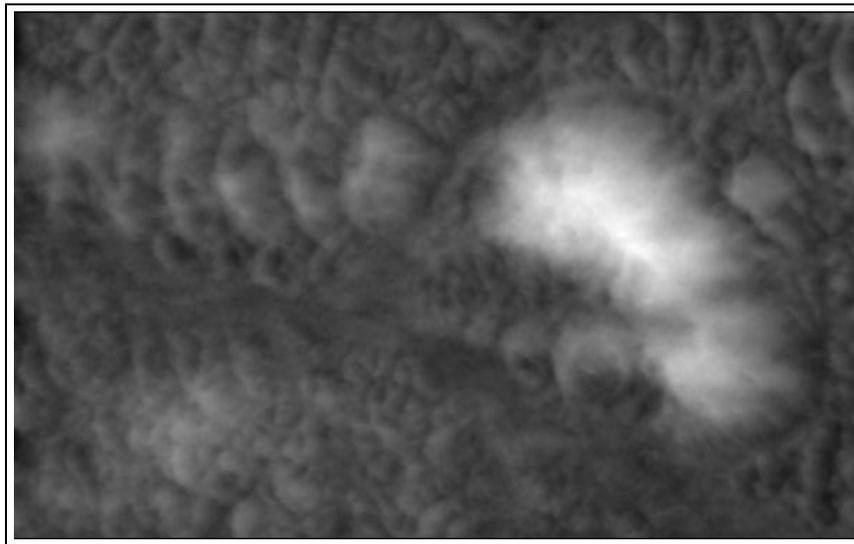


FIG. 4.12 – Résultat de la restauration, initialisée par le relief (Fig 4.11.)

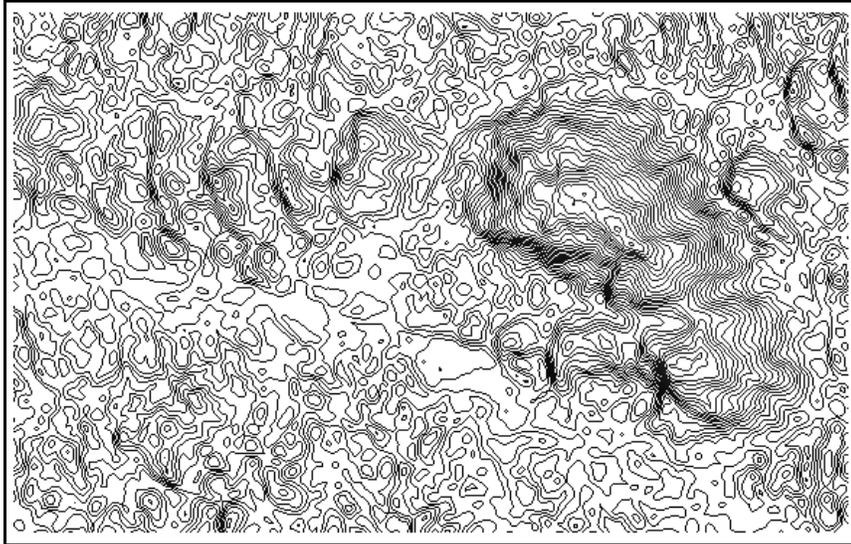


FIG. 4.13 – Courbes de niveau extraites de la carte d'altitude (Fig 4.12) tous les 10 mètres.

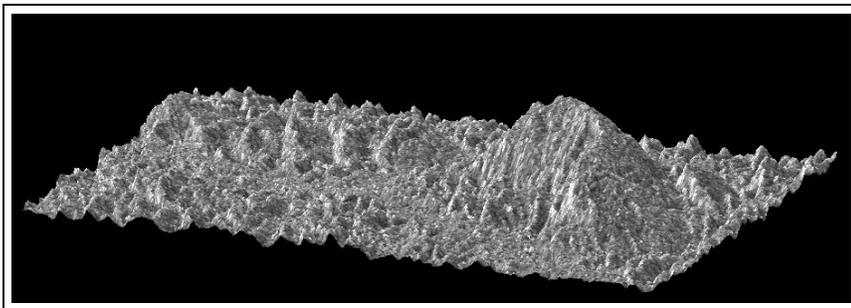


FIG. 4.14 – Rendu 3D de la montagne Marie-Hilaire restitué, habillé de l'image radar (Fig 4.1), relief exagéré.

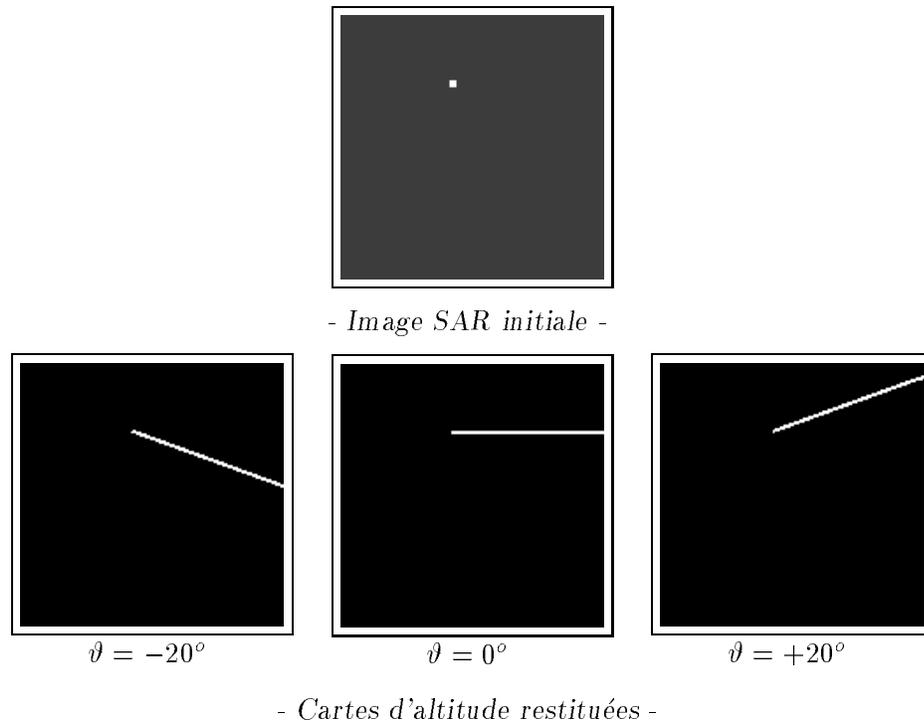


FIG. 4.15 – Exemple du procédé de reconstruction à partir d'une image SAR simple, et pour diverses directions ϑ . L'intérêt de processus est qu'il permet de constituer un ensemble de cartes d'altitude, différentes les unes des autres.

4.4.2 Mise en œuvre

La nouvelle initialisation pourrait apparaître très lourde, si pour chaque pixel, on devait développer indépendamment les chemins qui y aboutissent. En fait, nous procédons autrement. A chaque direction ϑ correspond par un calcul identique à celui mené en 4.2, une carte d'altitude complète. Ces cartes sont établies indépendamment et stockées, puis la valeur $H(M)$ en chaque pixel est calculée en prenant la médiane des valeurs $h^\vartheta(M)$ lues dans chaque carte. Le temps de calcul croît de façon linéaire en fonction du nombre de directions (ceci est supportable car chaque calcul est relativement bref). Mais la mémoire croît également de la même façon, ce qui devient inacceptable pour une grande image. Il y a là une limite à notre méthode qui conduit -soit à diminuer le nombre d'angles, -soit à traiter les grandes images par morceaux, ou à diminuer leur résolution par une approche pyramidale.

4.5 Exemple d'application

Le procédé de restitution par radarclinométrie, mis au point ici, a été testé sur de nombreuses images radar, acquises par des systèmes SAR très divers (les détails de ces systèmes sont rappelés au chapitre 2). Il faut insister sur le fait que le jeu de

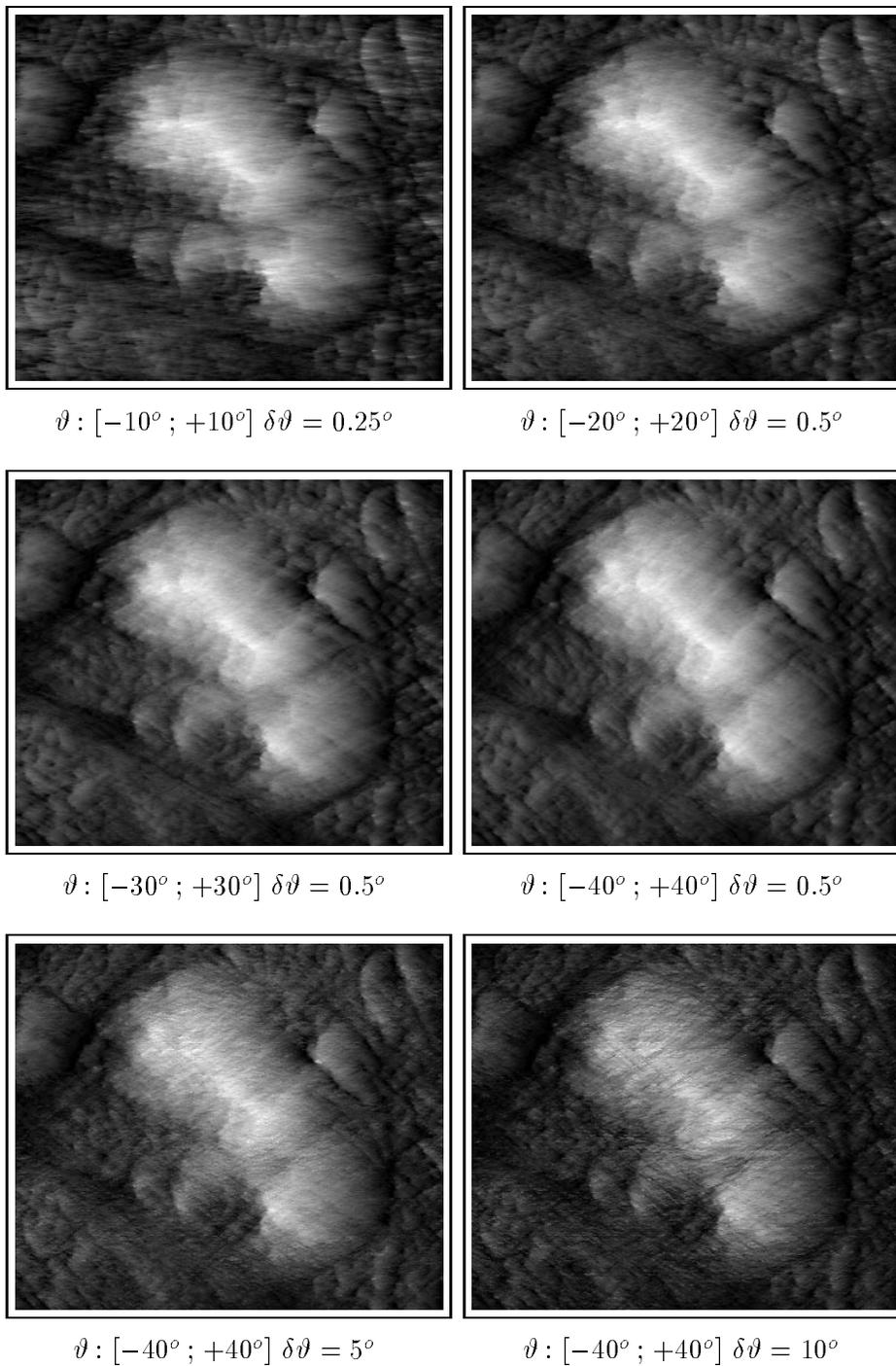


FIG. 4.16 – Cartes d'altitudes de la montagne Marie-Hilaire, réalisées en considérant en chaque pixel la médiane des altitudes obtenues par des reconstructions successives et de directions différentes (indication des limites de l'angle ϑ par rapport à l'axe en site et du pas $\delta\vartheta$ considérés, pour chaque résultat). Les 4 premières cartes montrent l'intérêt de considérer un angle ϑ suffisamment important. Les 2 dernières mettent en évidence les effets de reconstruction dû à un pas $\delta\vartheta$ trop grand.

paramètres établi précédemment est valable quelle que soit l'origine de l'image radar. Ces résultats seront surtout présentés au chapitre 6, mais nous donnons ici, pour conclure ce chapitre, un autre exemple de restitution du relief par radarclinométrie.

Les données SAR utilisées pour cet exemple (Fig 4.17) se situent en Guyane (*montagnes Plomb*), zone de 26 km en site et de 15.5 km en azimut. Rappelons que l'utilisation des images radar de la Guyane assure pleinement de vérifier les conditions pour l'application de la radarclinométrie : homogénéité du couvert végétal (forêt tropicale), relief peu marqué (déclivité inférieure à l'angle d'incidence du radar).

A partir de ces données, détaillons les résultats des diverses étapes qui ont été développées au cours de ce chapitre :

- la première étape a consisté à restituer le relief en négligeant les angles azimutaux des parcelles du terrain. Le résultat de cette étape est représenté par la carte d'altitude (Fig 4.18). Du fait de la présence de speckle (bruit ponctuel) dans les images radar, et de l'utilisation d'une sommation en site pour l'obtention de données altimétriques, un fort lignage entache cette carte résultante.
- la deuxième étape a porté sur un filtrage lors de la sommation en site des différences d'altitude, permettant ainsi l'obtention d'une carte d'altitude bien moins discontinue (Fig 4.19).
- la troisième étape est une restauration markovienne sous contrainte de régularité des parcelles du terrain. Cette étape permet l'élimination totale des discontinuités. Les images (Fig 4.20) illustrent le résultat obtenu.

Bien évidemment, ces résultats demandent à être vérifiés quantitativement de manière à revenir sur certaines hypothèses posées et non encore justifiées.

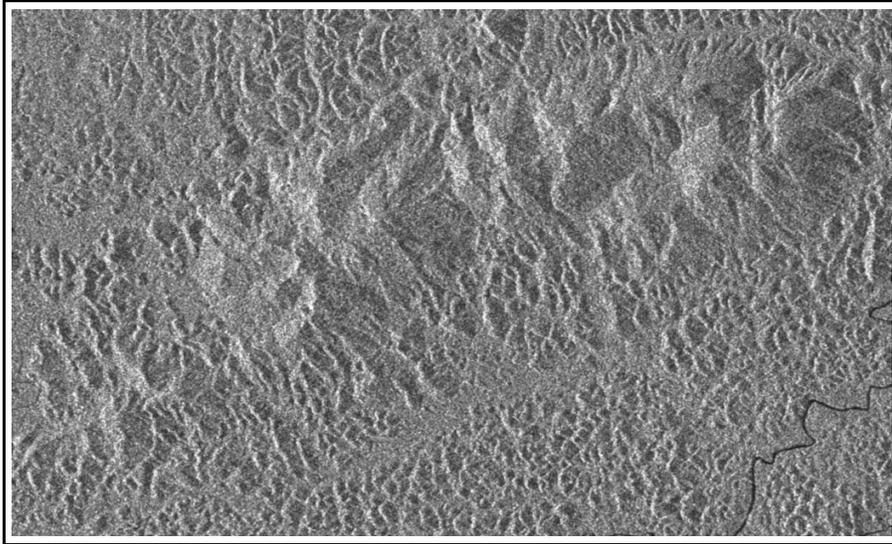


FIG. 4.17 – Image radar des montagnes Plomb en Guyane, acquise par le système ERS-1 (© ESA).

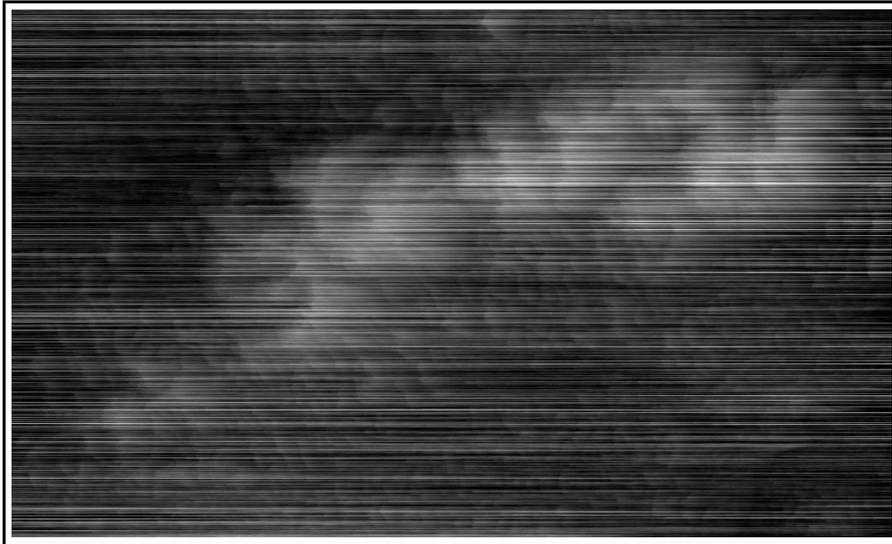


FIG. 4.18 – Carte d'altitude obtenue à partir de la radiométrie des données radar (Fig 4.17), et par simple approximation par des angles azimutaux nuls.

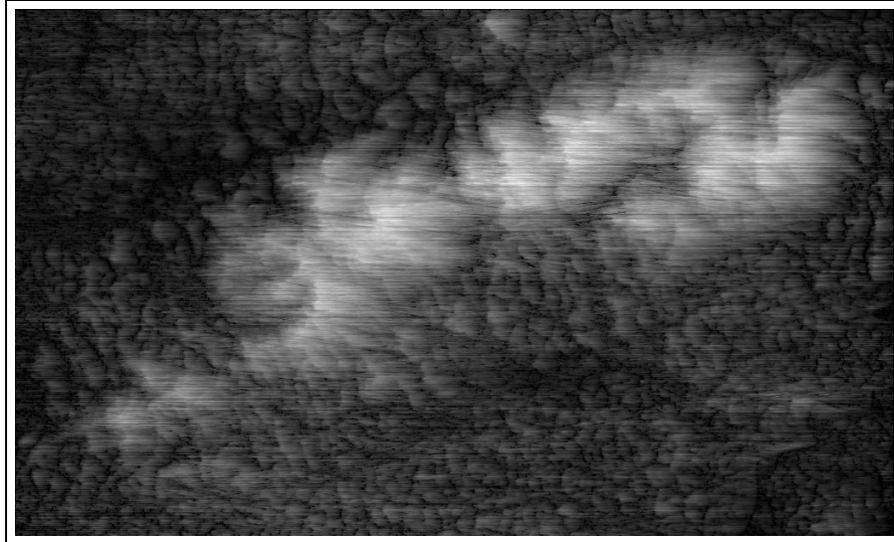


FIG. 4.19 – *Résultat du filtrage de la carte d'altitude (Fig 4.18).*

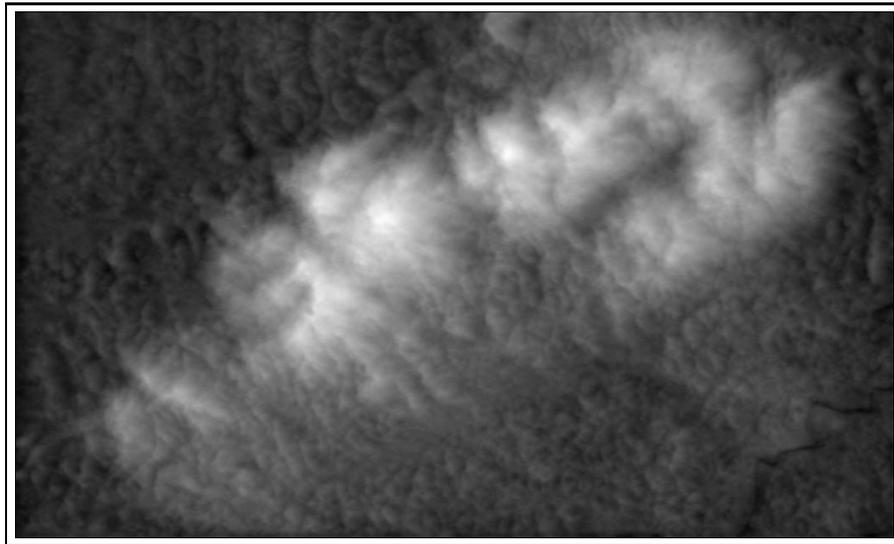


FIG. 4.20 – *Carte d'altitude résultant de la restauration markovienne.*

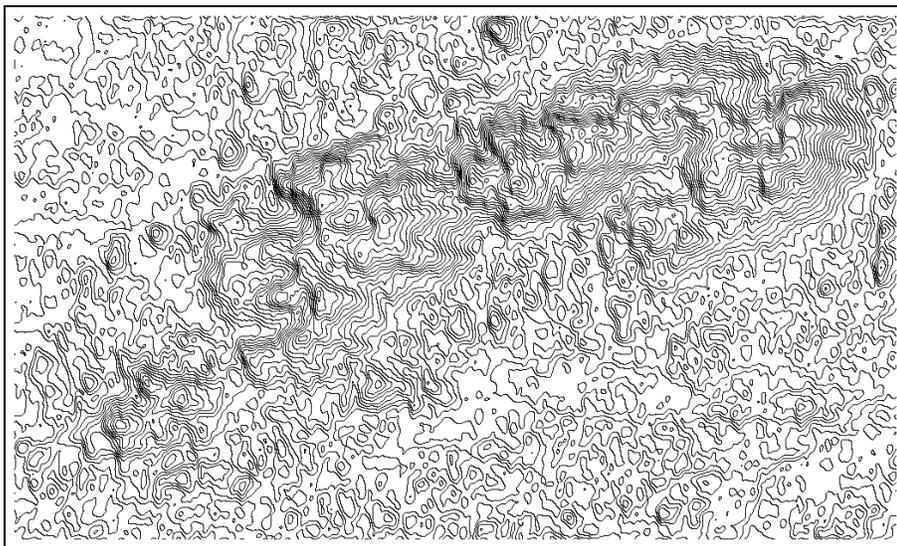


FIG. 4.21 – Courbes de niveau extraites de la carte d'altitude (Fig 4.20) tous les 20 mètres.

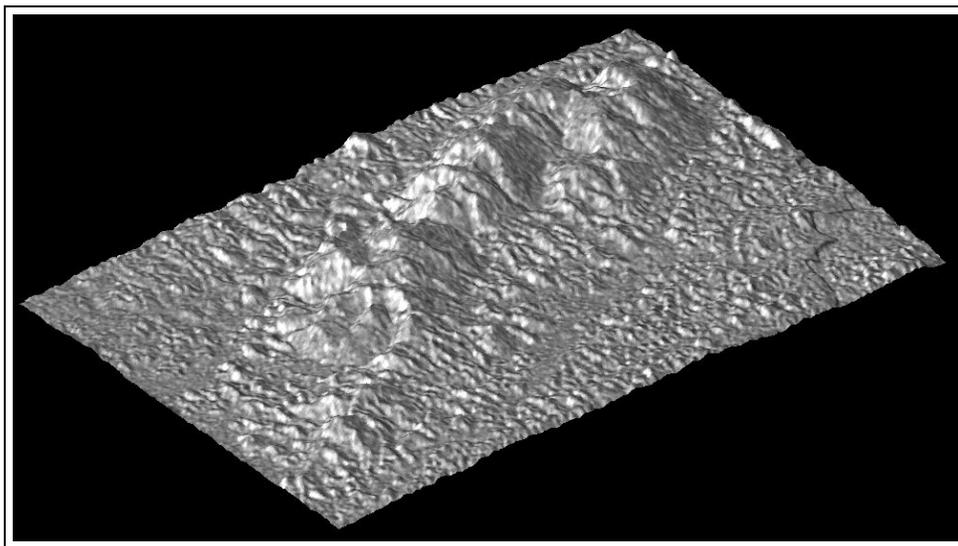


FIG. 4.22 – Rendu 3D des Montagnes Plomb restitué, habillé de l'image radar (relief exagéré).

Chapitre 5

Quantification des Reliefs Obtenus à partir d'Images Radar Simulées

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer le fonctionnement de notre algorithme de restitution du relief sur des images de simulation, ce qui permet d'avoir un contrôle précis des erreurs [POLI-94a] [POLI-94b]. La simulation [ARMA-94] de telles images est un point relativement délicat ; les méthodes pour sa réalisation sont nombreuses. Nous détaillerons donc l'algorithme de simulation développé, qui prendra en compte toutes les hypothèses qu'il a été nécessaire de poser lors de la mise en œuvre de la radarclinométrie, notamment l'hypothèse lambertienne. Cet algorithme permettra l'obtention de deux types d'images radar (une première image sans speckle, et une deuxième avec speckle). Ces deux types d'image seront ensuite testés par notre procédé de restitution, et chaque relief restitué sera évalué le plus précisément possible, afin de mettre en évidence les qualités, mais également les défauts, et dans ce cas leurs origines.

5.1 Principe et méthode d'une simulation

5.1.1 Simulation de relief

Nous disposons d'un certain nombre de modèles numériques de terrain, établis par des techniques classiques et différentes de celle que nous proposons (levé de terrain, reconstruction par stéréovision à partir d'un couple d'images aériennes ou satellitaires, acquises dans le domaine des fréquences optiques). Ils se présentent sous la forme de fichiers de valeurs d'altitude, dont le format est généralement exprimé en nombres entiers, et la précision de l'ordre du mètre. Parmi ces MNT disponibles, un seul présente des structures suffisamment fines et précises, celui de la montagne Sainte-Victoire, située dans la région d'Aix en Provence. Or, l'utilisation de ce MNT demande, d'une part, de choisir convenablement l'angle d'incidence (chapitre 3) afin de ne pas rencontrer les problèmes de recouvrement ou d'ombre dans l'image radar.

Cet angle doit être supérieur à 55° ; il ne recouvre pas la gamme d'incidence utilisée par des systèmes radar réels. D'autre part, la précision numérique utilisée pour ce MNT semble insuffisante, provoquant l'apparition de défauts caractéristiques dans les données SAR simulées.

Pour ces deux raisons, nous utiliserons deux reliefs simulés, exprimé en virgule flottante, de forme relativement douce. Ces reliefs sont établis par des fonctions mathématiques simples, telles qu'une gaussienne bidimensionnelle (relief A, Fig 5.1) :

$$z_1(x, y) = z_{max} \times \exp - \left[\frac{(x - x_o)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - y_o)^2}{\sigma_y^2} \right] \quad (5.1)$$

Ses altitudes sont comprises entre 0 et 100 mètres ; sa résolution est de $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$. Un simple calcul informe sur la gamme des pentes suivant la direction en site et en azimuth. Elle est identique suivant ces deux directions et inférieure à 5.5° ce qui respecte une des conditions d'application de la radarclinométrie. L'image (Fig 5.1 b) représente ses courbes de niveau tous les 10 mètres.

Le relief B présente des formes un peu plus complexe. Il est établi par une gaussienne bidimensionnelle déformée par un pli circulaire (Fig 5.2 a) :

$$z_2(x, y) = z_1(x, y) \left(1 + \frac{1}{z'_{max}} \times \exp - \left[\frac{(\sqrt{(x - x'_o)^2 + (y - y'_o)^2} - \frac{r_1 + r_2}{2})^2}{(\frac{r_1 - r_2}{2})^2} \right] \right) \quad (5.2)$$

Ses altitudes sont également comprises entre 0 et 100 mètres ; sa résolution est de $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$. La gamme des pentes de ce relief est respectivement inférieure à 10° suivant la direction en site, et de 7° suivant la direction azimuthal, et de ce fait vérifie les conditions nécessaires pour appliquer la radarclinométrie. Par comparaison avec l'image (Fig 5.1 a), ce relief présente deux pics d'altitude respectives 82 mètres et 100 mètres. L'image (Fig 5.2 b) représente ses courbes de niveaux tous les 10 mètres, et l'image (Fig 5.2 c) est une représentation en 3D de ce MNT.

5.1.2 Simulation d'une image radar sans speckle

Nombreuses sont les méthodes existantes pour la simulation d'image radar [LIND-93], [FRAN-94], [MENC-96], [GOU-96a]. A partir des MNT dont nous disposons, la méthode retenue pour simuler l'image radar est une technique classique de lancé de rayons. Cette technique se décompose en deux étapes :

- la première étape consiste à compter le nombre d'intersections sur le MNT pour chaque porte radar. Pour cela, on considère que les fronts d'onde sont plans. On calcule alors pour chaque front d'onde les points d'intersection sur le modèle numérique de terrain (Fig 5.3). On peut remarquer que si le nombre de points d'intersection est supérieur à un, alors il existe des zones de recouvrement dans l'image radar.

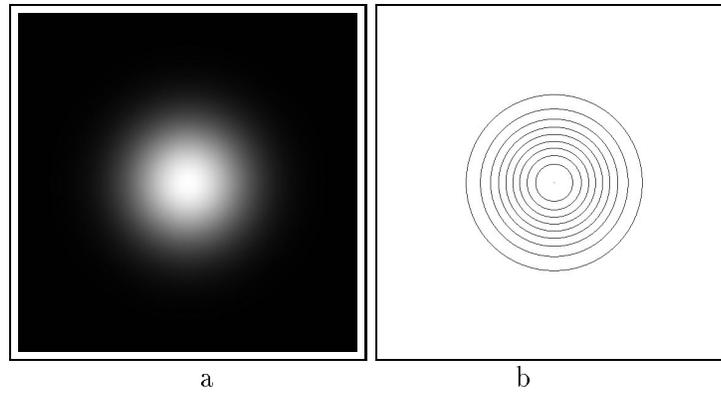


FIG. 5.1 – Image A - En a : simulation d'un relief par une surface gaussienne bidimensionnelle, représenté en géométrie plane, en b : ses courbes de niveau tous les 10 mètres.

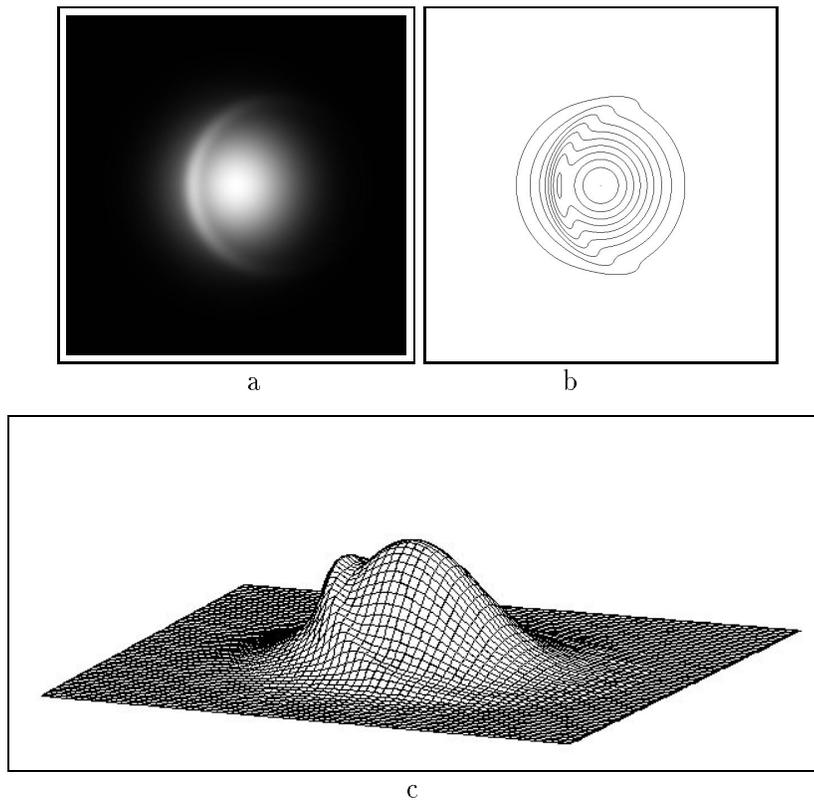


FIG. 5.2 – Image B - En a : simulation d'un relief par une surface gaussienne bidimensionnelle déformée par un pli circulaire en géométrie plane, en b : ses courbes de niveau tous les 10 mètres, et en c : représentation en 3D de ce MNT.

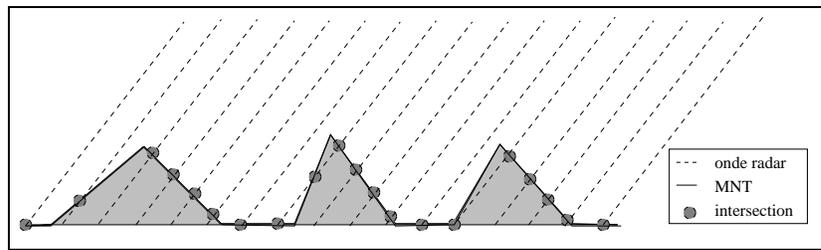


FIG. 5.3 – Détermination des points d'intersection sur le MNT suivant l'axe en site.

- la seconde étape consiste à déterminer l'intensité rétrodiffusée vers le radar pour chaque cellule de résolution radar. Dans le cas de surface lambertienne, son expression est donnée par l'équation 4.6, qui tient compte des deux angles du terrain (α, β). Ces deux angles sont estimés pour chaque portion de terrain interceptée entre deux plans de distance consécutifs. Le résultat de cette étape est donc une image radar sans bruit.

On réalise cette simulation sur les deux reliefs représentés (Fig 5.1 a) et (Fig 5.2 a) en considérant un angle d'incidence θ de 20° . Le résultat de ces deux simulations est représenté par l'image (Fig 5.4 a) et par l'image (Fig 5.4 b).

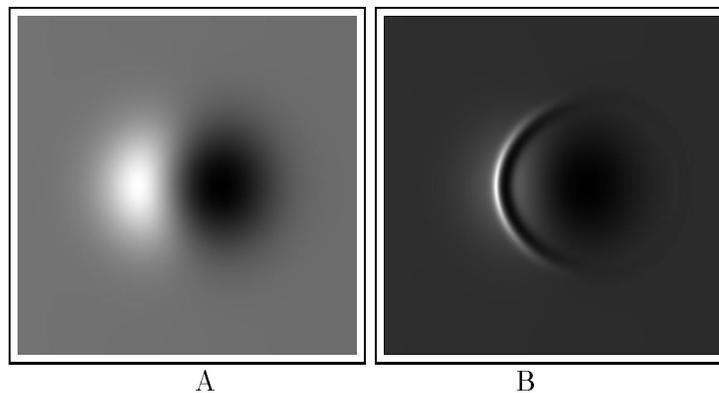


FIG. 5.4 – Image A : simulation de l'image radar sans speckle du MNT représenté par l'image (Fig 5.1 a). Image B : simulation de l'image radar sans speckle du MNT représenté par l'image (Fig 5.2 a).

5.1.3 Simulation d'une image radar avec speckle

La simulation d'image radar avec speckle [ARMA-92] nécessite une étape supplémentaire par rapport à la simulation décrite précédemment. Avant de présenter la méthode employée pour cette étape, revenons brièvement sur la définition du speckle. L'origine de ce bruit est en grande partie due à la composition du couvert du terrain, et plus particulièrement sa grande variabilité au niveau de ses constituants, par leurs natures (feuilles, branches, etc), leurs formes, leurs orientations, et

leurs répartitions. Les mesures expérimentales [ULAB-87], [KASI-94] le confirment, tout comme les mesures établies par l'utilisation de modèles précis de végétation [YUEH-92], [STUO-96], modèles difficiles à mettre en œuvre dans notre processus de simulation.

Pour la simulation d'une image radar avec speckle, il est donc nécessaire de prendre en compte la grande variabilité interne du couvert d'un terrain. Pour cela, on considère donc que chaque portion de terrain du MNT interceptée entre deux plans de distance consécutifs représente un nombre n de réflecteurs dépendant de la longueur d'onde émise par le faisceau radar, et de la déclivité de cette portion de terrain. On suppose alors que pour une zone de terrain, ces réflecteurs diffusent avec une phase propre à chacun, une intensité \mathcal{I}_l vérifiant l'expression :

$$\mathcal{I}_l = \frac{I_r(\alpha, \beta)}{n(\lambda, \alpha, \beta)} \exp(j\varphi_l) \quad (5.3)$$

avec $n(\lambda, \alpha, \beta)$ le nombre de réflecteurs, $I_r(\alpha, \beta)$ l'intensité calculée à partir de l'équation 4.6, et φ_l la phase du réflecteur l prise aléatoirement entre 0 et 2π de loi uniforme. Par sommation de la contribution en intensité de tous les réflecteurs, on obtient l'intensité rétrodiffusée et bruitée I'_r de la zone de terrain considérée :

$$I'_r(\alpha, \beta) = \left| \sum_{l=1}^{n(\lambda, \alpha, \beta)} \mathcal{I}_l \right| \quad (5.4)$$

Cette technique de simulation est appliquée sur les deux reliefs simulés (Fig 5.1 a) et (Fig 5.2 a) en considérant un angle d'incidence θ de 20° . Le résultat est représenté par l'image A et par l'image B (Fig 5.5).

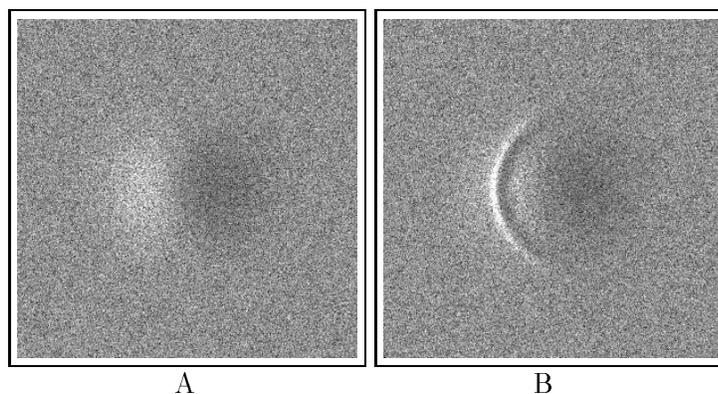


FIG. 5.5 – Image A : simulation de l'image radar avec speckle du MNT représenté par l'image (Fig 5.1 a). Image B : simulation de l'image radar avec speckle du MNT représenté par l'image (Fig 5.2 a).

5.1.4 Définition des diverses géométries

Deux géométries sont à définir :

- une géométrie plane : géométrie correspondant à un échantillonnage du MNT conforme à l'ellipsoïde,
- une géométrie radar : géométrie du terrain telle qu'elle est fournie par le radar. Les mesures sont déplacées vers le nadir de la même façon que le fait un radar.

Il est possible de passer d'une géométrie à l'autre en simulant ce que voit le radar. Dans le cas du passage de la géométrie plane à la géométrie radar, on déplace les pixels suivant leur altitude de :

$$dx_{radar} = -\frac{dh}{\tan \theta}. \quad (5.5)$$

Réciproquement, dans le cas du passage de la géométrie radar à la géométrie plane, on déplace les pixels suivant leur altitude de :

$$dx_{plan} = \frac{dh}{\tan \theta}. \quad (5.6)$$

5.2 Reconstruction par simple intégration selon §4.2

A partir des simulations, on réalise une restitution du relief conformément au schéma présenté précédemment (§4.2), en négligeant systématiquement l'angle β des parcelles, et donc de ce fait, on utilise la formule simplifiée de l'intensité, ne tenant compte que de l'angle en site α :

$$I_r(\alpha, 0) = K_s \sigma_o R_d R_a \frac{\sin \theta \cos^2(\theta - \alpha)}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (5.7)$$

Et, par le procédé d'intégration décrit §4.2.3, on détermine l'altitude en chaque pixel.

5.2.1 Reconstruction à partir d'images radar simulées sans speckle

Image radar A

On procède à la reconstruction du relief à partir de l'image A (Fig 5.4). Le résultat de cette restitution est représenté par l'image (Fig 5.6 a), c'est une carte d'altitude en géométrie radar. Les altitudes sont strictement comprises entre 0 et 101 mètres. L'image (Fig 5.6 b) représente les courbes de niveau extraites tous les 10 mètres de la figure (Fig 5.6 a).

Cette première carte d'altitude montre dans sa globalité une bonne reconstruction du relief, et en particulier l'absence de discontinuités azimutales (lignage) qui entachent la reconstruction des images réelles. Pour pouvoir comparer ce résultat aux

données initiales (Fig 5.1), deux projections peuvent être envisagées selon le procédé décrit au §5.1.4. L'une de ces projections correspond au passage des données initiales en géométrie radar, l'autre consiste au contraire au passage du modèle restitué en géométrie plane. Or, ces deux projections n'ont pas la même incidence sur l'évaluation. La première permettra de rendre compte uniquement des erreurs sur les altitudes restituées, contrairement à la deuxième qui informe des erreurs sur le couple altitude-position. De ce fait, il est préférable de procéder à la projection des altitudes du modèle initial en géométrie radar.

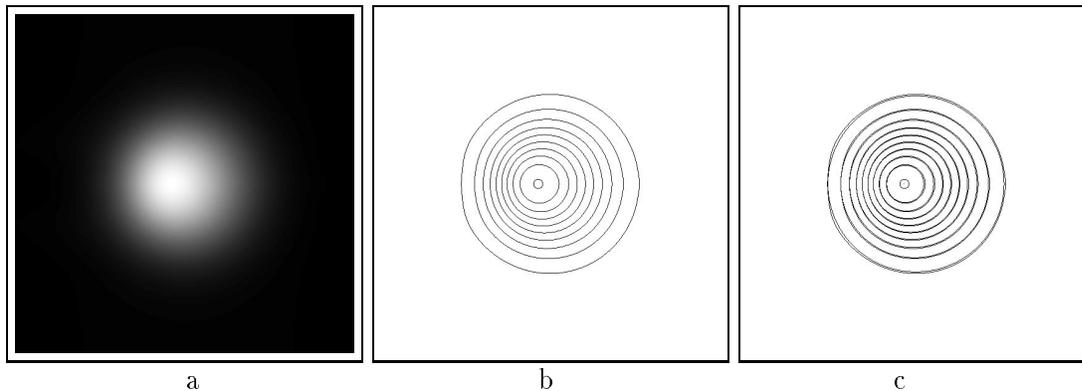


FIG. 5.6 – En a : résultat en géométrie radar de la restitution du relief à partir de l'image A , en négligeant l'angle β , en b : courbes de niveau tous les 10 mètres du modèle obtenu, et en c : superposition des courbes de niveau du modèle initial et du modèle restitué.

A partir de la superposition des courbes de niveau (Fig 5.6 c) extraites du modèle initial projeté en géométrie radar, et du modèle restitué (Fig 5.6 b), on met ainsi en évidence les fines déformations géométriques de reconstruction dues à l'approximation faite sur l'angle azimutal β . Ces déformations localisées en des zones très restreintes du relief ne dépassent pas deux pixels ; comme attendu, le maximum de ces déformations se situe au niveau où l'angle β est le plus important.

Du point de vue numérique, il est possible de quantifier plus précisément l'étendue des erreurs de restitution constatées précédemment. Pour cela, on calcule en chaque site la différence altimétrique entre le modèle initial projeté en géométrie radar et le modèle obtenu par notre procédé de restitution. L'histogramme de ces différences présente un pic très étroit similaire en apparence à un pic de Dirac, nous informant ainsi d'une correspondance quasi-parfaite entre les deux modèles. Les mesures statistiques établies à partir de cet histogramme le confirment également. En effet, l'écart altimétrique reste relativement faible, son maximum ne dépassant pas 2 mètres. Sa moyenne est de -0.35 mètres, indiquant une très légère surestimation des altitudes par notre procédé. La ressemblance entre les modèles est également mise en évidence par l'écart-type qui est de 0.5 mètres, donc quasiment négligeable vis à vis de la gamme d'altitude du modèle utilisé.

Par ce premier résultat, on remarque donc que l'approximation de l'angle β nul ne provoque que de très légères différences numériques ; celles-ci ne sont cependant pas entièrement négligeables puisque cette approximation associée à l'étape d'intégration a provoqué de faibles déformations dans la géométrie du relief (Fig 5.6 c).

Image radar B

Comme précédemment, on réalise une reconstruction à partir de l'image B (Fig 5.4), en négligeant systématiquement l'angle azimutal des parcelles. La carte d'altitude ainsi restituée, en géométrie radar, est représentée par l'image (Fig 5.7 a) ; l'image (Fig 5.7 b) correspond à ses courbes de niveau extraites tous les 10 mètres. Ses altitudes sont strictement comprises entre 0 et 101 mètres.

Cette deuxième restitution montre encore ici l'absence de discontinuités azimutales (lignage) qui entachent les reliefs obtenus à partir de réelles données radar. A première vue, la forme du modèle restitué semble conforme à celle du modèle initial. La superposition des courbes de niveau du modèle restitué et du modèle initial projeté en géométrie radar, illustrée par la figure (Fig 5.7 c), met cependant en évidence la présence de fines déformations géométriques. Comme la restitution précédente, ces déformations sont maximales au niveau où les angles azimutaux des parcelles sont les plus importants.

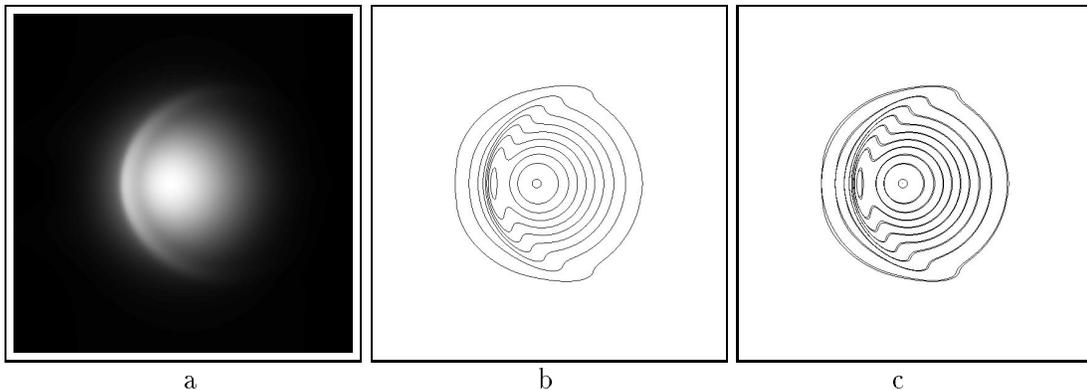


FIG. 5.7 – *En a : résultat en géométrie radar de la restitution du relief à partir de l'image B, en négligeant l'angle β , en b : courbes de niveau tous les 10 mètres, et en c : superposition des courbes de niveau du modèle initial et du modèle restitué.*

Numériquement, le calcul de l'histogramme des différences d'altitude entre les deux modèles, et des mesures statistiques qui lui sont associées va permettre d'évaluer plus précisément l'étendue de ces distorsions. La forme de l'histogramme est encore ici un pic extrêmement étroit. Le maxima de l'écart altimétrique ne dépasse pas 2 mètres. Sa moyenne est de -0.37 mètres, indiquant une très légère surestimation des altitudes restituées. Son écart-type, de l'ordre de 0.5 mètres, reste faible comparé à la gamme d'altitude du modèle. Ces mesures indiquent donc que le fait de reconstruire le relief en négligeant systématiquement les déclivités azimutales a, en

fait, très peu d'incidence sur les valeurs des angles en site après inversion de l'équation de base, et donc sur les valeurs d'altitudes après intégration ligne à ligne. Elles mettent également en évidence que le choix de négliger ou non ces fines distorsions de reconstruction dépend d'une part, de l'échelle de représentation de l'altitude, et d'autre part de l'utilisation qui sera faite de ces modèles ainsi restitués.

5.2.2 Reconstruction à partir d'images radar simulées avec speckle

Image radar A

Dans cette partie, on réalise la reconstruction du relief à partir de l'image radar A avec speckle (Fig 5.5). La carte d'altitude en géométrie radar (Fig 5.8 a) résultant de cette simple reconstruction, en considérant négligeable l'angle azimutal des parcelles, présente d'importantes discontinuités suivant l'axe azimutal, qui se traduit par un fort lignage. Le relief ainsi restitué présente des altitudes strictement comprises entre 0 et 172 mètres, valeurs qui semblent bien loin de la réalité puisque les altitudes réelles du relief initial sont strictement comprises entre 0 et 100 mètres.

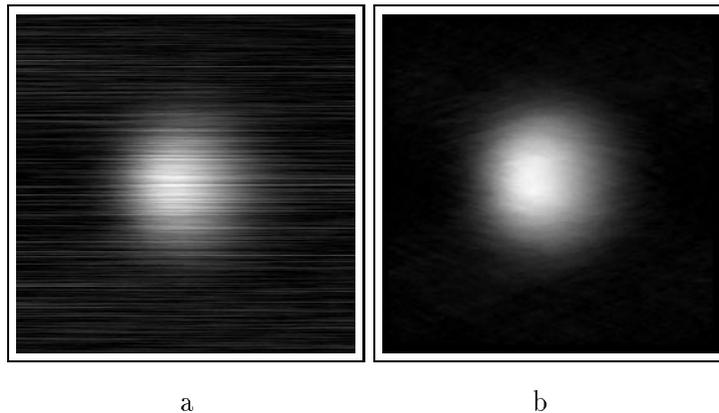


FIG. 5.8 – En a : résultat en géométrie radar de la restitution du relief à partir de l'image A (Fig 5.5), en considérant l'angle β négligeable, et en b : relief résultant en géométrie radar par une reconstruction décrite en 4.4 assurant la réduction du lignage.

La quantification précise de l'erreur, par l'établissement de l'histogramme des différences d'altitude entre le relief initial et celui restitué, et par le calcul des mesures statistiques qui lui sont associées, souligne nettement la présence de ce défaut de reconstruction. En moyenne, l'écart d'altitude est de -15.2 mètres, indiquant une très nette surestimation des altitudes restituées. Mis à part cette mesure indicative, la basse qualité de ce relief est mise en évidence par l'écart-type s'élevant à plus de 11 mètres, et par la mesure de l'écart maximum atteignant plus de 75 mètres. Ces précisions numériques montrent ainsi l'effet du speckle sur notre procédé de restitution, et plus précisément l'effet de l'intégration de données bruitées.

Par cette application, on démontre, d'une part, que l'effet du speckle sur la reconstruction est bien plus important que celui dû à l'approximation faite sur l'angle azimutal des parcelles. Et, d'autre part, on comprend bien mieux la provenance des discontinuités constatées sur les reliefs obtenus à partir de réelles images radar.

Notre procédé de restitution ne considère pas directement cette première carte d'altitude. Une intégration des données, selon la méthode décrite en 4.4, permet de filtrer en grande partie ces discontinuités azimutales, et ainsi d'établir des modèles de relief bien plus proche de la réalité. La figure (Fig 5.8 b) illustre le résultat de ce filtrage. Au niveau numérique, bien que la gamme d'altitude de ce modèle reste élevée (0 mètres - 151 mètres) comparée à celle du relief initial, les mesures reflétant les erreurs telles que la moyenne de -9.3 mètres, le maximum de 51 mètres, et l'écart-type de 9.1 mètres confirment la nette diminution des discontinuités, et donc une certaine amélioration de la qualité.

Image radar B

Comme l'application précédente, nous réalisons une reconstruction du relief à partir de l'image radar B (gaussienne bidimensionnelle déformée par un pli circulaire, Fig 5.5), en négligeant l'angle β de chaque parcelle (§4.2). Le résultat obtenu (Fig 5.9 a) présente les mêmes caractéristiques que celles illustrées par la figure (Fig 5.8 a). En effet, d'un point de vue qualitatif, nous remarquons que les deux pics d'altitude présents dans le relief initial (Fig 5.2) apparaissent dans cette restitution, mais noyés dans les discontinuités azimutales dues à l'intégration du speckle. D'un point de vue quantitatif, le relief restitué présente des altitudes comprises entre 0 et 191 mètres, très largement surestimée vis à vis de la gamme du modèle initiale. Les mesures statistiques révélant les erreurs de restitution, telles que la moyenne de -16.6 mètres, le maximum de 92 mètres, et l'écart-type de 13.9 mètres, confirment la basse qualité de ce relief.

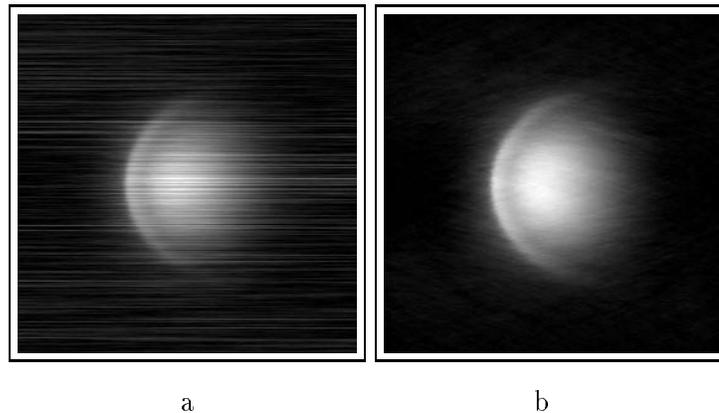


FIG. 5.9 – En a : résultat en géométrie radar de la restitution du relief à partir de l'image B (Fig 5.5), en considérant l'angle β négligeable, et en b : relief résultant en géométrie radar par une reconstruction décrite en 4.4 assurant l'atténuation de l'effet du speckle.

Cette expérience renforce encore le fait que nous avons reconstruit un relief peu représentatif de la réalité, et que ceci semble dû uniquement à la présence de speckle et non pas à l'approximation faite sur l'angle azimutal β de chaque parcelle.

Afin d'accéder à un relief plus représentatif, nous appliquons, comme précédemment, la méthode d'intégration des données décrite en 4.4. Le résultat, illustré par la figure (Fig 5.9), apparaît bien plus proche du modèle initial, bien que sa gamme d'altitude reste toutefois élevée (0 mètres - 158 mètres). Au niveau numérique, les mesures statistiques, moyenne de -10.5 mètres, maximum de 59 mètres, et écart-type de 10.9 mètres, indiquent, encore ici, une très nette amélioration de la qualité du relief par ce procédé.

5.3 Reconstruction avec régularisation selon §4.3

Grâce aux applications précédentes, on a pu constater que la reconstruction du relief est proche de la réalité lorsque l'image initiale est sans speckle, mais en revanche, loin d'être parfaite lorsque l'image radar a du speckle. Dans cette partie, nous réalisons la reconstruction du relief par restauration markovienne utilisant un recuit simulé conformément au schéma présenté précédemment (§4.3). Par cette restitution, nous cherchons à éliminer les déformations géométriques du relief dues à l'approximation faite sur l'angle azimutal, ainsi que les discontinuités dues à l'intégration du speckle. Puis, nous essaierons de quantifier l'erreur sur les altitudes ainsi restituées.

5.3.1 Reconstruction à partir d'images radar simulées sans speckle

Image radar A

Nous rappelons que, dans ce cas, le résultat (Fig 5.6) obtenu par l'étape d'intégration décrite précédemment présente la qualité d'être quasiment identique au modèle original. Cependant, de fines déformations géométriques sont apparues par application de cette méthode de reconstruction. Nous procédons donc à une reconstruction avec régularisation dans l'espoir d'éliminer ces déformations.

Au premier abord, le résultat de ce processus markovien, illustré par la figure (Fig 5.10 a), ne présente pas de grosses différences vis à vis de celui obtenu par le procédé d'intégration décrit §4.2.3. Globalement, la forme de ce relief semble avoir été conservée. Localement, par la superposition des courbes de niveau (Fig 5.10 c) de ce modèle restitué (Fig 5.10 b) et du modèle de référence, nous constatons que les déformations géométriques qui étaient initialement présentes, ont certes été réduites, mais elles font cependant place à de plus fines irrégularités.

D'un point de vue numérique, par le biais de l'histogramme de l'écart altimétrique entre la référence et l'estimée, et de ses mesures statistiques, on remarque que ces défauts, bien que minimes visuellement, sont relativement plus importants que ceux existant initialement. En effet, mis à part la moyenne qui reste inchangée, le maximum de l'erreur atteint 5 mètres, et son écart-type 0.8 mètres. Cette légère baisse

de la qualité met ainsi en évidence le fait que la restauration markovienne est un processus un peu trop global, et de ce fait, difficile à adapter à notre problème. De plus, comme aucun bruit local n'est présent dans les données radar utilisées, il n'y a donc aucun intérêt à utiliser cette restauration.

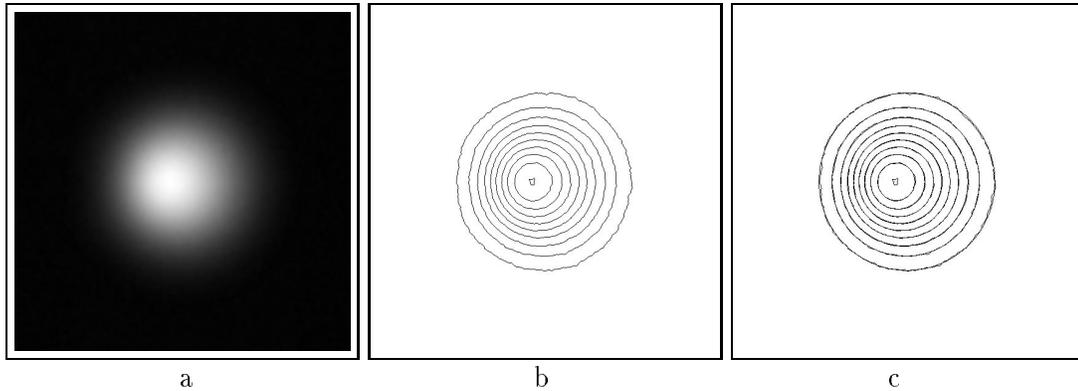


FIG. 5.10 – En *a* : résultat en géométrie radar de la restitution du relief par restauration markovienne, à partir de l'image A (Fig 5.4), en *b* : courbes de niveau tous les 10 mètres, et en *c* : superposition des courbes de niveau du modèle initial et du modèle restitué.

Image radar B

Pour la reconstruction à partir de l'image radar B sans speckle (Fig 5.4), nous procédons exactement de la même façon que précédemment. Cependant, par comparaison avec l'application précédente, nous pouvons remarquer que cette restitution présente une difficulté supplémentaire : celle de préserver la forme du pli circulaire présent dans le relief initial.

La carte d'altitude (Fig 5.11 a) illustre le résultat de cette restauration. Encore une fois, ce traitement reconstruit de manière satisfaisante la forme du relief, remarquable par la présence du pli circulaire. Mais, à la vue de cette unique image, il serait difficile de donner un avis plus précis quant à la validité de ce modèle. Cet avis peut toutefois ressortir plus nettement par l'extraction des courbes de niveau (Fig 5.11 b), et par leur superposition (Fig 5.11 c) à celles provenant du modèle de référence. Les déformations géométriques ont effectivement été corrigées par ce procédé, faisant place à des défauts plus locaux.

Numériquement, par la simple différence altimétrique entre la référence et l'estimée, on constate comme précédemment une baisse de la qualité ; le maximum de ces écarts altimétriques est plus important, atteignant 9 mètres, et également un écart-type plus fort de 1 mètre. Ces mesures, bien qu'étant suffisamment faibles, montrent encore ici que la restauration markovienne est un processus un peu trop global. Effectivement, si on regarde en détail, toutes les altitudes du relief (Fig 5.7 a) subissent des modifications par ce procédé, alors qu'il faudrait considérer les points

présentant des déformations géométriques dues à l'approximation faite sur l'angle azimutal. Sachant que ces légères déformations se localisent dans les basses altitudes et en des zones où l'angle azimutal est relativement important, il faudrait donc uniquement corriger ces points. Or, notre schéma énergétique ne permet pas de prendre facilement en compte ce type de biais.

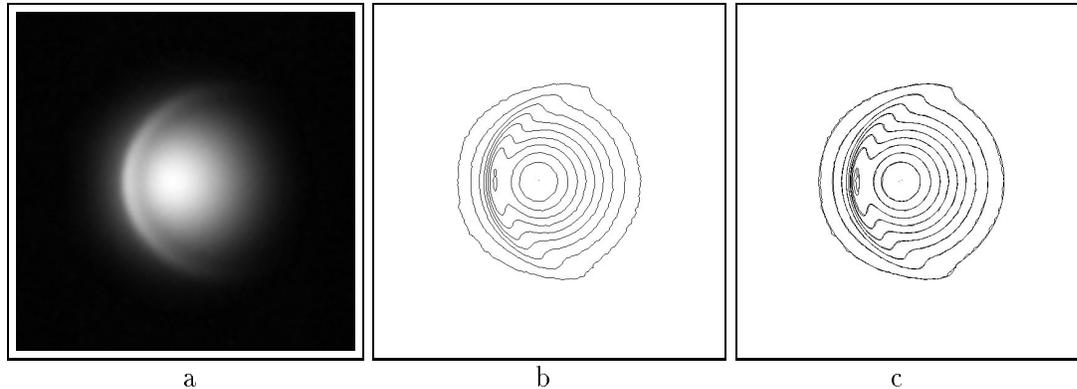


FIG. 5.11 – En *a*: résultat en géométrie radar de la restitution du relief par restauration markovienne, à partir de l'image *B* (Fig 5.4), en *b*: courbes de niveau tous les 10 mètres, et en *c*: superposition des courbes de niveau du modèle initial et du modèle restitué.

5.3.2 Reconstruction à partir d'images radar simulées avec speckle

Image radar A

Nous réalisons dans cette partie la reconstruction à partir de l'image radar A avec speckle (Fig 5.5). Nous avons vu que, dans ce cas, d'importants lignages viennent dégrader la première étape de la reconstruction (Fig 5.8 a), quelque peu améliorée par un filtrage (Fig 5.8 b). On peut attendre de la restauration markovienne qu'elle réduise totalement cet aspect. Contrairement, aux deux applications précédentes, les distorsions se localisent dans toutes les altitudes. Notre schéma énergétique semble donc mieux adapté pour cette application.

Le relief obtenu (Fig 5.12 a) suite à la restauration markovienne initialisée par (Fig 5.8 b) semble satisfaisant. On constate effectivement une totale disparition des discontinuités azimutales dues au speckle, mais également une forme restituée de ce relief très correcte vis à vis des données de référence. Cependant, comme toute méthode de restitution du relief, le procédé utilisé ne permet pas de reconstruire le relief de manière exacte. Ceci se remarque directement sur la gamme des altitudes restituées, comprise entre 0 mètre et 141 mètres, mais aussi au niveau de la quantification précise de l'erreur. Les mesures statistiques de l'écart altimétrique entre ce modèle et celui de référence reste élevées, le maximum absolu étant de 41 mètres, la moyenne de -7.5 mètres et l'écart-type d'environ 8 mètres.

Reste donc à savoir si ce biais de restitution est acceptable ou non. Les deux réponses sont en fait possibles, tout dépend de l'utilisation qui en sera faite. Si ces données restituées sont utilisées à seul fin d'avoir accès à la forme générale du relief imagé pour des applications bien déterminées, telles que le repérage des positions des sommets, le suivi de l'écoulement de l'eau, et bien d'autres, la réponse en ce qui concerne ce biais est alors affirmative. Au contraire, cet important biais paraît inacceptable dans le cas d'une utilisation demandant la connaissance précise de l'altitude, telle que la cartographie. Mais, ce dernier point peut encore être longuement discuté, et un avis contraire peut vraisemblablement être envisagé. Pour cela, considérons que la gamme d'altitude du relief (0 m - 100 m) nous est donnée. La connaissance de cette unique information provoque une réduction non négligeable des biais altimétriques constatés précédemment. Les mesures statistiques de l'erreur sont, en effet, bien plus acceptables. Le maximum absolu de cette erreur est de 9 mètres, sa moyenne de -2.6 mètres et son écart type de 1.5 mètres. Cette simple information permet donc de valider l'utilisation de ce procédé de restitution du relief.

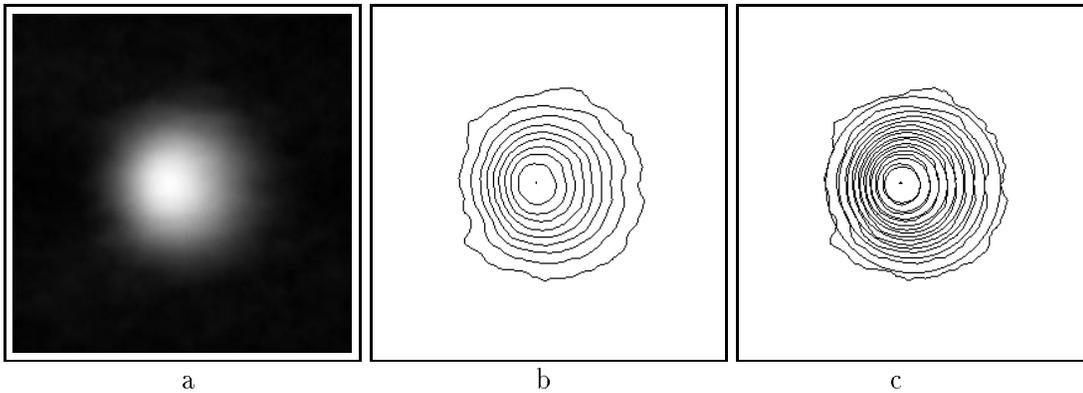


FIG. 5.12 – En a : résultat en géométrie radar de la restitution du relief par restauration markovienne, à partir de l'image A (Fig 5.5) (altitude maximale de 141 mètres), en b : courbes de niveau tous les 10 mètres en considérant connue la gamme d'altitude de 0-100 mètres, et en c : superpositions de ces courbes de niveau avec celles extraites du modèle original.

Image radar B

Nous réalisons une dernière reconstruction par restauration markovienne à partir de l'image radar B avec speckle (Fig 5.5), correspondant au MNT représentant une gaussienne bidimensionnelle déformée par un pli circulaire. Cette reconstruction est initialisée par la carte d'altitude filtrée (Fig 5.9 b). Le résultat (Fig 5.13 a) montre, comme espéré, une totale disparition des discontinuités, et la reconstruction des formes tout à fait satisfaisante comparées aux données de référence (Fig 5.13 d). Cependant, comme précédemment, on constate un important biais numérique des données d'altitude restituée. En effet, la gamme d'altitude montre une surestimation de celles-ci (altitude maximale de 147 mètres). De même, les écarts altimétriques restent importants, avec un maximum absolu de 47 mètres, une moyenne de -8.4 mètres

et un écart-type de 9.8 mètres. Si on apporte une information sur le relief telle que la gamme d'altitude (0 m - 100 m), les mesures statistiques sont alors bien moins fortes (maximum absolu de 16 mètres, moyenne de -2.1 mètres, et écart-type de 1.9 mètres), et révèlent une bonne qualité du relief restitué.

De cette dernière reconstruction, il ressort que, d'une part, la technique par restauration markovienne est efficace pour surmonter l'effet de l'intégration du speckle, mais que, d'autre part, elle ne permet malheureusement pas de reconstruire exactement le relief réel, les modèles restitués restant toutefois exploitables.

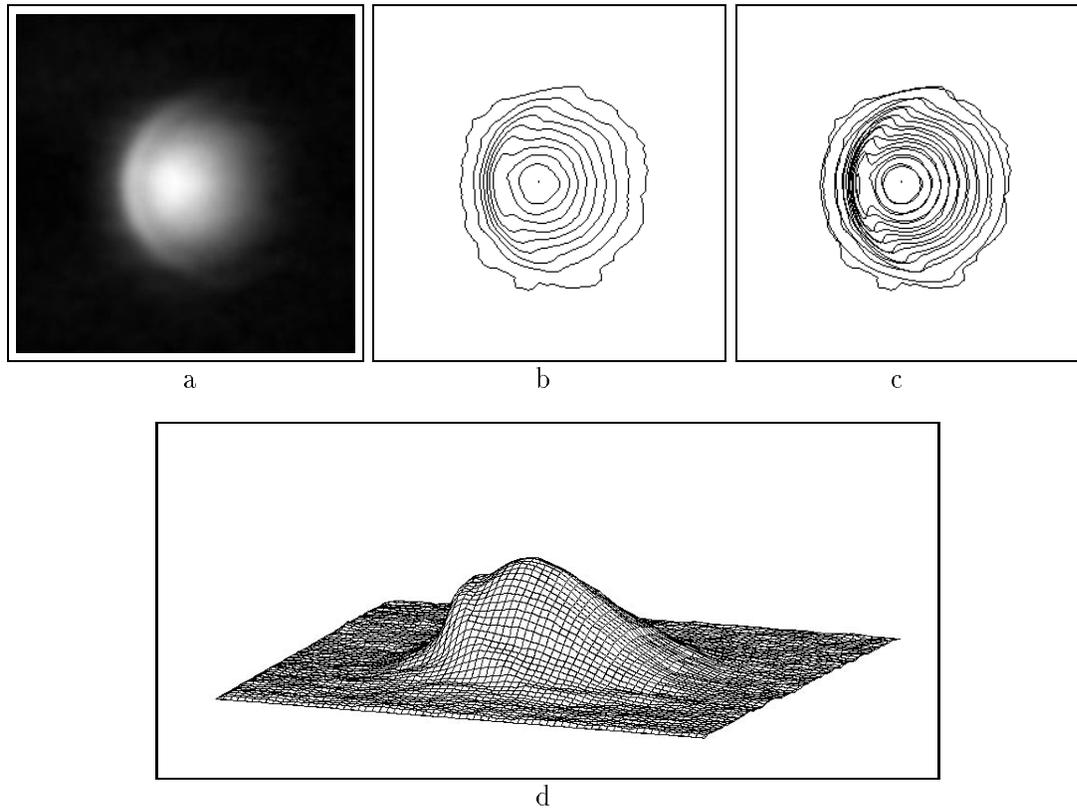


FIG. 5.13 – En a : résultat en géométrie radar de la restitution du relief par restauration markovienne, à partir de l'image B (Fig 5.5) (altitude maximale de 147 mètres), en b : courbes de niveau tous les 10 mètres en considérant connue la gamme d'altitude du modèle original (0 m - 100 m), en c : superposition de ces courbes de niveau à celles extraites de la référence, et en d : représentation 3D du modèle obtenu.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté d'évaluer le plus précisément possible les reliefs restitués à chaque étape de notre procédé décrit au chapitre 4. Pour cela, nous avons utilisé la technique de la simulation, permettant d'avoir des données

SAR initiales vérifiant entièrement les deux principales conditions d'application du procédé de restitution :

- *condition géométrique* : pas de zones de recouvrement, ou d'ombre,
- *condition radiométrique* : modèle de rétrodiffusion lambertien.

Cette technique de simulation développée est relativement simple, mettant en œuvre une méthode courante de lancé de rayons. Elle permet d'accéder à deux différents types d'image radar, suivant que l'on considère ou non la présence de speckle, c'est à dire la grande variabilité des éléments composant le couvert végétal.

Ces deux types d'images radar simulés ont été largement utilisés, à seul fin de mettre en évidence les biais numériques et structurels induit par notre procédé, et plus précisément leur évolution au cours de la restitution. Deux sortes d'évolution ressortent de ces applications :

- une légère aggravation de l'erreur (Tab 5.1) lorsque l'image radar initiale ne présente pas de speckle, mettant ainsi en évidence l'aspect global de la restauration markovienne. Dans ce cas précis, il est donc préférable d'utiliser une simple reconstruction du relief considérant l'approximation d'angle azimutal nul pour chaque parcelle. Mais, il faut bien avouer que cette application est très peu réaliste pour les images dont nous disposons, qui présentent toujours un fort speckle.
- une très nette amélioration de la qualité (Tab 5.2) dans le cas où l'image radar comporte du speckle. Mais, cette amélioration n'est pas optimale au sens où l'erreur n'atteint pas un zéro absolu, et ceci même si une information sur le relief telle que la gamme d'altitude nous est apportée. Deux points du traitement mis en œuvre peuvent être la cause de la présence de cette erreur. Tous deux proviennent directement de la méthode de simulation :
 - celle-ci approche de manière très simple le principe d'acquisition d'une image radar, mais elle est loin de correspondre à l'exact fonctionnement des capteurs SAR. Ceci peut expliquer les biais numériques constatées lors de l'étude.
 - Le fait de simuler une image radar avec speckle implique localement l'existence d'un écart non négligeable du modèle de rétrodiffusion utilisé, qu'il est difficile à prendre en compte.

Procédé	Erreur	Image A	Image B
Reconst. selon §4.2	$ max $	2	2
	moy	-0.35	-0.37
	ect	0.50	0.52
Reconst. selon §4.3	$ max $	5	9
	moy	-0.32	-0.17
	ect	0.88	1.0

TABLE 5.1 – Récapitulatif des erreurs de restitution à partir d’images radar simulées sans speckle.

Procédé	Erreur	Image A	Image B
Reconst. selon §4.2	$ max $	75	92
	moy	-15.2	-16.6
	ect	11.8	13.9
Filtre	$ max $	51	59
	moy	-9.3	-10.5
	ect	9.1	10.9
Reconst. selon §4.3	$ max $	41	47
	moy	-7.5	-8.4
	ect	8.1	9.8
§4.3 + info	$ max $	9	16
	moy	-2.1	2.4
	ect	1.5	1.5

TABLE 5.2 – Récapitulatif des erreurs de restitution à partir d’images radar simulées avec speckle.

Chapitre 6

Quantification des Reliefs Obtenus à partir d'Images Radar Réelles

Dans ce chapitre, nous chercherons à quantifier les erreurs d'estimation des altitudes restituées à partir d'images radar réelles. Un premier moyen de quantification sera abordé, consistant à comparer deux à deux les reliefs obtenus sur une même région. Puis, dans un deuxième temps, une évaluation plus précise sera effectuée grâce à l'utilisation de données cartographiques de référence. Ces diverses quantifications auront pour unique objectif de poser un avis sur la robustesse de la méthode de la radarclinométrie, mais également de présenter les éléments pouvant être responsables de biais plus ou moins importants lors de la restitution.

6.1 Comparaison des reliefs restitués

6.1.1 Estimation des erreurs

Sans connaissance de données cartographiques de référence, il est tout de même possible d'évaluer les reliefs restitués par radarclinométrie. Cela nécessite, en revanche, d'avoir un éventail de données radar suffisamment important et divers, de manière à réaliser de multiples comparaisons.

Présentation de la région :

La région étudiée se situe en Guyane, au Nord des montagnes Plomb. Rappelons que le site guyanais est un des plus favorables pour les applications de la radarclinométrie, par son couvert végétal uniforme et ses déclivités suffisamment douces vis à vis de l'angle d'incidence. Cette région de $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ est essentiellement constituée de petits massifs montagneux de formes très diverses. La gamme d'altitude est assez faible, allant de 6 mètres à 215 mètres. Les figures (Fig 6.1 de a à e) illustrent les données radar de cette région. A la vue de ces données, on constate effectivement la présence de massifs montagneux apparaissant pour de faibles inci-

dences, contrairement aux incidences plus élevées où il est difficile de les discerner correctement.

Lors de la restitution du relief, ces données radar sont utilisées indépendamment les unes des autres. Chaque restitution est réalisée selon le procédé décrit au chapitre 4. Il est à noter qu'aucune modification numériques des paramètres de la restauration markovienne n'a été apportée pour ces applications.

Problème de géométrie :

Pour cette première évaluation, apparaît un problème de géométrie. En effet, chacun des reliefs restitués est obtenu dans une géométrie radar qui lui est propre, dépendant uniquement de l'angle d'incidence utilisé par le système d'acquisition. Pour pallier ce problème, chaque relief restitué est projeté en géométrie plane. Puis, on procède à un recalage avec détermination manuelle d'un ensemble de points homologues, de manière à les comparer les uns par rapport aux autres. Les figures (Fig 6.2 de a à e) illustrent les reliefs résultants.

Evaluation :

D'un point de vue qualitatif, les résultats semblent correspondre les uns aux autres. Certaines structures et formes se retrouvent facilement sur chacun des reliefs restitués. Cependant, il existe également des différences locales, plus ou moins importantes. Ceci laisse donc entendre que le procédé employé pour la restitution ne mène malheureusement pas à une solution unique (donc exacte), et que celle-ci dépend étroitement de la qualité des données radar utilisées. En effet, il a été constaté précédemment que l'effet de l'angle d'incidence radar peut considérablement affecter la netteté des massifs imagés, si sa valeur est considérée de manière exagérée vis-à-vis des déclivités du relief. Il se traduit au niveau radiométrique une plus importante confusion entre le speckle et l'information réelle apportée par le relief. Cet effet se remarque également sur les résultats, puisque, dans le cas d'un angle d'incidence SAR élevé, ces derniers apparaissent effectivement bien plus lissés par notre procédé, et de ce fait bien moins nets et précis.

D'un point de vue quantitatif, nous estimons tout d'abord les mesures statistiques classiques telles que l'altitude maximale, moyenne et l'écart type, sur chacune des cartes d'altitude prise séparément. Bien évidemment cette estimation ne permet en aucun cas de savoir quel relief est le plus réaliste. En revanche, ces mesures (Tab 6.1) indiquent effectivement une certaine ressemblance des reliefs obtenus. Les figures (Fig 6.3) et (Fig 6.4) illustrent des profils altimétriques extraits des différents reliefs. Bien que les gammes d'altitude diffèrent d'un relief à un autre, l'allure générale de ces profils confirme l'existence d'une certaine correspondance dans les restitutions. Cependant, ils mettent en évidence un biais dans les résultats bien plus important que celui présenté par Frankot [FRAN-87] (Fig 1.1).

D'autre part, nous effectuons également des mesures statistiques sur les cartes de différences entre chaque couple de carte d'altitude possible (Tab 6.2). Les figures (Fig 6.5 a) et (Fig 6.5 b) sont des exemples d'histogrammes des écarts altimétriques existants entre deux reliefs. Leur forme est régulière, et se rapproche de celle d'une

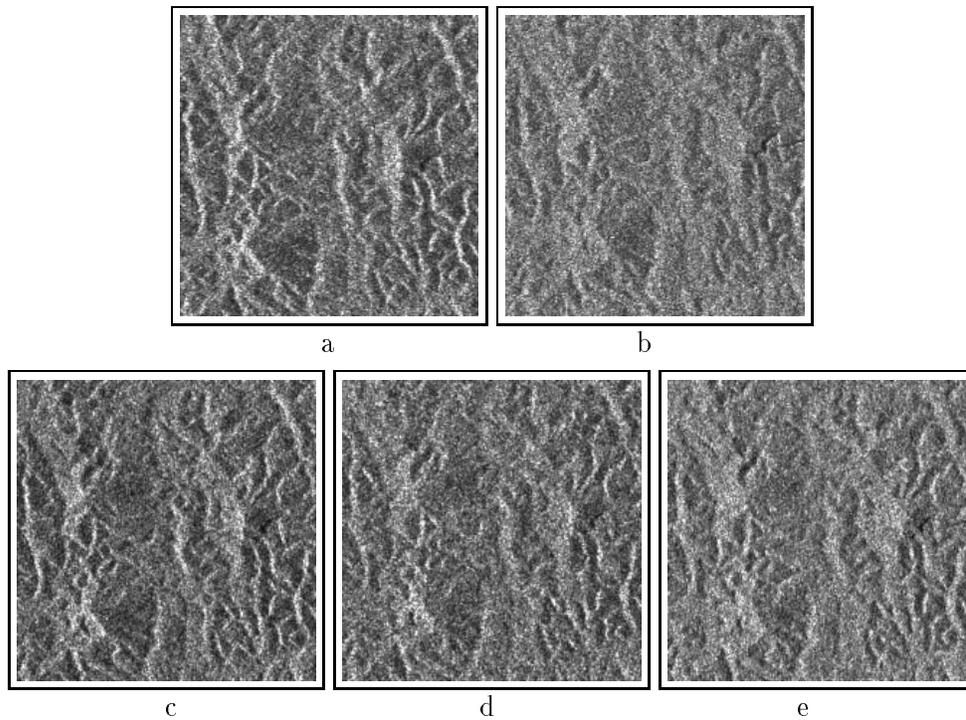


FIG. 6.1 – Images radar d’une région située au Nord et en bordure des montagnes Plomb (36 km^2), et acquises en a : par ERS-1 (22°), en b : par JERS-1 (36°), en c : par RADARSAT (25°), en d : par RADARSAT (32°), et en e : par RADARSAT (45°).

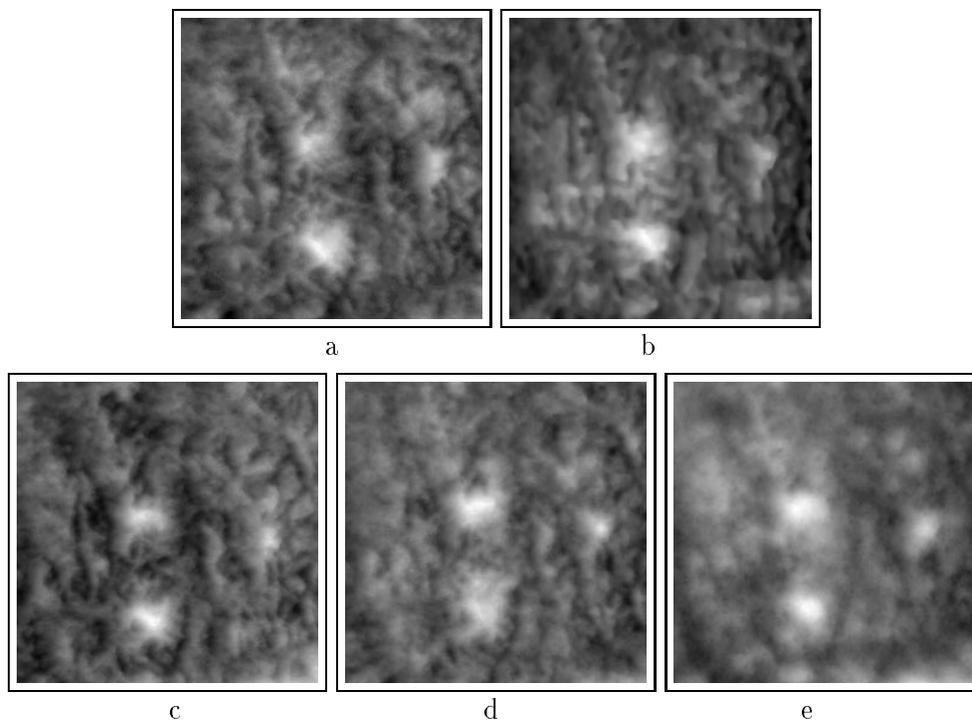


FIG. 6.2 – Reliefs représentés en géométrie plane, restitués par radarclinométrie à partir des images radar respectives illustrées par les figures (Fig 6.1 de a à e).

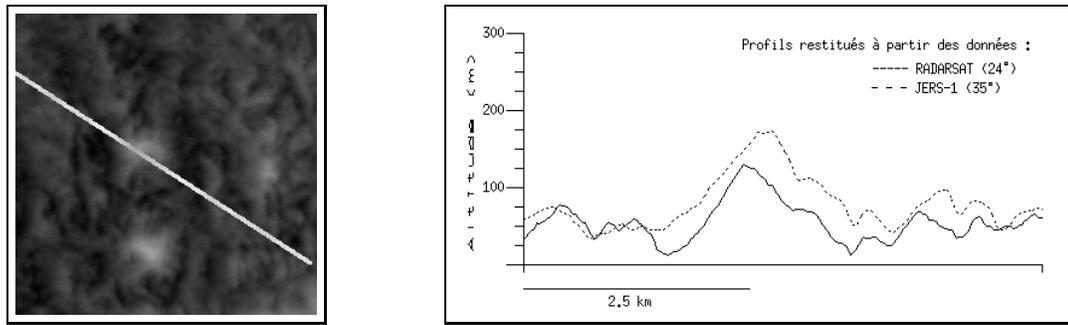


FIG. 6.3 – Profils d'une coupe extraite des cartes d'altitude restituée respectivement à partir des données JERS-1 (36°) et RADARSAT (25°).

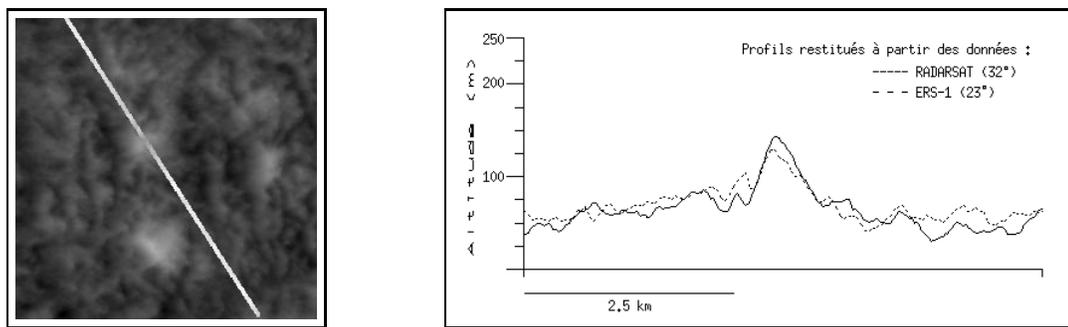


FIG. 6.4 – Profils d'une coupe extraite des cartes d'altitude restituée respectivement à partir des données ERS-1 (22°) et RADARSAT (32°).

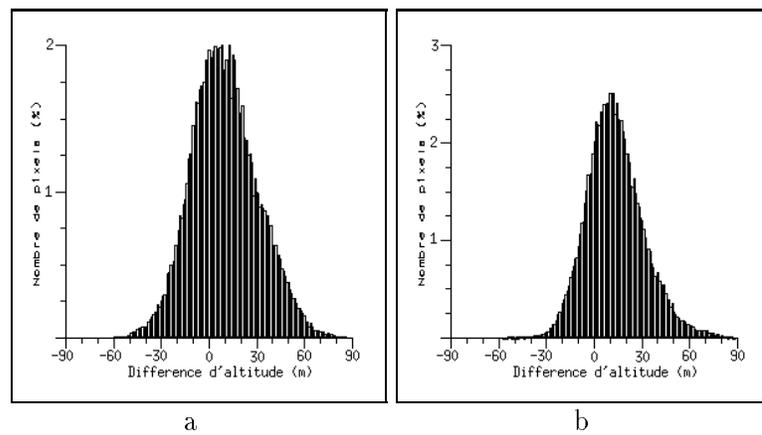


FIG. 6.5 – Exemples d'histogramme de différence entre deux cartes d'altitude restituées par radarcinométrie à partir d'images radar différentes (en a : ERS-1 (22°) - RADARSAT (25°), et en b : JERS-1 (36°) - RADARSAT (32°)).

Système SAR	(θ)	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
RADARSAT	(25°)	0	156	50.2	19.6
RADARSAT	(32°)	0	146	49.4	18.0
RADARSAT	(45°)	0	205	68.3	29.7
ERS-1	(22°)	0	164	61.2	18.8
JERS-1	(36°)	0	189	64.6	25.4

TAB. 6.1 – Mesures statistiques (en mètres) sur les cartes d'altitude restituée à partir d'images radar d'une région située au Nord des montagnes Plomb en Guyane, acquises par différents types de capteurs SAR.

Carte 1 / Carte 2	Moy(dH)	Ect(dH)	Max($ dH $)	Moy($ dH $)	Ect($ dH $)
R (25°) / R (32°)	1.0	19.8	70	15.6	12.2
R (25°) / R (45°)	-17.8	27.4	121	26.3	19.4
R (25°) / E (22°)	-10.8	20.7	87	18.2	14.5
R (25°) / J (36°)	-14.0	25.8	122	22.9	18.5
R (32°) / R (45°)	-18.8	20.2	91	22.1	16.5
R (32°) / E (22°)	-11.8	14.0	71	14.4	11.3
R (32°) / J (36°)	-15.1	17.8	89	18.3	14.5
R (45°) / E (22°)	7.8	23.7	80	19.5	15.2
R (45°) / J (36°)	3.7	21.9	97	17.6	13.5
E (22°) / J (36°)	-3.2	20.6	79	16.5	12.7

TAB. 6.2 – Mesures statistiques des écarts altimétriques considérés en valeur entière et en valeur absolue, entre deux cartes d'altitude obtenues par radarclinométrie, à partir d'images radar acquises par différents types de capteur SAR (R : RADARSAT, E : ERS-1, et J : JERS-1).

gaussienne excentrée de la valeur nulle et d'écart type relativement important. Le fait que celle-ci soit excentrée, c'est à dire d'écart moyen non nul, indique clairement la surestimation, ou au contraire la sous-estimation, des données altimétriques d'une carte par rapport à une autre. Ce fait ne peut être considéré comme un critère de qualité des restitutions, mais comme une information relative à la correspondance locale des modèles. En ce qui concerne l'écart type, de l'ordre de 20-30 mètres selon le tableau (Tab 6.2), cette mesure est certes indicative d'une importante divergence numérique entre les modèles obtenus, mais reste dans une gamme de précision ayant un intérêt opérationnel. Toutefois, les altitudes estimées par notre processus de reconstruction demande à être utilisée avec beaucoup de précaution. En ce qui concerne le maximum, il est difficile de dire si cette mesure est caractéristique des désaccords existants. En effet, d'une part on constate que cette valeur est importante vis-à-vis de la gamme d'altitude restreinte de chaque relief ; mais, d'autre part, on remarque également que ce maximum n'affecte que très peu de pixels, ce qui en réduit l'importance, et de ce fait, la rend peu représentative pour la quantification.

6.1.2 Remarques sur les divers paramètres SAR

L'intérêt de ces multiples comparaisons n'est pas seulement destiné à chercher les ressemblances, ou au contraire les désaccords, des reliefs restitués. C'est aussi l'occasion d'émettre quelques remarques concernant l'influence des divers paramètres du capteur SAR :

- l'angle d'incidence : son effet a été détaillé et mis en évidence précédemment par les reliefs obtenus à partir d'images radar acquises par le système RADARSAT. Rappelons cependant que le fait d'avoir un angle d'incidence trop grand provoque irrémédiablement une dégradation radiométrique de l'image radar, due à l'effet prépondérant du speckle, et entraînant, de ce fait, d'importants défauts de netteté et d'estimation par notre procédé de restitution.
- la polarisation : elle n'est pas mise en valeur par ces résultats. Un seul jeu de données (RADARSAT à 25°, ERS-1 à 22°) met en évidence son influence. En théorie, pour les applications sur la Guyane, aucun effet ne devrait être constaté, puisque le couvert végétal de cette région est essentiellement composé de forêt tropicale dense, ne privilégiant pas de direction précise. De plus, conclure à partir de ce seul jeu de données serait aventureux.
- la longueur d'onde : son effet pourrait être mis en évidence par le couple de données RADARSAT à 32° et JERS-1 à 36°. Mais, comme précédemment, un seul jeu de données pour l'estimation des différences ne permet pas de conclure précisément sur son influence.

6.2 Comparaison à des données cartographiques

Dans cette partie, nous allons procéder à une évaluation plus robuste des reliefs obtenus par notre méthode de restitution, grâce à l'utilisation de données cartographiques. Comme précédemment, cette évaluation concernera uniquement les reliefs de la Guyane Française, puisque nous disposons de données cartographiques (MNT¹ recouvrant toute la Guyane, et cartes topographiques), réalisés par l'Institut Géographique National (IGN). Par la diversité de ces données de référence, l'évaluation est alors réalisée par des techniques très différentes.

6.2.1 Utilisation d'un MNT

Origine :

Ce MNT, illustré par la figure (Fig 6.6), recouvre la totalité de la Guyane française. C'est le seul existant. Il a été constitué par l'IGN, par compilation de données d'origines diverses, dans le cadre d'un projet visant à permettre la rectification géométrique des images radar, afin de produire des spatio-cartes au 1/200000 de toute cette région.

Au vue de la figure (Fig 6.6), il apparaît une grande inhomogénéité en terme de qualité. En effet, la partie Nord semble bien mieux cartographiée que la partie Sud. Ceci s'explique par une grande inégalité au niveau des données cartographiques. Citons l'exemple des levées topographiques, qui représentent les données les plus précises. Elles sont inexistantes dans toute la région Sud, du fait de son couvert végétal peu propice et peu pénétrable pour leur réalisation. Cependant, ces mesures ne sont pas les seules qui ont permis de constituer ce MNT. Elles sont, en fait, de sources très diverses :

- *DCW (Digital Chart of the World)*
- *la BDZ de l'IGN*
- *les cartes topographiques au 1/50000*
- *les esquisses photogrammétriques au 1/200000*
- *la carte globale de la Guyane au 1/500000*
- *les points GPS*
- *les pointés stéréo radar*

Toutes ces données ont été converties dans un même système géodésique et à un pas de 100 mètres pour réaliser ce MNT.

1. Nous tenons à vivement remercier ici Mr. Jean-Philippe Lagrange et Mr. Claude Penicand (DGA), pour avoir mis à notre disposition ce MNT de référence.

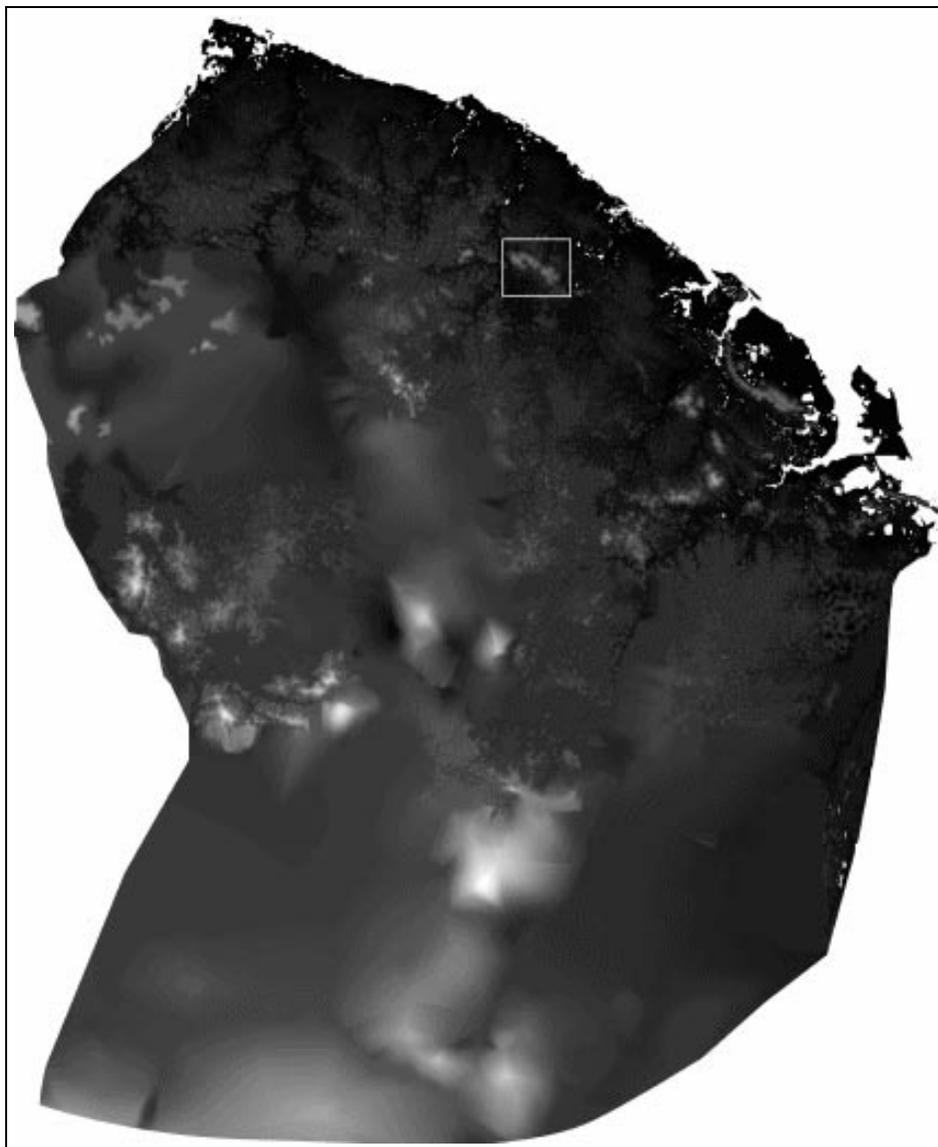


FIG. 6.6 – MNT (©IGN) de la totalité du territoire guyanais, réalisé par l'IGN.

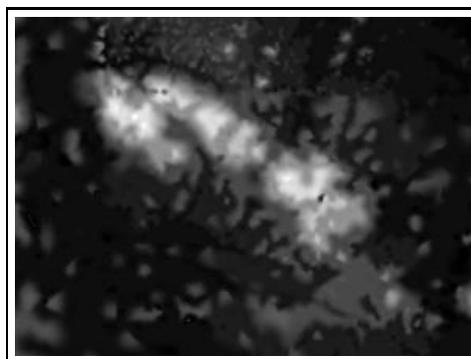


FIG. 6.7 – MNT de la Montagne Plomb extrait du MNT (©IGN) représenté ci-dessus (Fig 6.6).

Problème d'échelle :

Le problème d'échelle intervient dans cette évaluation. En effet, nos données restituées ont une bien meilleure résolution que celle du MNT. Pour pallier ce problème, nous avons choisi de réduire la résolution de nos données à celle du MNT qui est de 100 mètres \times 100 mètres. Cette réduction est de nombre entier dans notre cas. Elle peut donc être réalisée par une méthode pyramidale [ROSE-84]. Cette méthode consiste à affecter au pixel résultat, la moyenne des pixels d'une fenêtre 2×2 , et ré-itérer ce processus n fois (n représentant la puissance de 2 qu'il faut pour avoir ici $100/12.5 = 8$, d'où $n = 3$), jusqu'à ce que la résolution désirée soit atteinte.

Problème de géométrie :

L'échelle n'est pas le seul problème intervenant dans cette évaluation. En effet, il apparaît également un problème de géométrie. Or, deux possibilités peuvent permettre de résoudre ce problème :

- projeter le relief restitué dans la géométrie quasi-plane du MNT,
- projeter les altitudes du MNT dans la géométrie du radar avec un angle d'incidence approprié.

Rappelons que ces deux possibilités n'ont cependant pas la même incidence sur l'évaluation. En effet, la première donnera non seulement une erreur sur les altitudes, mais également une erreur sur la position, du fait de l'intervention des altitudes estimées par notre processus pour la projection en géométrie plane. En revanche, la seconde possibilité ne couplera pas ces deux types d'erreur et donnera directement accès à l'erreur sur les altitudes. Nous avons donc choisi de projeter le MNT en géométrie radar, puis d'évaluer le relief obtenu par radarclinométrie à celui-ci.

Evaluation :

Nous avons procédé à l'évaluation du relief de la *Montagne Plomb*, illustré au chapitre 4 par la figure (Fig 4.20). En ce qui concerne les données de référence, elles sont représentées à l'état brut par la figure (Fig 6.7). Comme décrit précédemment, on réduit la résolution des données à évaluer, et on projette le MNT de référence en géométrie radar.

A partir des histogrammes (Fig 6.8) et (Fig 6.9), des mesures statistiques (Fig 6.10) de chacun des modèles (référence et estimé), on constate une certaine discordance entre ces deux reliefs. Par les moyennes et les médianes, on remarque que le modèle restitué par radarclinométrie présente des altitudes pour la plupart surestimées, bien que sa gamme d'altitude (altitude minimale-altitude maximale) soit proche de celle du modèle de référence. Par ailleurs, une simple comparaison des deux histogrammes suffit pour remarquer les importantes discontinuités existant dans celui des données de référence (Fig 6.8) et vis-à-vis de celui des données estimées (Fig 6.9). Ces discontinuités mettent ainsi en évidence une certaine imprécision altimétrique dans les données de référence. Lors de l'évaluation, il est impossible de savoir précisément si

une erreur provient du modèle restitué ou du modèle de référence. De ce fait, la quantification de l'erreur de restitution par cette évaluation devra donc être considérée avec précaution.

De la carte des différences d'altitude entre le modèle de référence et le modèle restitué (avec prise en compte du signe de cette différence), on établit comme précédemment l'histogramme, et on calcule les mesures statistiques classiques qui lui sont associées. L'histogramme illustré par la figure (Fig 6.11) se rapproche de la forme d'une gaussienne dont le maxima est excentré par rapport à la différence d'altitude nulle. Rappelons que la radarclinométrie ne donne l'altitude qu'à une constante près. Il aurait été vraisemblablement plus judicieux de faire coïncider préalablement les moyennes des deux modèles. Mais, nous avons volontairement choisi de développer un processus aveugle, c'est à dire où aucune information n'est apportée lors de la reconstruction du relief. Cette évaluation met en évidence une surestimation des altitudes estimées par radarclinométrie. Par ailleurs, considérons la valeur de l'écart type (Tab 6.12), mesure indiquant bien mieux la qualité et la validité du modèle estimé. Cette mesure est importante, elle est de l'ordre de 40 mètres, vis-à-vis de la gamme d'altitude du modèle. Cependant, si nous introduisons le fait que la référence est assez imprécise par ces données altimétriques établies avec un écart type de 15 mètres, nous pouvons alors considérer que le modèle obtenu par radarclinométrie est satisfaisant, et proche en terme de qualité de celui de l'IGN.

6.2.2 Utilisation d'une carte topographique

Origine :

Nous utilisons ici les données d'une carte IGN de la Guyane. Son échelle est de 1/50000. La figure (Fig 6.13) illustre un extrait que nous avons utilisé pour l'évaluation des reliefs restitués par radarclinométrie. Cette carte a été réalisée selon des procédés classiques. Une stéréopréparation a eu lieu en 1954-55 suivant le canevas astronomique établi également à cette époque. Puis, en 1955-56, ces données ont été complétées par une couverture aérienne verticale. La restitution à l'Appareil Poivilliers a alors été réalisée, puis dessinée et publiée par l'IGN en 1962. Cette carte présente des éléments très divers :

- *le relief par ses courbes de niveau et par ses indications d'altitude,*
- *les fleuves et les rivières,*
- *les parties inondées ou inondables,*
- *le type de couvert végétal.*

Extraction :

Tous les éléments présents dans cette carte scannée ne nous sont pas utiles. Seules les courbes de niveau ont un intérêt pour l'évaluation. Il est donc nécessaire de les

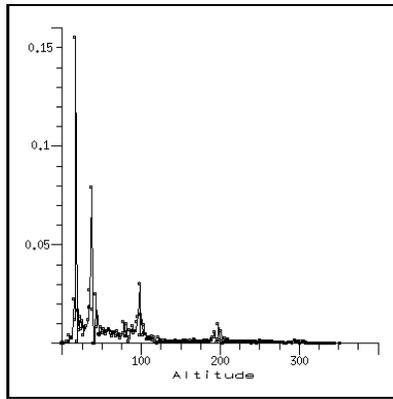


FIG. 6.8 – Histogramme des altitudes de référence (MNT ©IGN).

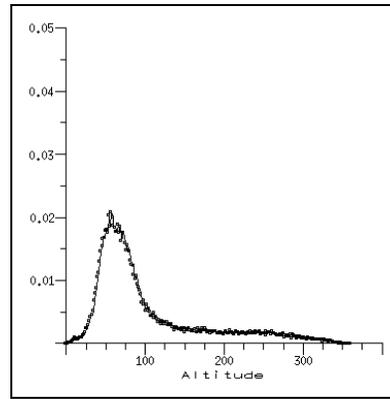


FIG. 6.9 – Histogramme des altitudes restituées par radarclinométrie.

	min. (m)	max. (m)	moy. (m)	med. (m)	ect. (m)	var.
Données de référence	0	352	77.0	47.4	70.0	0.92
Données estimées	0	360	103.5	76.6	71.1	0.66

FIG. 6.10 – Mesures statistiques de chacun des reliefs (référence et estimées) pris séparément.

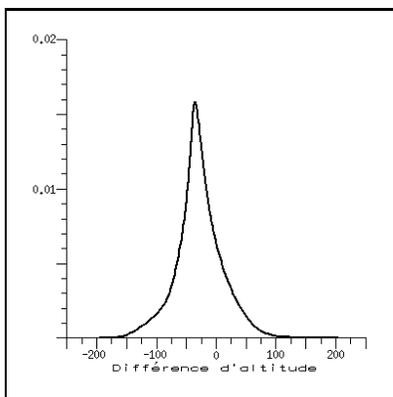


FIG. 6.11 – Histogramme lissé des différences d'altitude entre le MNT de référence et le relief obtenu par radarclinométrie.

	min. (m)	max. (m)	moy. (m)	ect. (m)
Différence d'altitude entière	-197	213	-26.5	42.2
Différence d'altitude val. abs.	0	213	40.0	29.7

FIG. 6.12 – Mesures statistiques établies à partir de l'histogramme (Fig 6.11) des différences d'altitude entre le modèle de référence et le modèle restitué par radarclinométrie.



FIG. 6.13 – Extrait de la carte IGN de la Guyane (échelle: 1/50000).

extraire du reste de la carte. Pour cela, deux méthodes sont possibles :

- *une méthode manuelle* : couramment appelée digitalisation, cette méthode consiste à tracer chaque courbe de niveau les unes après les autres, par un suivi manuel ; le résultat de ce tracé reste sous la forme d'une image.
- *une méthode automatique* : elle fait intervenir des algorithmes classiques du traitement des images [TROU-93]. Cette méthode est basée sur les différentes composantes de couleur [SLUI-95], consistant tout d'abord à réaliser un seuillage par couleur (**R**ouge, **V**erte, **B**leu), pour extraire grossièrement les courbes de niveau des autres éléments figurant sur la carte, tels que les indications d'altitude, les rivières et le fond coloré. Mais, cette étape ne s'avère pas suffisante puisque la forme des courbes est très variable : lignes plus ou moins épaisses, et plus ou moins coupées, et également points et barbules provenant des autres éléments. Pour remédier à ce défaut, la morphologie mathématique (érosion, dilatation, ...) [BLOC-94] est couramment utilisée. Mais, encore une fois, ce procédé n'est pas optimal, et nécessite de ce fait l'intervention d'un opérateur pour rectifier localement le résultat de cette extraction.

La seconde méthode d'extraction décrite précédemment s'est avérée être un échec dans notre cas. Les composantes de couleur utilisées pour représenter les courbes de niveau étant très proches de celles du fond de la carte, la difficulté a donc résidé dans la recherche du seuil. De ce fait, nous avons choisi d'utiliser la première méthode de digitalisation, assurant ainsi une plus sûre extraction. La figure (Fig 6.14) illustre le résultat de cette extraction ; l'altitude de chaque courbe de niveau y est représentée sur une échelle en niveaux de gris.

Problème d'échelle :

Comme pour l'évaluation précédente, les données restituées et les courbes de niveau de référence posent un problème d'échelle de représentation. En effet, la résolution de l'image des courbes de niveau est de 6.8 mètres, alors que celle du relief restitué est de 25 mètres. Pour pallier ce problème, deux approches sont possibles, soit réduire l'image de référence, soit augmenter la résolution du relief à évaluer. Or, sachant que la réduction de l'image de référence provoquerait une modification de son contenu, et ne permettrait pas de garantir la forme des courbes de niveau, il nous faut donc considérer la seconde approche. La technique pyramidale utilisée lors de l'évaluation par le MNT ne peut être appliquée aussi simplement ici, puisque l'augmentation est de nombre flottant (25/6.8). De ce fait, une technique courante d'interpolation est ici utilisée, afin de rendre la résolution du relief restitué égale à celle de l'image de référence des courbes de niveau.

Problème de géométrie :

L'utilisation des courbes de niveau pose également un problème de géométrie. Mais, contrairement à l'évaluation précédente, il n'est pas aussi simple de projeter les courbes de niveau en géométrie radar. De ce fait, nous avons choisi de projeter le relief issu de la radarclinométrie en géométrie plane. Donc, l'évaluation couplera deux



FIG. 6.14 – *Courbes de niveau extraites de la carte IGN (Fig 6.13) par digitalisation (échelle d'altitude représentée en niveau de gris).*

sortes d'erreur, une première sur la position, et une deuxième sur l'altitude. L'image (Fig 6.15) illustre le résultat obtenu suite aux deux transformations successives, l'une d'échelle et l'autre de géométrie. On voit que les courbes de niveau y épousent très bien le relief calculé par notre méthode.

Evaluation :

Pour cette évaluation, nous établissons pour chaque courbe de niveau les mesures statistiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane, l'écart type et le coefficient de variation. Toutes ces mesures figurent dans le tableau (Tab 6.3). Elles indiquent l'existence d'un important biais dans les données restituées. Bien que visuellement la forme semble correspondre à celle de l'image de référence, il n'en est pas de même au niveau des valeurs numériques. Joint au tableau de mesures, nous avons représenté les quatre premières mesures (minimum, maximum, moyenne, médiane). Nous notons que la courbe de la moyenne comme celle de la médiane sont trop plates, et particulièrement pour les altitudes faibles et fortes. Nous notons également des domaines de variation très larges, à toute altitude. La sous-estimation de l'altitude est donc mise en évidence par cette évaluation. A notre sens, le processus est le suivant :

- par suite du speckle très important, la première étape de restauration tend à beaucoup surestimer les pentes fortes (cela a bien été vu lors des simulations avec speckle),
- afin de supprimer les lignages résultant, le processus markovien manifeste une tendance inverse : celle d'aplanir les reliefs.

Il est clair que nous n'avons pas trouvé un équilibre satisfaisant entre ces deux effets. Pour l'instant nous privilégions l'aspect visuellement cohérent du relief à l'exactitude altimétrique. Nous verrons au chapitre 7 comment il est possible de prendre en compte des points cotés pour fixer plus exactement l'altitude du MNT.

6.2.3 Utilisation d'un MNT engendré à partir des courbes de niveau

Méthode pour engendrer un MNT :

Nombreuses sont les méthodes existantes pour engendrer un MNT à partir de courbes de niveau. Elles utilisent soit des triangulations, soit des processus itératifs. A titre indicatif, détaillons trois de ces méthodes :

- *La méthode de spline plaque-mince* : la surface est alors décrite par un modèle variationnel [BIGN-95] défini par des mesures altimétriques et une contrainte de régularité anisotrope. Cette contrainte est généralement modélisée par la dérivée seconde au point considéré, mais, une caractéristique propre au terrain, telle que les zones régulières d'érosion, peut y être associée.

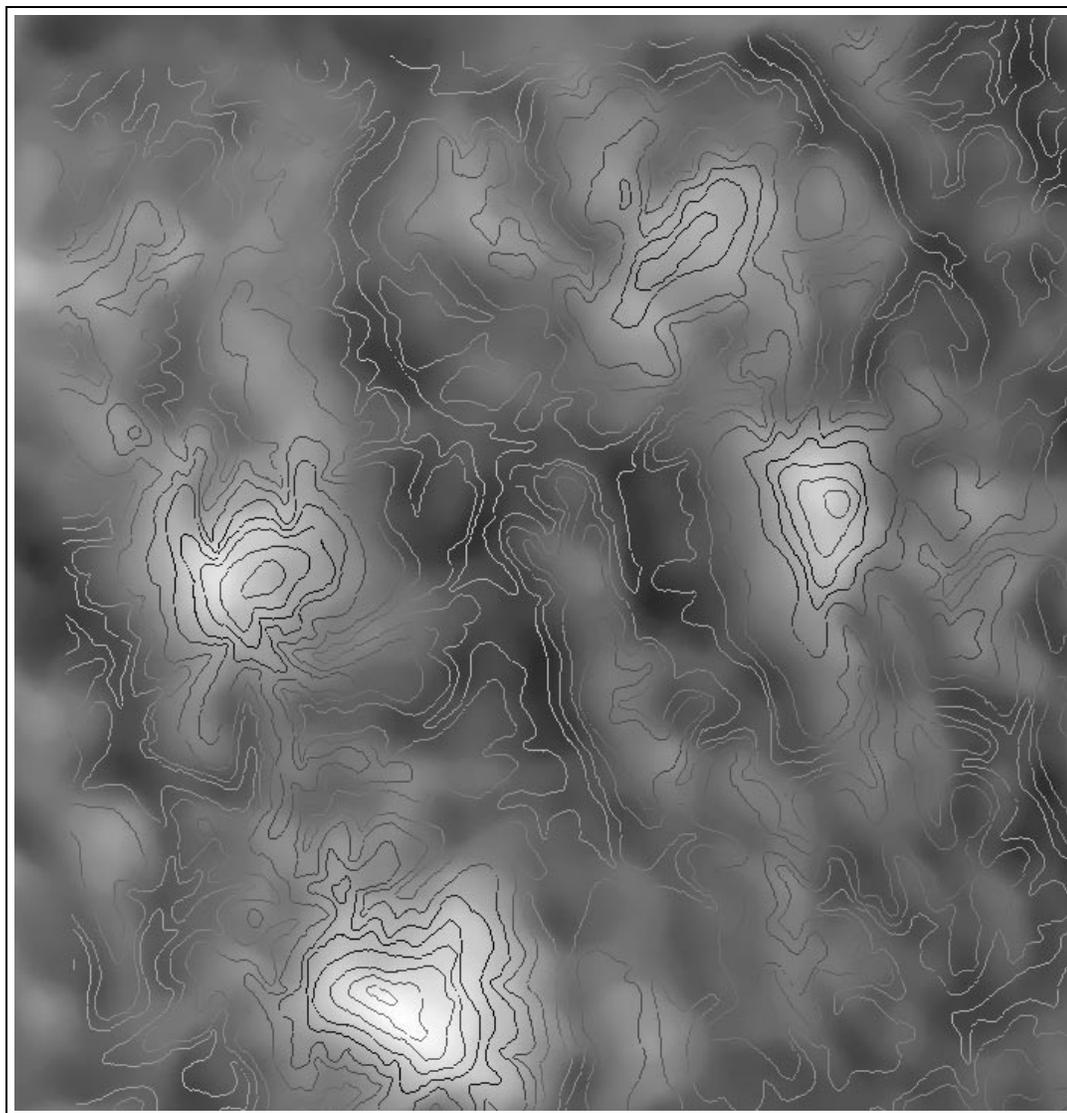
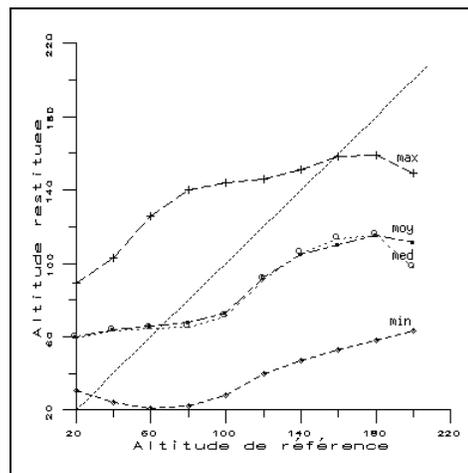


FIG. 6.15 – *Superposition des courbes de niveau extraites de la carte IGN (Fig 6.13) et du modèle obtenu par notre restitution à partir des données ERS-1, puis dilaté pour augmenter sa résolution, et projeté dans la géométrie plane.*

niv.	nb.	min.	max.	moy.	med.	ect.	var.
20	4952	31	89	59.7	59.0	12.6	0.21
40	11575	24	103	63.9	63.3	14.5	0.23
60	13484	21	126	66.0	64.4	16.5	0.25
80	10846	22	140	67.6	65.4	17.8	0.26
100	6571	28	144	73.0	70.8	20.2	0.28
120	2092	40	146	92.7	91.4	22.7	0.24
140	1041	47	151	104.8	105.5	23.3	0.22
160	626	53	158	110.1	113.1	26.8	0.24
180	350	58	159	115.0	115.2	26.2	0.23
200	98	63	149	111.1	97.9	32.8	0.3



TAB. 6.3 – *Evaluation du relief guyanais obtenu par radarclinométrie et à partir des données ERS-1, par rapport aux courbes de niveau extraites d'une carte IGN. Pour chaque niveau, calcul des mesures statistiques des altitudes du modèle restitué. En haut : présentation sous la forme de tableau des mesures statistiques. En bas : représentation graphique de certaines mesures statistiques de la carte d'altitude restituée en fonction de l'altitude de chaque courbe de niveau ; la droite figurant dans ce schéma indique la juste correspondance entre les deux modèles (référence et estimé) qu'il aurait été souhaité d'obtenir lors de cette évaluation.*

Ce problème de reconstruction de MNT est donc abordé comme un problème classique de régularisation, nécessitant cependant une initialisation couramment réalisée par une interpolation.

- *La méthode du laplacien nul*: le laplacien [ROSE-82] [SCHA-89] d'une surface d'équation :

$$z = f(x, y)$$

est défini comme étant la somme des dérivées secondes, noté Δf avec :

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

Considérer ce laplacien nul, c'est en fait réaliser une approximation de la surface par une surface très régulière. Dans notre cas de reconstruction, seules les altitudes des points appartenant aux courbes de niveau sont connues. Un schéma itératif permet de déterminer l'altitude des points en dehors de ces courbes de niveau. Chaque itération consiste à visiter tous ces points, et à leur affecter l'altitude moyenne de ses quatre plus proches voisins. Ce schéma converge très lentement. Le modèle approché du relief est obtenu lorsque l'altitude de chaque point est égale à l'altitude moyenne de ses quatre voisins. Nous avons testé cette méthode. Visuellement, elle semble satisfaisante, mais elle présente certains défauts au niveau des fonds de vallée et des sommets qui sont reconstruits tels des surfaces plates, et également sur les lignes de crête qui paraissent assez peu réalistes par leur forme d'escalier arrondi. C'est la méthode la plus simple à mettre en oeuvre.

- *La méthode d'interpolation polynomiale*: dans cette méthode, la surface du relief est décrite par un polynôme de degré n , le long de droite d'orientation ϑ très diverse, telle que :

$$z(x, y) = f_n^{\vartheta}((x_1, y_1, z_1), \dots, (x_p, y_p, z_p)) r^n(x, y) + \\ \vdots \\ f_1^{\vartheta}((x_1, y_1, z_1), \dots, (x_p, y_p, z_p)) r(x, y) + \\ f_0^{\vartheta}((x_1, y_1, z_1), \dots, (x_p, y_p, z_p))$$

avec $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ les positions dans le plan (XOY) des points du relief appartenant à la droite du plan (XOY) d'orientation ϑ , et z_1, \dots, z_n leurs altitudes respectives.

Comme seuls les points appartenant aux courbes de niveau sont entièrement connus (position dans le plan (XOY) , et altitude), les coefficients des polynômes seront déterminés par ces points. Il reste à savoir comment utiliser cette méthode, et quel degré devons-nous utiliser pour ces polynômes.

En ce qui concerne le fonctionnement de cette méthode, prenons un point d'altitude inconnue. Par ce point, il passe une infinité de droites, mais du

fait de la discrétisation d'une image, nous n'en utiliserons qu'un nombre fini. Chacune de ces droites est alors considérée successivement et indépendamment des autres. Pour une droite donnée, on recherche, tout d'abord, tous les points des courbes de niveau se projetant sur celle-ci en l'intersectant. Une partie de ces points, dont le nombre dépend du degré utilisé pour le polynôme, sert à déterminer le point d'altitude inconnue, c'est-à-dire à estimer les coefficients du polynôme par une minimisation aux moindres carrés. A la suite à cette estimation, il est possible d'évaluer l'altitude du point considéré.

Ce processus est réalisé pour un grand nombre de droites en chaque point du relief où l'altitude est inconnue, nous obtenons ainsi tout un jeu de valeurs possibles pour son altitude. Pour en déduire l'altitude finale, la moyenne de ces valeurs peut être considérée, tout comme la médiane, ou une moyenne pondérée par l'inverse de la distance du point à la plus proche courbe de niveau.

En ce qui concerne le degré des polynômes, procédons étape par étape, en augmentant progressivement ce degré :

- ▷ au degré = 1 : les polynômes sont alors des droites dans l'espace à 3 dimensions. La détermination de leurs coefficients demande donc uniquement la connaissance de deux points. Choisir ce degré, c'est considérer que la surface du relief ne vérifie pas la condition de continuité de sa dérivée première. Ceci n'est donc pas très réaliste, et ce degré ne peut être retenu.
- ▷ au degré = 2 : contrairement au degré précédent, la condition de continuité de la dérivée première est ici vérifiée. La détermination des coefficients du polynôme peut être réalisée à partir de la connaissance de trois points, posant alors un problème d'encadrement non symétrique. De ce fait, ce degré pour les polynômes n'a donc pas été retenu.
- ▷ au degré = 3 : quatre points sont alors nécessaires pour déterminer entièrement les coefficients du polynôme. Il est alors possible d'encadrer symétriquement¹ les points à estimer. Considérer un degré plus élevé n'apporterait pas grande amélioration au niveau du relief et compliquerait un peu plus la détermination des coefficients polynomiaux. De ce fait, le degré 3 pour les polynômes a été retenu. La figure (Fig 6.16) illustre la méthode d'interpolation par de tels polynômes.

Tout comme pour la méthode du laplacien nul, les résultats de cette méthode d'interpolation sont également satisfaisants. Certains défauts apparaissent au niveau des thalwegs estimés, donnant un aspect d'escalier dont les angles sont arrondis. Cependant, cette méthode offre l'avantage de reconstruire les fonds des vallées et les sommets des montagnes de manière bien plus réaliste, par des formes arrondies respectivement convexes et concaves.

1. abus de langage : par ce mot, il faut comprendre : même nombre de données de référence, c'est à dire 2, de part et d'autres du point d'altitude inconnue

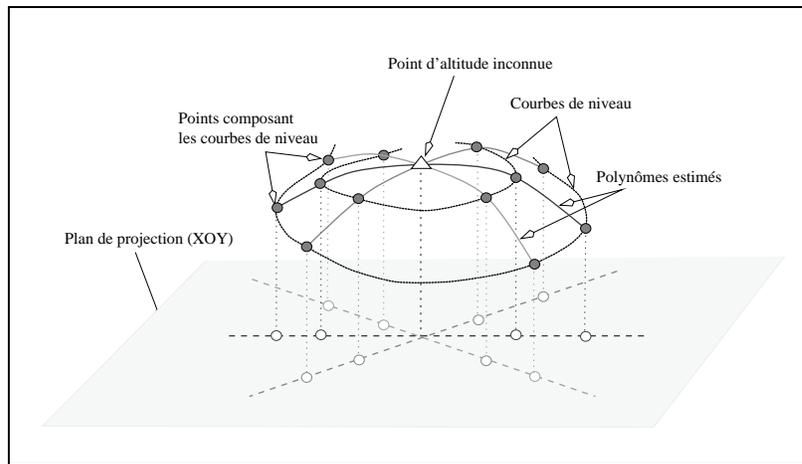


FIG. 6.16 – *Illustration de la méthode d'interpolation polynomiale de degré 3, pour la détermination de l'altitude des points du relief se situant en dehors des courbes de niveau*

L'inconvénient majeur de ces trois méthodes est qu'elles sont onéreuses en temps de calcul. Pour pallier cet inconvénient tout en conservant une bonne qualité de reconstruction, nous avons choisi de reconstruire le relief par application de deux méthodes successives. La première est proche de celle du laplacien nul. Nous l'avons réalisée différemment de ce qui a été exposé précédemment, selon un processus itératif de recherche de courbes de niveau d'altitudes intermédiaires. Pour chaque pixel d'altitude inconnue, on leur affecte tout d'abord la valeur d'altitude de la courbe de niveau la plus proche. De l'image ainsi formée, on recherche chaque transition d'altitude. La moyenne d'altitude de part et d'autre de cette transition est alors affectée au pixel transitif, les autres pixels étant alors remis à une valeur de fond. Puis, on réitère ce processus tant que des transitions sont trouvées.

Comme nous l'avons précisé précédemment, ce procédé ne permet pas de reconstruire le fond des vallées et le sommet des montagnes de manière réaliste. Pour ces deux structures du relief, nous avons choisi de les restituer selon la méthode polynomiale de degré 3 telle que nous l'avons décrite précédemment. La figure (Fig 6.17) illustre le relief reconstruit par ce procédé à partir de l'image des courbes de niveau représentée par la figure (Fig 6.14).

Problème d'échelle :

Pour cette évaluation, il apparaît encore une fois, un problème d'échelle. La résolution du MNT généré est de 6.8 mètres, résolution bien plus fine que les reliefs à évaluer. Pour éviter toute modification des données restituées, nous avons choisi de diminuer la résolution des données de référence par une simple interpolation.

Problème de géométrie :

La géométrie de représentation est également un problème pour cette évaluation. Le MNT généré est en géométrie plane, alors que les reliefs restitués par radarcli-

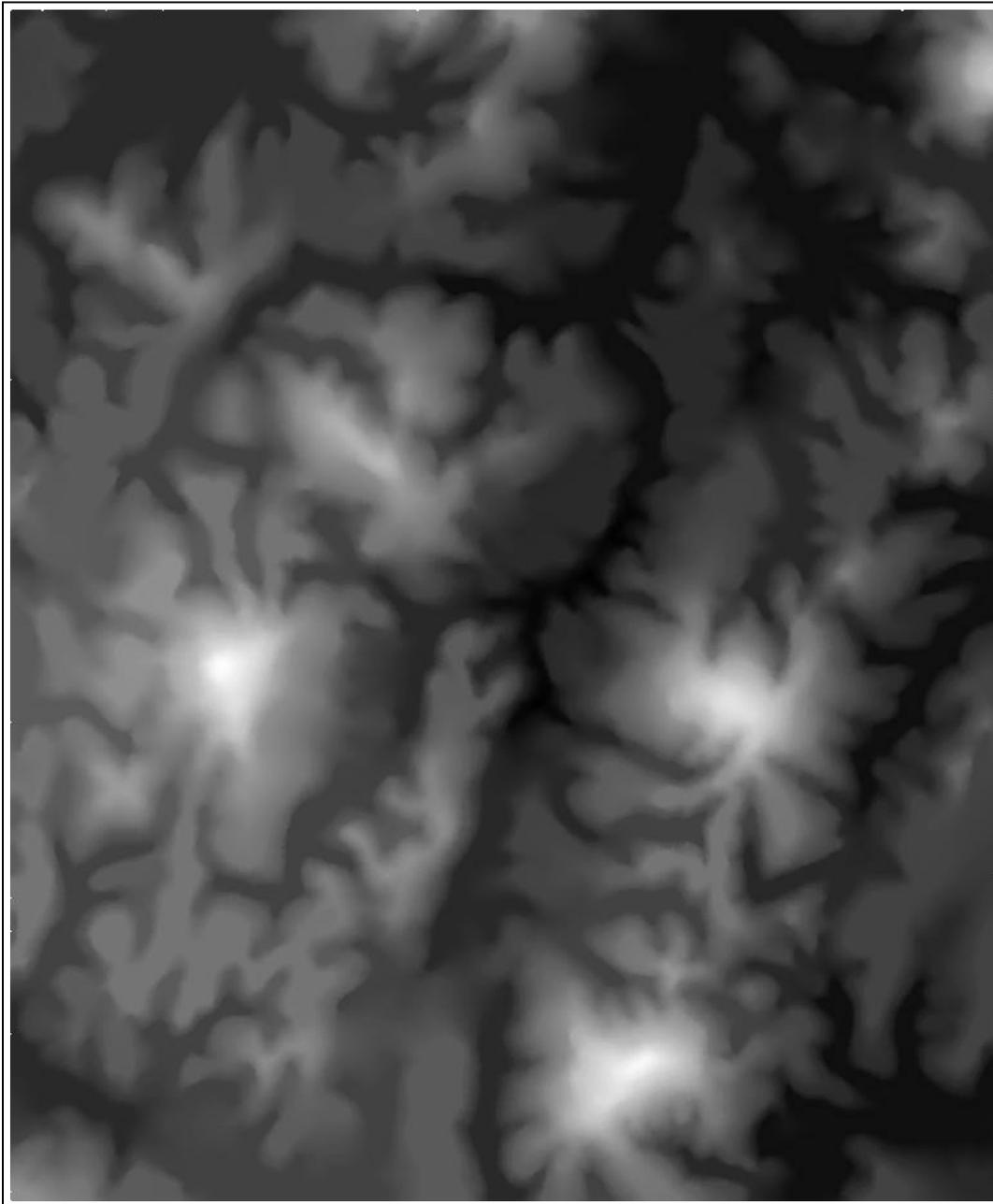


FIG. 6.17 – MNT généré à partir des courbes de niveau (Fig 6.14) extraites de la carte IGN (Fig 6.13).

nométrie sont en géométrie radar. Afin de ne rendre compte que de l'erreur sur les altitudes, il est alors préférable de projeter en géométrie radar les données de référence, avec un angle d'incidence approprié.

Evaluation :

Comme précédemment, nous établissons l'histogramme des différences d'altitude entre le MNT engendré par interpolation des courbes de niveau (Fig 6.17), et chacun des reliefs obtenus par notre procédé (Fig 6.2), puis nous estimons les mesures statistiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart type. Ces mesures sont présentées dans le tableau (Tab 6.4). Notons que cette évaluation met en oeuvre tous les pixels de la reconstruction. De ce fait, elle semble moins sensible aux effets de recalage et de généralisation, et elle est donc à ce titre plus significative que les précédentes. Par ces mesures, on ne fait que confirmer la nette surestimation des altitudes restituées par notre procédé, et ceci quel que soit le système radar employé. Mais, on met également et plus clairement, en évidence l'intérêt d'un angle d'incidence faible (avec le système d'acquisition RADARSAT), ainsi que l'intérêt de ERS-1 sur JERS-1.

Système	min	max	moy	ect
ERS-1 (23°)	-97	99	-8.1	27.2
JERS-1 (35°)	-124	120	-19.3	32.6
RADARSAT (25°)	-109	120	0.0	25.37
RADARSAT (32°)	-103	99	-2.2	27.9
RADARSAT (45°)	-181	54	-44.2	31.6

TAB. 6.4 – *Mesures statistiques des différences d'altitude avec prise en compte du signe, entre les modèles restitués par radarclinométrie et le MNT de référence (Fig 6.17) généré à partir des courbes de niveau. Ces mesures indiquent une surestimation des altitudes restituées par notre méthode.*

6.3 Conclusion

Par les diverses évaluations réalisées tout au long de ce chapitre, nous avons constaté que les comparaisons entre reconstructions par des capteurs différents ainsi que les comparaisons avec des données cartographiques annexes mettent en évidence d'importantes erreurs sur les mesures altimétriques. Ceci nous conforte donc dans notre opinion que, si elle est utilisée seule, sans points de contrôle au sol, comme nous l'avons fait jusqu'ici, la radarclinométrie doit être tenue dans un rôle de reconstruction rapide, simple et qualitative, mais qu'elle ne permet pas d'espérer des mesures quantitatives fiables. Elle fournit un aspect du MNT, riche en détails fins qui expriment assez bien les évolutions locales du paysage [POLI-95a] : présence de pentes et de thalwegs, position des lignes de crêtes et des fonds de vallées, etc. La radarclinométrie pourra aussi être très précieuse pour préciser des profils de terrains entre des points connus.

Notre expérimentation à l'aide de capteurs divers a été trop réduite et insuffisamment systématique pour autoriser des conclusions définitives. Ainsi nous ne saurons conclure sur le rôle de la longueur d'onde (différences entre ERS-1 et JERS-1) ou sur la polarisation (différence entre ERS-1 et RADARSAT), deux facteurs dont nous sentons qu'ils ont pourtant un rôle important dans la formation de l'image. Nous avons un embryon de réponse concernant l'angle d'incidence à travers les 3 scènes de RADARSAT. La décroissance de la qualité avec la croissance de θ semble être vérifiée. Elle pourrait provenir de ce qui nous semble être l'augmentation du speckle dans l'image, la contribution du relief étant en conséquence de plus en plus faible.

Pour finir, à notre connaissance, aucune méthode ne permet de reconstruire des modèles de relief parfaits. Que ce soit la radargrammétrie ou l'interférométrie (les deux autres méthodes de restitution utilisant des données radar), chacune présentent tout comme la radarclinométrie des défauts numériques et géométriques [POLI-91a] [POLI-95b]. Malgré ces défauts, Ces trois méthodes donnent accès à des informations très diverses, et plus ou moins précises, sur le terrain imagé, qui sont fort utiles à certaines thématiques. On pourrait envisager l'utilisation conjointe de ces trois méthodes par fusion [TANN-96].

Chapitre 7

Retour sur Quelques Hypothèses

Nous revenons dans ce chapitre sur des hypothèses faites dès les premières lignes de ce manuscrit et qui n'ont pas encore été abordées. Tout d'abord nous nous intéressons à la détermination de la constante inconnue I_o , dite intensité de sol plat. Puis, nous traitons de l'hypothèse de sol homogène.

7.1 Radiométrie de sol plat

Dans cette partie, on se place dans le cas le plus simple d'un terrain dont le couvert végétal est uniforme et homogène. Une seule valeur pour la radiométrie d'un sol de référence, le sol de déclivité nulle, est à rechercher. Comme détaillé au cours du chapitre 4, cette valeur a une grande importance, car elle permet la réduction du nombre d'inconnues dans l'expression de l'intensité rétrodiffusée (Eq 4.6). Son expression, donnée par l'équation 4.8, indique sa dépendance suivant trois paramètres :

- K_s correspondant aux divers paramètres d'acquisition du système SAR,
- σ_o coefficient de rétrodiffusion lié à la nature du couvert végétal du terrain,
- θ l'angle d'incidence du faisceau d'ondes électromagnétiques.

La valeur de l'angle d'incidence étant connue pour chaque pixel de l'image radar, il reste donc, uniquement à déterminer la valeur des deux autres paramètres K_s et σ_o . En fait, nous ne pouvons distinguer les deux termes, et nous nous intéressons au terme noté $I_{r_{solplat}}$ de l'équation 4.8 :

$$I_{r_{solplat}} = K_s \sigma_o R_d R_a \cos^2 \theta$$

Pour déterminer cette radiométrie, plusieurs méthodes s'offrent à nous :

- une calibration du radar à partir des paramètres donnés par le constructeur, des paramètres de vol accompagnant chaque image, des caractéristiques mé-

téorologiques propres à chaque instant d'observation. Mais, elle serait certainement très complexe et peu fiable compte tenu des difficultés de regrouper tous ces éléments dans un modèle unique parfaitement connu. Nous ne l'avons pas tentée.

- Une calibration manuelle à partir de zones d'apprentissage désignées par un expert. Cette méthode simple et probablement robuste sera abordée au paragraphe 7.1.2. Outre, ses qualités évidentes dans un schéma opérationnel en raison même de son caractère supervisé, elle représente pour nous l'avantage de recouper les méthodes automatiques et de fournir une bonne vérification expérimentale des hypothèses de base (en particulier la constance du couvert végétal).
- Des méthodes de détermination automatique à partir de modèles géomorphologiques suffisamment simples pour être généraux. Ces déterminations pourront être directes ou itératives, et conduiront à la détermination d'un paramètre dont la validité ne sera assurée que par reconstruction du relief et contrôle par un observateur. Ces méthodes sont détaillées au paragraphe 7.1.1.

7.1.1 Considérations statistiques

Hypothèse de sol majoritairement plan

Dans cette approche on conjecture que le sol est majoritairement plan autour de la zone d'intérêt et que la radiométrie du sol plan peut donc être déterminée à partir d'une analyse statistique des radiométries.

Qu'entendons nous par majoritairement plan ?

- Si l'on suppose que la plupart des parcelles sont horizontales, c'est le mode de la distribution des radiométries qui désignera le sol plan :

$$I_o^1 = \text{Argmax}(P(I))$$

où $P(I)$ représente la distribution de l'intensité.

- Si l'on suppose qu'il y a autant de parcelles orientées dans une direction plus favorable que le sol plan (donc basculées en direction du satellite) que de parcelles moins favorables (donc basculées en direction opposée), ce sera la médiane de la loi :

$$I_o^2 = \text{med}(P(I))$$

Mais, les radiométries sont bruitées par un bruit de speckle important et l'on peut concevoir qu'il conviendra de faire des mesures après filtrage de l'image, soit par

un filtre de speckle, soit par un filtrage moyenné augmentant le nombre de looks équivalent (filtres décrits au chapitre 3).

Nous avons procédé à diverses expériences selon cette ligne, sans succès. Les valeurs ainsi estimées fournissaient des résultats tantôt surestimés (traduits par un basculement du relief en direction de l'Est), tantôt sous-estimés (traduits par un basculement du relief en direction de l'Ouest).

A titre d'illustration, nous présentons sur le tableau (Tab 7.1) les valeurs de I_o^1 et de I_o^2 , sur l'image (Fig 7.1) l'historgramme des radiométries observées, et sur l'image (Fig 7.2) un exemple de reconstruction mettant en évidence les défauts.

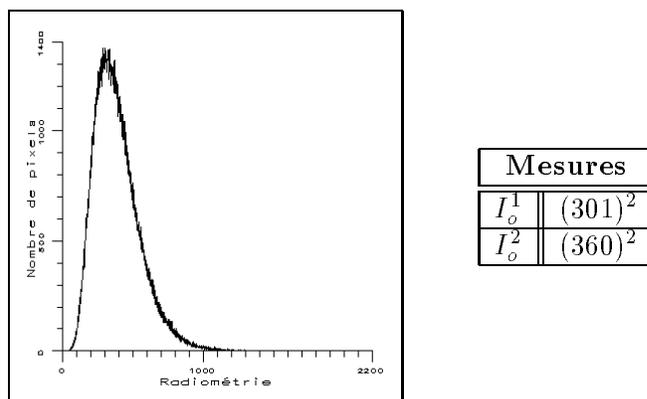


FIG. 7.1 – Histogramme des radiométries observées sur l'image radar d'une région de la Guyane (montagne Marie-Hilaire); ces radiométries sont des termes d'amplitude.

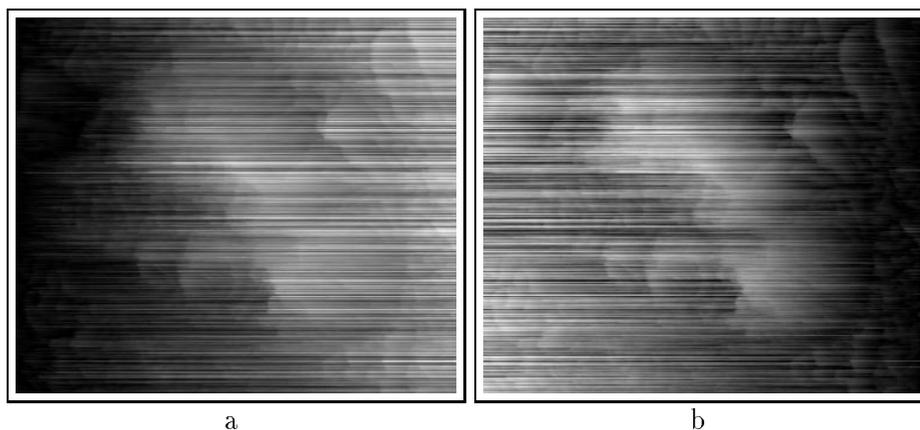


FIG. 7.2 – Mise en évidence de l'effet de basculement sur le relief suite à une reconstruction par simple intégration en ligne. En a: l'intensité du sol plat considéré est trop faible ($I_o = (400)^2$), et en b: cas inverse au précédent: l'intensité du sol plat est ici trop forte ($I_o = (450)^2$).

7.1.2 Considérations analytiques

Reprenons une des hypothèses de sol majoritairement plan, et montrons que les résultats obtenus étaient en fait prévisibles. Si l'on reprend l'étude de la géométrie d'une image radar (chapitre 3), on constate que l'acquisition par un capteur SAR provoque des distorsions géométriques, et plus particulièrement une compression des surfaces orientées face radar, et une dilatation des surfaces orientées face opposées au radar. Ce phénomène est directement visible sur l'image radar. On remarque effectivement que le nombre de pixels de forte intensité, relative aux surfaces du relief orientées face au capteur, est largement inférieur au nombre de pixels de faible intensité, relative aux surfaces orientées face opposée au radar. Or, en estimant la radiométrie du sol plat par la médiane de la loi I_o^2 , c'est rendre égal ce nombre de pixels de forte intensité à celui de faible intensité, et donc faire abstraction de la structure réelle d'une image radar. Cette hypothèse sous-estime la valeur radiométrique du sol plat; elle n'est donc pas valable pour ce type de système imageur.

Hypothèse

Reprenons l'équation de base (Eq 4.6). Supposons que l'on fasse une erreur δI_o sur la radiométrie du sol plat I_o . Quelle est la conséquence sur l'altitude H ? En reprenant l'expression (Eq 4.15) et en remplaçant le terme α par le couple $(I_{i,j}, I_o)$, variables bien plus utiles à notre étude, cette altitude $H_{i,j}$, pour un pixel (i,j) donné, a pour expression complète :

$$H_{i,j}(I_{i,j}, I_o) = h_{i,j}(I_{i,j}, I_o) - \min_l \{h_{i,l}(I_{i,l}, I_o)\}, \quad l = 0, \dots, (np - 1) \quad (7.1)$$

np étant le nombre total de pixels en ligne de l'image traitée.

L'expression $\min \{h_{i,l}(I_{i,l}, I_o)\}$ étant un simple terme correctif de translation, nous nous intéresserons donc uniquement à l'altitude $h_{i,j}$. A partir des équations (Eq 4.10), (Eq 4.12), (Eq 4.13) et (Eq 4.14), son expression est :

$$h_{i,j}(I_{i,j}, I_o) = \sum_{k=0}^j R_d \sin \theta \frac{\sin \alpha(I_{i,k}, I_o)}{\sin(\theta - \alpha(I_{i,k}, I_o))} \quad (7.2)$$

avec

$$\alpha(I_{i,k}, I_o) = \theta - \arcsin(\mathbf{f}(I_{i,k}, I_o))$$

et

$$\mathbf{f}(I_{i,k}, I_o) = -\frac{1}{2} \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} \frac{I_{i,k}}{I_o} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} \frac{I_{i,k}}{I_o}\right)^2 + 4}$$

Cette expression vérifie les propriétés suivantes :

1. si $I_{i,k} = I_o$, alors $\mathbf{f}(I_{i,k}, I_o) = \sin \theta$,

	I_o	moy_h	max_h	σ_h	apparence visuelle
Image radar non filtrée	$(301)^2$	1455.8	3820	858.4	relief très fortement basculé (I_o sous-estimée)
	$(360)^2$	588.6	1806	360.3	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
Image filtrée (moyenne 3x3)	$(358)^2$	610.7	1858	372.7	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
	$(378)^2$	397.5	1356	253.2	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
Image filtrée (moyenne 5x5)	$(373)^2$	454.0	1491	284.6	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
	$(391)^2$	294.9	1106	196.5	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
Image filtrée (moyenne 11x11)	$(395)^2$	256.5	1009	175.5	relief basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
	$(405)^2$	195.2	845	141.1	relief basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
Image filtrée (Kuan)	$(63)^2$	\	\	\	relief très fortement basculé (I_o largement sous-estimée)
	$(68)^2$	\	\	\	relief très fortement basculé (I_o largement sous-estimée)
Image filtrée (Wu Maître moy)	$(375)^2$	425.3	1422	268.6	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
	$(375)^2$	425.3	1422	268.6	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
Image filtrée (Wu Maître Kuan)	$(360)^2$	588.6	1806.0	360.3	relief fortement basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)
	$(374)^2$	234.8	952.0	163.7	relief basculé vers la gauche (I_o sous-estimée)

TAB. 7.1 – *Evaluation selon des critères visuels et statistiques, des cartes d'altitude restituées à partir de l'image radar d'une région de la Guyane (montagne Marie-Hilaire extraite de (Fig 4.1)), pour diverses valeurs de sol plat I_o (I_o^1 valeur maximale et I_o^2 médiane de la distribution en intensité).*

2. pour $I_o \neq 0$ et $I_{i,k} \in [0, \infty[$, alors $0 \leq \mathbf{f}(I_{i,k}, I_o) \leq 1$,
avec $\lim_{I_{i,k} \rightarrow 0} \mathbf{f}(I_{i,k}, I_o) = 1$
et $\lim_{I_{i,k} \rightarrow \infty} \mathbf{f}(I_{i,k}, I_o) = 0$.

Pour rendre compte de l'effet d'une estimation biaisée de la radiométrie du sol plat sur l'altitude h , nous procédons à son calcul pour $I_o + \delta I_o$, en considérant que :

$$\delta I_o \ll I_o$$

On a donc :

$$h_{i,j}(I_{i,j}, I_o + \delta I_o) = R_d \sin \theta \sum_{k=0}^j \frac{\sin(\alpha(I_{i,k}, I_o + \delta I_o))}{\mathbf{f}(I_{i,k}, I_o + \delta I_o)}$$

Le développement limité de \mathbf{f} par rapport à $\delta I_o/I_o$, en ne conservant que les termes d'ordre inférieur ou égal à 1, donne :

$$\mathbf{f}(I_{i,j}, I_o + \delta I_o) = \mathbf{f}(I_{i,j}, I_o) + M_{i,j} \mathbf{f}(I_{i,j}, I_o) \frac{\delta I_o}{I_o}$$

en posant

$$M_{i,j} = \frac{\left(\frac{\cos^2 \theta I_{i,j}}{\sin \theta I_o} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\cos^2 \theta I_{i,j}}{\sin \theta I_o} \right)^2 + 4}}$$

De la même manière, on procède au développement limité de $\sin(\alpha)$ par rapport à $\delta I_o/I_o$. Son expression est :

$$\sin(\alpha(I_{i,j}, I_o + \delta I_o)) = \sin \theta \sqrt{1 - \mathbf{f}^2(I_{i,j}, I_o + \delta I_o)} - \cos \theta \mathbf{f}(I_{i,j}, I_o + \delta I_o)$$

$$\sin(\alpha(I_{i,j}, I_o + \delta I_o)) = \sin(\alpha(I_{i,j}, I_o)) - \cos(\alpha(I_{i,j}, I_o)) \frac{\mathbf{f}(I_{i,j}, I_o) M_{i,j}}{\sqrt{1 - \mathbf{f}^2(I_{i,j}, I_o)}} \frac{\delta I_o}{I_o}$$

A partir de ces deux développements limités, on établit ainsi une expression approchée de l'altitude h ; rappelons que cette altitude est issue de la simple intégration des δh (différence d'altitude en chaque pixel), ce qui implique que sa valeur est signée.

$$h_{i,j}(I_{i,j}, I_o + \delta I_o) = h_{i,j}(I_{i,j}, I_o) - \frac{\delta I_o}{I_o} R_d \sin^2 \theta \sum_{k=0}^j \psi(I_{i,k}, I_o) \quad (7.3)$$

avec

$$\psi(I_{i,j}, I_o) = \frac{M_{i,j}}{\mathbf{f}(I_{i,j}, I_o) \sqrt{1 - \mathbf{f}^2(I_{i,j}, I_o)}} \quad (7.4)$$

De ces deux expressions et, compte tenu de la positivité de $M_{i,k}$ et des valeurs de f (comprises entre 0 et 1), on constate comme attendu l'apparition de défauts locaux tels que :

- si $\delta I_o > 0$, correspondant à une surestimation de la radiométrie du sol plat, alors :

$$h_{i,j}(I_{i,j}, I_o + \delta I_o) < h_{i,j}(I_{i,j}, I_o),$$

- si $\delta I_o < 0$, correspondant à une sous-estimation de la radiométrie du sol plat, alors :

$$h_{i,j}(I_{i,j}, I_o + \delta I_o) > h_{i,j}(I_{i,j}, I_o).$$

Ces deux constatations suffisent pour mettre en évidence l'existence du défaut de basculement dans la totalité du relief restitué, puisque, pour j croissant, h est calculé par intégration de termes soit tous positifs, soit tous négatifs, mais en nombre croissant.

Etudions le comportement du terme ψ (Eq 7.4). Pour diverses valeurs de θ , son évolution en fonction de l'intensité I est représentée sur la figure (Fig 7.3). Nous en déduisons qu'une très bonne approximation est donnée par :

$$\widehat{\psi}(I_{i,j}, I_o) = c_1(I_o) I_{i,j} + c_0(I_o) \quad (7.5)$$

avec

$$\begin{cases} c_0 & = & -0.05 \\ c_1 & = & 0.000012 \end{cases}$$

pour le système radar ERS-1, soit un angle d'incidence θ de 23° .

Cette approximation (Eq 7.5) de ψ va ainsi permettre d'évaluer l'importance du défaut de basculement dans le relief restitué dû à une estimation biaisée de la radiométrie du sol plat I_o .

7.1.3 Evaluation du basculement

Si nous considérons que, le long de la ligne d'intégration qui a conduit à la détermination de $h_{i,j}$, les intensités rencontrées $I_{i,k}$, avec $k = 0, \dots, j$, sont réparties selon la loi $P(I)$, nous pouvons évaluer la probabilité de l'erreur δh commise en utilisant $I_o + \delta I_o$ au lieu de I_o :

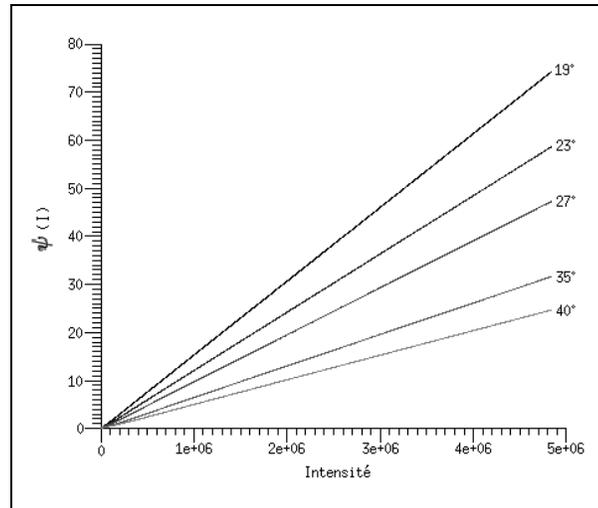


FIG. 7.3 – Exemple du comportement de la fonction $\psi(I)$ en considérant l'intensité du sol plat égale à 423^2 , et pour différentes valeurs d'angle d'incidence θ .

$$\delta h_j = h(I_j, I_o + \delta I_o) - h(I_j, I_o)$$

$$\delta h_j = -\frac{\delta I_o}{I_o} R_d \sin^2 \theta \sum_{k=0}^j \psi(I_k, I_o)$$

$$P(\delta h_j) = -\frac{\delta I_o}{I_o} R_d \sin^2 \theta \sum_{k=0}^j \psi(I_k, I_o) P(I_k)$$

et l'espérance mathématique de δh_j peut être évaluée à :

$$\langle \delta h_j \rangle = -\frac{\delta I_o}{I_o} R_d \sin^2 \theta j \int_{I=0}^{\infty} \psi(I, I_o) P(I) dI$$

Cette erreur étant linéaire en j correspond à un basculement du terrain d'angle $\bar{\omega}$ avec :

$$\tan \bar{\omega} = \frac{\langle \delta h_j \rangle}{R_d j} = -\frac{\delta I_o}{I_o} \sin^2 \theta \int \psi(I, I_o) P(I) dI \quad (7.6)$$

Dans le cas d'une loi de Rayleigh, $P(I)$ se met sous la forme :

$$P(I) = \frac{1}{2\alpha^2} \exp\left(-\frac{I}{2\alpha^2}\right)$$

L'intégrale ne peut se calculer explicitement, mais en utilisant l'approximation (Eq 7.5) de la formule (Eq 7.4). En considérant que le domaine de l'intensité d'une image radar est tel que l'intensité minimale soit 0, et l'intensité maximale tende vers ∞ , nous obtenons alors :

$$\tan \bar{\omega} = -\frac{\delta I_o}{I_o} \sin^2 \theta [2\alpha^2 c_1(I_o) + c_o(I_o)]$$

Dans le cas de l'utilisation du système radar ERS-1 et avec $2\alpha^2 = \mu = (418)^2$, nous voyons qu'une erreur de $(\delta I_o/I_o)$ de 10% induit un basculement de -1.8° , donc, pour une image de 1024 pixels de large une erreur d'altitude en bord d'image de plus de -400 mètres.

Nous allons tirer profit de cette sensibilité de la technique de développement à une erreur sur I_o pour déterminer indirectement cette valeur.

Repartons de l'équation complète 7.1. L'altitude y est définie non négative. L'introduction du terme 7.3 dû à l'erreur d'estimation de I_o est non stationnaire. Les statistiques de moyenne, maximum ou écart quadratique de l'altitude h divergeront sur des zones supposées infinies dès que δI_o sera non nul. Elles auront au contraire des valeurs bornées (celles caractéristiques du terrain) pour la bonne valeur de I_o . Nous utiliserons cette propriété de la façon suivante. Comme il n'est pas raisonnable d'espérer détecter la divergence des statistiques mesurées, pour un nombre de pixels de plus en plus grands, nous rechercherons, pour divers I_o , les valeurs minimales de ces estimations.

Afin de tester cette idée, nous avons tracé sur la figure (Fig 7.4) l'évolution de ces trois statistiques pour un paysage donné : *la Montagne Marie-Hilaire*. Nous constatons effectivement que pour des valeurs sensiblement égales (sauf pour l'altitude maximale qui, comme on pouvait s'y attendre est plus sensible au bruit de speckle), ces courbes passent par un minimum. Nous vérifions également que, pour cette valeur minimum, l'image reconstruite ne présente plus de basculement (Fig 7.5).

Nous choisissons donc de contrôler par l'évolution de la valeur moyenne $\langle h_{i,j} \rangle$ la valeur de I_o , suivant le schéma présenté en 7.6. La valeur initiale du pas δI_o de la figure (Fig 7.6) peut être déduite de l'inversion de l'équation 7.6 si l'on dispose d'une première estimation de l'angle de basculement du terrain, ou ce qui revient au même, d'une erreur d'altitude relative entre des points situés sur des bords opposés de l'image.

7.1.4 Démarche expérimentale

Délimitation manuelle

On désigne manuellement des zones de déclivité nulle, de façon à rendre compte de l'existence d'une éventuelle relation entre la valeur I_o déterminée précédemment et l'une des mesures statistiques de ces zones. Cette extraction est assez délicate, au sens où certaines régions de l'image vérifiant la condition de déclivité nulle sont

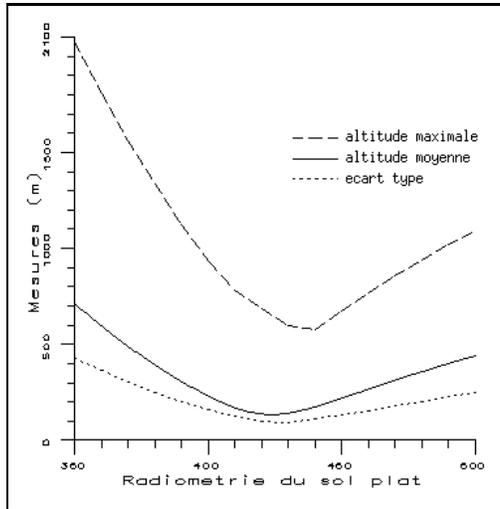


FIG. 7.4 – Evolution des mesures statistiques (maximum, moyenne, et écart type) de la carte d'altitude restituée par simple intégration, en fonction de l'intensité considérée pour le sol plat.

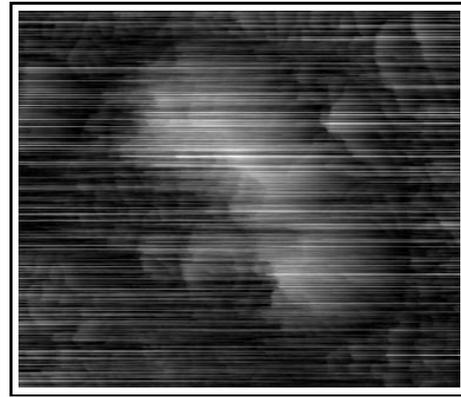


FIG. 7.5 – Relief résultant de la restitution par simple intégration, pour une intensité de sol plat (423^2) rendant son altitude moyenne minimale. Cette carte d'altitude de la montagne Marie-Hilare en Guyane ne présente aucun basculement apparent.

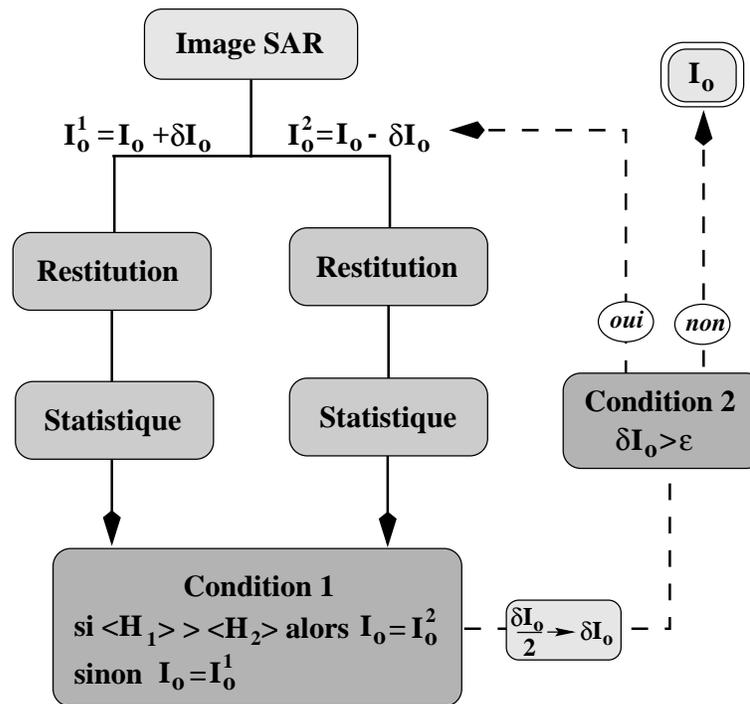


FIG. 7.6 – Chaîne de traitement pour la détermination de l'intensité du sol plat.

difficilement repérables et exploitables. C'est par exemple le cas des crêtes de montagnes. De ce fait, l'extraction est réalisée uniquement dans des zones vastes telles que les vallées ou plateaux. La figure (Fig 7.7) illustre la position des zones délimitées dans l'image ERS-1 de la montagne guyanaise *Marie-Hilaire*, ainsi que leur contenu respectif par la figure (Fig 7.8) et certaines caractéristiques propres à chacune d'elles.

A partir de ces zones délimitées, on estime les mesures statistiques usuelles, en amplitude et en intensité (Tab 7.2). A la vue de celles-ci, nous remarquons tout d'abord que le domaine radiométrique de chaque zone, par le minimum et le maximum, est assez vaste, et de ce fait, indicatif de l'effet du speckle permettant d'importantes variations radiométriques intra-zone. Parmi les trois autres mesures statistiques estimées : la moyenne en amplitude et en intensité, et la médiane, une seule correspond bien à la valeur obtenue par la précédente méthode (Fig 7.9). Il s'agit de la moyenne en intensité. Mais, tout comme les deux autres, cette mesure présente d'importantes variations d'une zone à l'autre. Cette instabilité demande donc à vérifier si la taille des zones est suffisamment grande pour l'estimation de cette mesure [GOU1-96b].

Zone	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Moy_A</i>	<i>Med</i>	<i>Moy_I^{1/2}</i>
1	92	967	405.3	395	428.2
2	105	949	411.2	400	432.6
3	71	868	382.0	372	402.2
4	98	1018	412.8	395	435.6
5	118	869	419.4	409	442.9
6	64	1079	428.8	419	451.9
7	88	877	395.7	378	415.5
8	65	856	392.8	373	417.3
9	78	919	411.1	405	432.2
10	89	886	406.5	396	425.9
11	107	943	415.8	411	438.4

TAB. 7.2 – Mesures statistiques des zones délimitées.

Déterminons la dimension minimale de l'échantillon pour le calcul de cette mesure statistique [LAUR-89], permettant de construire un intervalle de confiance donné. Pour cela, considérons que tous les échantillons possibles de dimension N pixels parmi une population infinie de pixels soient distribués suivant la loi de Rayleigh. La moyenne pour chaque échantillon, que l'on notera μ , suit une loi gaussienne, de variance [KEND-52] :

$$\text{var}(\mu) = \frac{\mu_2}{N} \quad (7.7)$$

avec μ_2 le moment d'ordre 2 centré autour de la moyenne, et tel que :

$$\mu_2 = \langle X^2 \rangle - \mu^2 \quad (7.8)$$

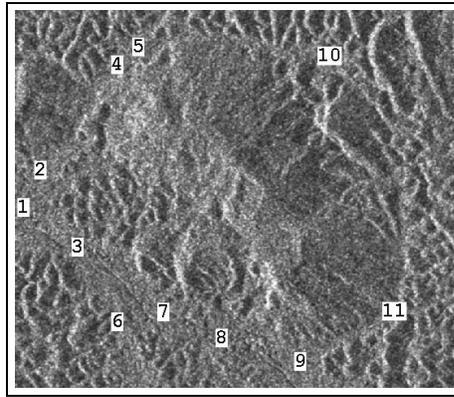


FIG. 7.7 – Position des zones de déclivité nulle délimitées par photo-interprétation dans l'image radar ERS-1 d'une région de la Guyane (montagne Marie-Hilaire).

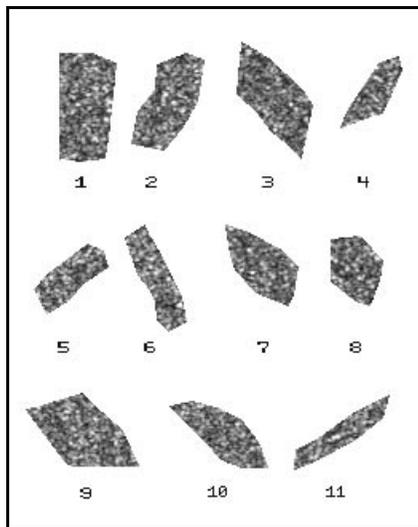


FIG. 7.8 – Contenu des zones.

Numéro	Position	Angle	Nb.pixels
1	20	21.94	2163
2	47	21.97	1677
3	117	22.03	1792
4	166	22.07	769
5	176	22.08	953
6	202	22.11	1121
7	267	22.16	1326
8	352	22.24	1071
9	484	22.36	1954
10	527	22.40	1280
11	630	22.49	858

Caractéristiques des zones

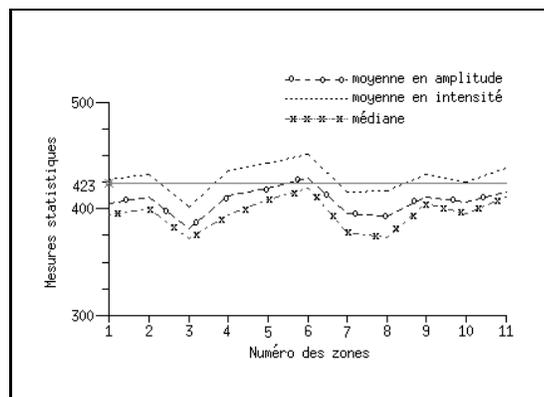


FIG. 7.9 – Représentation des mesures statistiques de chaque zone délimitée (moyenne en amplitude et en intensité, et médiane).

Pour la distribution de Rayleigh, $\langle X^r \rangle$ se met sous la forme :

$$\langle X^r \rangle = \alpha^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{2}\right) \quad (7.9)$$

avec α le paramètre d'échelle de la distribution de Rayleigh, et Γ la fonction Gamma.

En considérant les relations (Eq 7.8) et (Eq 7.9), la variance de la moyenne s'écrit :

$$\text{var}(\mu) = \frac{\mu^2}{N} \left[\frac{1}{\Gamma^2(3/2)} - 1 \right]$$

L'intervalle de confiance de la moyenne estimée \mathcal{M} est alors donné par :

$$\mu - a\mu \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{1}{\Gamma^2(3/2)} - 1 \right]} < \mathcal{M} < \mu + a\mu \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{1}{\Gamma^2(3/2)} - 1 \right]}$$

avec a la largeur relative de l'intervalle de confiance¹.

L'estimation de l'erreur relative $\mathcal{E}r$ de la moyenne est donc :

$$\mathcal{E}r = a \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{1}{\Gamma^2(3/2)} - 1 \right]} \simeq a \sqrt{\frac{0.2732}{N}}$$

Par exemple, pour une erreur relative de 6%, la taille de l'échantillon vérifie :

$$N = 75.8a^2$$

ce qui permet de tracer la courbe donnant le nombre de pixels en fonction du seuil de confiance considéré.

Les résultats pour une erreur relative de 3% et de 6% sont illustrés par la figure (Fig 7.10). Comme attendu une erreur relative plus faible demande à considérer des échantillons de taille plus importante.

Relions ces résultats à notre application. Les zones de déclivité nulle extraites de l'image radar sont des échantillons de taille allant de 850 pixels à plus de 2100 pixels. Or, selon la figure (Fig 7.10), et pour calculer la moyenne avec seulement $\pm 3\%$ d'erreur admissible, la taille de ces zones correspond à un seuil de confiance dépassant les 90%. Ce dernier chiffre permet ainsi de conclure que les zones considérées sont statistiquement significatives.

Par ailleurs, nous pouvons également valider le calcul mathématique précédent par un test simple sur les zones délimitées. Pour chacune d'elles, le test consiste à

1. La valeur a s'obtient simplement grâce à la table de la loi normale. Exemple : pour 80% de seuil de confiance, on a $a = 1.28$.

calculer la moyenne sur des échantillons dont on augmente progressivement la taille. Les deux figures (Fig 7.11) illustrent les résultats obtenus par ce test sur deux des zones délimitées. Sur celles-ci, nous avons représenté trois droites, l'une d'elles correspondant à la valeur radiométrique du sol plat déterminée par la méthode décrite au §7.1.1, et de part et d'autre de cette dernière, deux autres droites indiquant les bornes à $\pm 3\%$ de cette valeur. Par cette indication graphique, nous constatons que les courbes de la moyenne semblent se stabiliser dans cet intervalle, montrant ainsi que la taille des zones délimitées est largement suffisante, et d'autre part que la moyenne en intensité sur de telles zones permet d'avoir une bonne estimation de I_o .

Pour finir, remarquons que le fait de considérer la totalité des zones délimitées permet d'avoir un échantillon important et statistiquement très représentatifs, soit en tout 14964 pixels. Dans ce dernier cas, la moyenne en intensité est de $(429.3)^2$, ce qui diminue considérablement l'erreur relative sur la radiométrie du sol plat qui atteint les $\pm 1.3\%$. Ce dernier point montre donc que plus la zone (ou les zones) sélectionnée est grande, plus on diminue l'erreur relative sur sa moyenne, mesure qui tend à estimer correctement la radiométrie de sol plat, puisque identique à celle obtenue par la méthode précédente (§7.1.1). Cependant, comme indiqué en introduction de cette partie, cette méthode repose sur la sélection souvent difficile de zones de déclivité nulle, difficile dans le sens où certains types de terrain montagneux ne se prêtent guère à cette extraction (trop peu de pixels de déclivité nulle).

7.2 Cas d'une image non-homogène

Toute notre démarche jusqu'en ce point a fait l'hypothèse d'un couvert homogène caractérisé par un seul terme d'albédo, fraction d'énergie réfléchi par un corps. Pour des zones de forêts, de steppes, de déserts, de landes, de neige, cette hypothèse peut être retenue. Mais à l'évidence, elle est souvent en défaut. Nous pouvons imaginer 3 types d'inhomogénéité canonique :

- **cas i_1** : des objets de petite taille dont les lois de réflexion s'écartent complètement de celle du couvert (exemple rivière, route, bâti isolé, mât ou antenne),
- **cas i_2** : des mélanges d'un petit nombre de couverts, bien distincts, chacun ayant une albédo lambertienne (par exemple alternance de forêt et de clairières, ou de brousse et de désert),
- **cas i_3** : évolution lente d'un couvert à un autre en fonction de paramètres cachés (passage de la savane à la forêt par densification progressive des arbres, étagement de feuillus et de conifères dans un massif).

7.2.1 Objets de petite taille

Le cas i_1 est doublement illustré sur la figure (Fig 7.12 a), par un écho fort sur une construction humaine et une rivière. Ces objets perturbent évidemment le

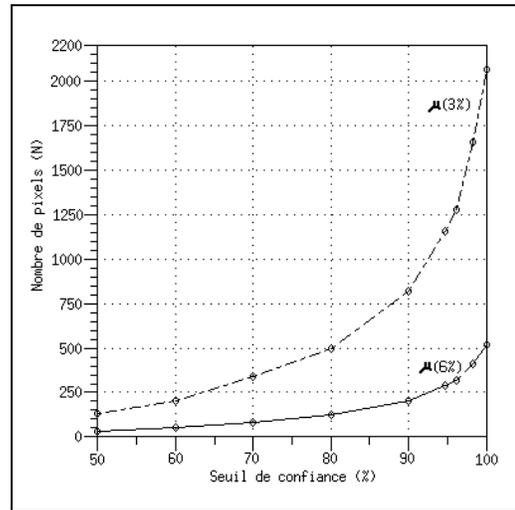


FIG. 7.10 – Nombre de pixels nécessaires pour calculer avec $\pm 3\%$ et $\pm 6\%$ d'erreur admissible la moyenne en fonction du seuil de confiance souhaité.

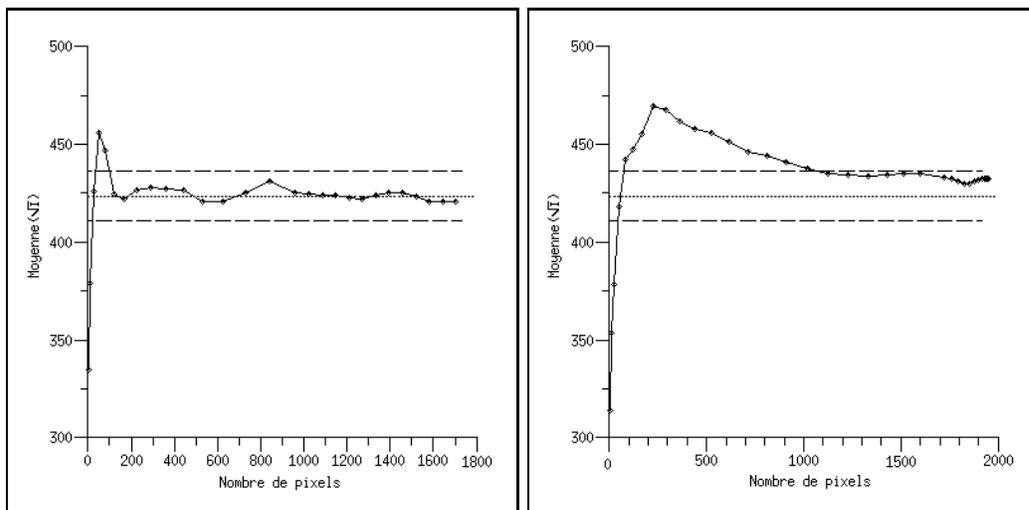


FIG. 7.11 – Deux exemples de variation de la moyenne μ_I calculée pour des échantillons de taille croissante, extraits de la zone 1 à gauche, et de la zone 9 à droite. Les lignes en tiret représentent les limites à $\pm 3\%$ autour de la valeur (423.6) déterminée par la méthode automatique précédente (lignes en pointillé).

développement de h , introduisant une surestimation de l'altitude dans le premier cas, une sous-estimation dans l'autre. La solution à ces défauts semble assez simple. Elle nécessite une détection de ces objets, puis, lors de la reconstruction, on se contentera d'omettre les points lors de l'intégration. Les échos forts peuvent être détectés par des tests statistiques [GOU1-96b], s'ils sont ponctuels, par des champs de Markov appropriés s'ils forment des lignes de repliement (layover) [TROU-96]. Les rivières ainsi que les routes sont détectées par des tests statistiques suivis d'une étape de connexion par champs de Markov [TUPI-97]. On peut améliorer éventuellement la reconstruction en imposant par exemple à la rivière d'avoir une altitude faiblement décroissante, ou à une route d'avoir un dénivelé raisonnable.

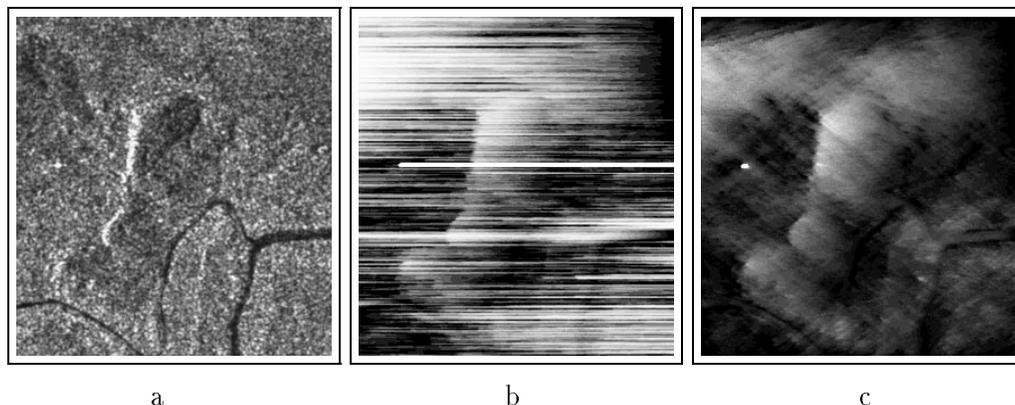


FIG. 7.12 – En a : image radar de la montagne Des Pères, située sur la côte atlantique de la Guyane, au sud de la ville de Kourou, en b : relief résultant d'une simple intégration suivant la direction en site, et en faisant abstraction de la diversité des constituants composant le terrain (marécage, forêt, rivière, routes, et bâtiment), et en c : relief résultant d'une intégration en considérant diverses directions, mais toujours une seule et unique intensité de sol plat.

7.2.2 Mélange de couverts séparés

Dans le cas idéal d'une scène ne comportant qu'un petit nombre de couverts bien distincts, on imagine bien sûr qu'il conviendrait tout d'abord de segmenter l'image en plages dûment étiquetées selon les couverts reconnus. Le développement suivrait alors le modèle déjà proposé. Il n'en différerait que parce qu'il conviendrait de changer d'intensité de sol plat à chaque traversée de frontière lors de la phase d'initialisation, et de même lors du recuit simulé d'appliquer à chaque pixel la loi d'attache aux données qui lui revient. La carte d'altitude serait unique, mais dressée par morceaux avec des paramètres localement constants.

Comment pourrait-on obtenir la segmentation ?

De nombreuses techniques ont été proposées ([TUPI-97], [CHAR-94], [LOPE-93], [FJOR-95], [NEZR-92], [HEGA-96], [OGOR-96], etc). Si les classes sont rares, on

peut penser que la classification permettra de reconnaître les couverts et leur attribuer une albédo apprise par avance. Sinon il faudra agir de façon supervisée. On imagine aussi que des erreurs importantes pourront se produire aux frontières entre zones (mélanges de classes, effets d'ombre ou de coin, contours mal placés). Cette méthode sera donc probablement en faillite si les zones sont très petites ou peu discernables.

7.2.3 Evolution lente du couvert

Ce cas n'est pas adapté à la radarclinométrie dans l'état actuel de nos connaissances. Nous ne savons comment séparer les effets d'évolution naturelle des effets de relief, et nous suggérons d'écarter ces situations.

7.3 Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à la détermination de la radiométrie d'un sol plat, dont le principal intérêt réside dans la réduction du nombre d'inconnues dans la relation de base de nos travaux. La première partie de ce chapitre est consacrée à cette détermination dans le cas d'un couvert végétal homogène. Nous avons décrit et testé divers méthodes d'estimation. Une seule s'est avérée efficace. Elle délivre la radiométrie du sol plat par simple recherche d'un équilibre dans le relief reconstruit par intégration en ligne. Cette technique d'estimation est particulièrement robuste puisqu'indépendante du type d'images SAR utilisées (ERS-1, JERS-1, et RADARSAT). Suite au développement de cette technique, le problème s'est alors orienté vers un cas plus courant d'images non-homogènes, ceci étant traité en deuxième partie de ce chapitre. Dans un premier temps, nous avons montré l'effet d'une reconstruction ne considérant qu'une seule radiométrie de sol plat. Par cette application, nous avons alors déduit qu'il était nécessaire de segmenter l'image en zones homogènes, et donc d'estimer une radiométrie de sol plat sur chaque zone segmentée. Du fait d'une segmentation très souvent difficile en zone de relief ou dans le cas d'un couvert présentant une certaine évolution lente dans sa composition, aucune méthode précise n'a donc été proposée.

Chapitre 8

Modèle de Rétrodiffusion

Jusqu'à présent, nous avons reconstruit le relief en supposant que la rétrodiffusion du terrain imagé suit le modèle lambertien, avec un coefficient de rétrodiffusion constant. Or, il va de soi que ce modèle, considérant uniquement une réflexion globale diffuse, ne peut être utilisé pour tout type de terrain. En effet, il paraît raisonnable de croire qu'un terrain couvert de feuillus ne vérifie pas les mêmes lois de réflexion qu'un terrain entièrement constitué de rocailles, par exemple. L'établissement d'un modèle de réflexion pour chaque type de couvert est donc nécessaire. Or, sans autre connaissance que l'image radar, cette détermination n'a pu être réalisée initialement, expliquant ainsi le fait d'avoir utilisé par simplification le modèle de Lambert. Dans le cas des images radar de la Guyane, l'utilisation de ce modèle paraît assez convenable, mais une vérification précise s'impose. En effet, les reliefs résultant de notre procédé de restitution permettent certes d'avoir une mesure d'altitude dans l'ensemble assez satisfaisante, mais ces modèles, obtenus à partir d'images acquises par divers systèmes radar (ERS-1, JERS-1, et RADARSAT) présentent d'importantes différences numériques entre eux. Ceci laisse donc entendre que le modèle ne convient pas, ou en partie, et qu'il dépend étroitement des paramètres d'acquisition employés pour les capteurs. Nous proposons donc dans ce chapitre, de vérifier l'usage du modèle lambertien, et le cas échéant d'estimer un modèle de rétrodiffusion plus adapté.

8.1 Les principaux mécanismes de réflexion

8.1.1 Position du problème

Le problème consiste ici à déterminer le modèle de rétrodiffusion d'un terrain homogène dans sa composition, à partir de l'information délivrée par son acquisition radar. Or, chercher à établir le modèle exact de rétrodiffusion peut être difficile si l'on a uniquement connaissance des données radar, c'est à dire sans connaissance a priori de la composition de la scène en termes de classe (forêt, prairie, terrain dénudé rocaillieux, terreux ou sablonneux, etc.). En effet, il faudrait des modèles théoriques, qui nécessiteraient d'une part de modéliser la composition du terrain

par des paramètres géométriques et physiques, et d'autre part de rendre compte des interactions électromagnétiques au sein de chaque subdivision du terrain. Pour préciser un peu ces interactions électromagnétiques, nous allons revenir un peu sur les trajets possibles d'une onde dans un couvert végétal, et, puisque la rétrodiffusion n'est qu'un cas particulier de la réflexion, consistant à positionner l'émetteur et le récepteur au même endroit, nous nous intéresserons au cas de la réflexion.

Plusieurs schémas de réflexion (Fig 8.1) peuvent être pris en compte pour une onde électromagnétique initialement émise sur un couvert végétal dense. Son trajet dépend bien évidemment des paramètres du faisceau émis tels que la longueur d'onde et l'angle d'incidence, mais également des caractéristiques physiques de chaque constituant du couvert telles que l'émissivité et l'orientation vis à vis de l'onde. Quatre sortes de trajets peuvent être envisagées :

- ▷ l'onde est directement réfléchi par le sol ; les éléments en surface composant le terrain tels le feuillage des arbres sont alors considérés comme totalement transparents.
- ▷ l'onde subit des réflexions multiples sur le sol et une partie de la végétation (en particulier les troncs des arbres) ; les autres éléments sont considérés comme transparents.
- ▷ l'onde est réfléchi uniquement par les éléments en surface du couvert, et de ce fait n'accède pas jusqu'au sol.
- ▷ une portion de l'onde est réfléchi par des éléments en surface, mais arrive jusqu'au sol où elle est également réfléchi.

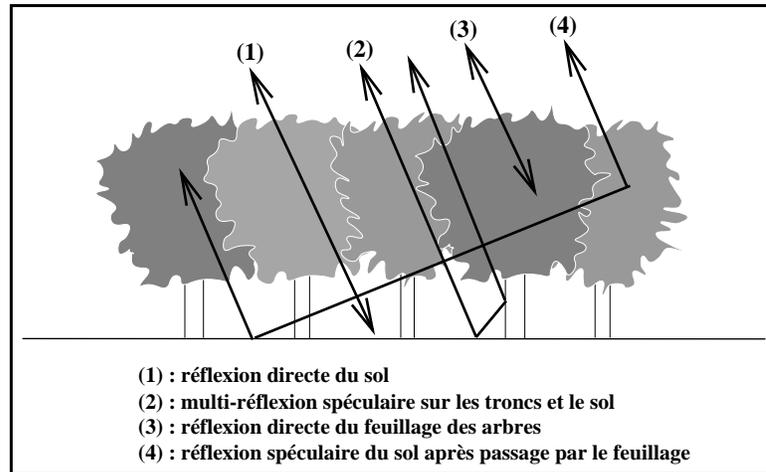


FIG. 8.1 – Mécanisme de la réflexion dans le cas d'un couvert végétal dense.

8.1.2 Information issue de l'image SAR

L'information délivrée par une image SAR peut être un moyen pour connaître les éléments déterminants dans la réflexion des ondes radar. Reprenons brièvement et de manière plus générale que précédemment, le cheminement de l'onde électromagnétique passant successivement de l'air aux feuillages en surface, puis de ces feuilles ou branches aux feuilles ou branches en volume, pour finir au sol. Cette onde arrive tout d'abord à la surface du couvert végétal. Une portion de l'énergie est réfléchiée par les éléments en surface, l'autre partie est transmise dans le volume du couvert. Cette quantité d'énergie transmise dépend bien évidemment des caractéristiques physiques des éléments telles que la constante diélectrique ϵ (ou plus couramment l'indice n), et également de leurs orientations. En considérant que cette portion d'énergie n'est pas négligeable, l'onde va ainsi de suite traverser le volume du couvert par une série de réflexions ou de transmissions. A chaque passage par un élément du couvert, la quantité d'énergie va peu à peu être fractionnée, et l'orientation de l'onde modifier. De ce fait, il ne reste qu'une infime quantité d'énergie arrivant jusqu'au sol, cette atténuation dépendant de la longueur d'onde employée par le radar. D'après ce principe et le modèle établi en 8.1.1, on peut ainsi considérer que dans ce type de paysage, l'interaction au niveau du sol est négligeable. Il est difficile de vérifier quantitativement ce principe sans démarche expérimentale. En revanche, l'information délivrée par l'image radar rend possible cette vérification, mais de manière qualitative.

L'utilisation de l'image radar de la région de Kourou (Fig 8.2 a) associée à sa carte (Fig 8.2 b), et de l'image radar d'une portion du fleuve *Le Maroni*, frontière naturelle entre la Guyane et le Surinam (Fig 8.3) illustre par certains détails la validité du principe décrit précédemment. En effet, on remarque que les routes et certaines portions de fleuve n'apparaissent pas distinctement sur ces images. On peut supposer que ces zones non-visibles sont probablement masquées par la végétation, et plus précisément le feuillage des arbres les bordant. En comparant les vastes zones de forêt aux portions du fleuve et des routes non recouvertes dont la radiométrie est très faible, on peut alors en déduire que l'interaction de l'onde au niveau du sol est négligeable, et de ce fait, considérer que les principaux éléments modifiant l'onde sont ceux composant le volume végétal.

Plusieurs éléments demeurent mêlés dans ce couvert végétal: feuilles, branches, troncs des arbres. Cependant, sur l'image radar (Fig 8.4) de la région du *Petit Saut* en Guyane, on peut un peu plus lever les incertitudes et déterminer la nature des éléments prépondérants dans l'interaction avec l'onde électromagnétique. Cette région imagée comporte deux zones bien distinctes :

- une zone de forêt dense, totalement composée de feuillus,
- une zone dévastée par l'inondation produite lors de la mise en service du barrage du *Petit Saut*. Dans cette zone, les arbres n'ont plus aucune feuille, il ne demeure que leurs troncs et leurs branches maîtresses.

Ces zones, identiques avant la mise en eau du barrage, présentent ensuite des radiométries très différentes (Fig 8.4). On en déduit que l'onde ne subit pas les mêmes

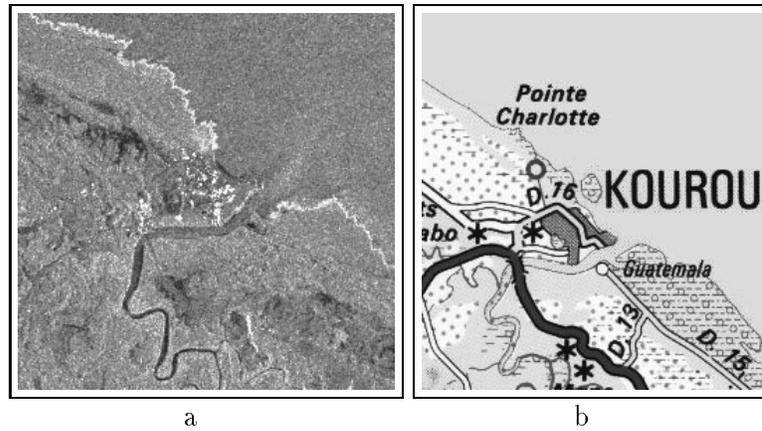


FIG. 8.2 – En a : image radar ERS-1 (©ESA) de la région de Kourou en Guyane, en b : carte touristique de Kourou et de ses environs (©IGN) : les routes ne sont pas visibles.

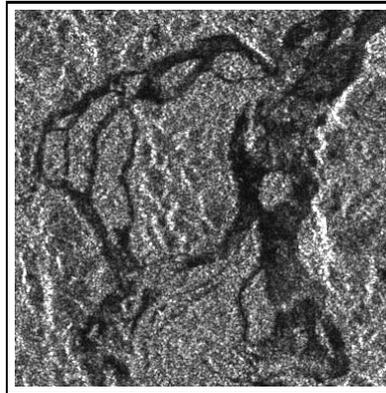


FIG. 8.3 – Extrait d'une scène SAR (©ESA) vérifiant le principe du masquage de certaines portions du fleuve Le Maroni en Guyane, par le couvert végétal.

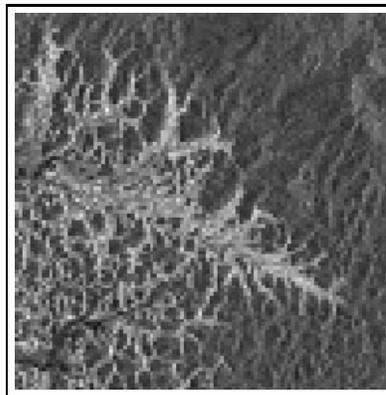


FIG. 8.4 – Image radar (©RADARSAT) de la région du Petit Saut en Guyane : les surfaces blanches sont les zones mises en eau par le barrage : les arbres sont défoliés et réduits à leur troncs (image du 06 mai 1996).

interactions. Avant l'inondation sur les arbres feuillus, l'onde est avant tout réfléchi par le feuillage, dans le second cas, elle subit des interactions au niveau des troncs des arbres sous la forme de multi-réflexions (ceci faisant intervenir la distance entre les arbres (Fig 8.5)). Les fortes radiométries produites par ces interactions indiquent que l'onde a subi très peu de perte, et revient essentiellement dans la direction du récepteur. Par comparaison de cette réponse à celle de la zone de forêt dense qui apparaît bien plus sombre sur l'image radar, on peut alors supposer que, pour une telle zone, les interactions sur les troncs des arbres n'interviennent pas ou peu dans le bilan. Ceci permet, de ce fait, d'en déduire que seuls les éléments (feuilles et branches) se situant dans la partie supérieure du volume du couvert sont prépondérants.

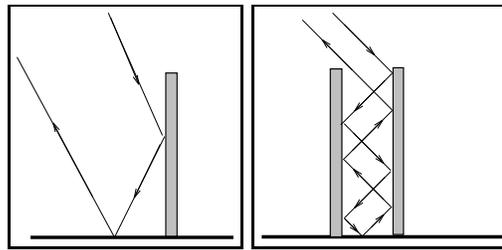


FIG. 8.5 – Modélisation du trajet de l'onde électromagnétique suivant la distance qui sépare deux arbres consécutifs (à gauche : distance très grande entre les arbres, et à droite : distance très faible).

Nous déduisons de ces deux expériences que, dans la forêt guyanaise, la réflexion met en œuvre la seule partie majoritairement feuillue du couvert, à l'exclusion du sol sous-jacent et des troncs et branches maîtresses. Nous ne pouvons trancher à ce point sur l'existence d'une réflexion purement en surface des arbres ou en volume.

Nous pourrions alors nous tourner vers des modélisations électromagnétiques des végétaux pour préciser ce point. Par exemple, Lin utilise un modèle simple d'arbre pour étudier le mode de réflexion des ondes passant des troncs au sol [LIN-95], Kasischke modélise la végétation par des paramètres géométriques simples tels que la hauteur, l'envergure, etc., pour rendre compte de la réflexion des forêts de pin en fonction de leur âge [KASI-94], et Yueh [YUEH-92] étudie la réflexion des ondes par une végétation architecturée et propose pour cela un modèle relativement complexe pour le soja afin d'en mettre en évidence les éléments prépondérants. Mais, nous n'avons trouvé aucun modèle correspondant à la forêt équatoriale et tropicale.

Un dernier point peut cependant être constaté. Il concerne la forme apparente de la couverture végétale. L'image radar révèle relativement bien la morphologie du relief terrestre. Or, si aucune forme structurée de la couverture végétale n'est envisagée, comme montrée par les figures (Fig 8.6) et (Fig 8.7), le relief a alors peu de chance d'apparaître aussi nettement que dans nos données.

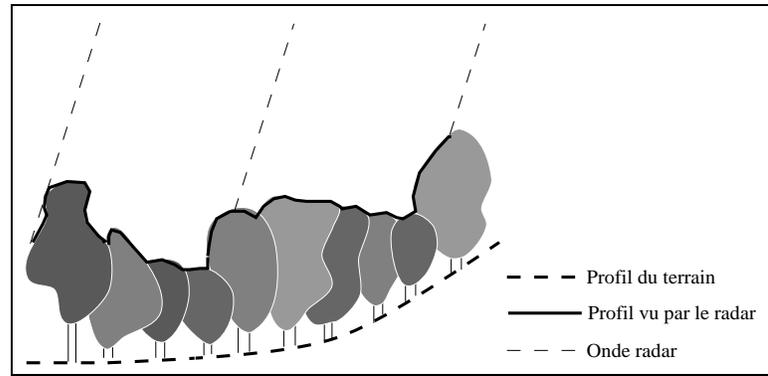


FIG. 8.6 – Schéma d'un couvert végétal non structuré en surface. Dans ce cas, l'image radar a alors peu de chance de révéler la morphologie réelle du terrain.

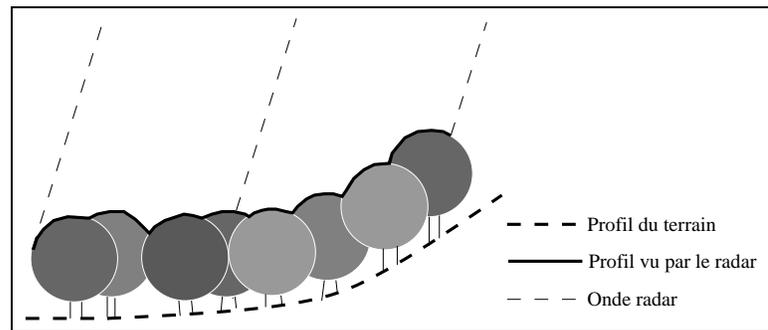


FIG. 8.7 – Schéma d'un couvert végétal structuré en surface reflétant relativement bien la présence de pente.

8.1.3 Rappels d'électromagnétisme

Si l'on veut regarder de façon fine l'interaction de l'onde avec la végétation, il est nécessaire de rappeler quelques points sur la réflexion des ondes. Ils nous permettront de justifier certaines conclusions établies précédemment.

Réflexion locale :

Nous considérons encore ici que l'onde initialement émise par un capteur SAR peut être approximée par une onde plane, se propageant dans la direction du vecteur d'onde \vec{k}^i parallèle au plan d'incidence (XOY) (chapitre 3). Perpendiculaire à ce vecteur, on trouve le vecteur champ électrique \vec{E}^i que l'on peut décomposer suivant deux directions principales, notées V et H :

$$\vec{E}^i = (\vec{E}^i)_V + (\vec{E}^i)_H$$

L'indice V est utilisé pour la composante du champ émis parallèle au plan d'incidence ; l'indice H est employé pour la composante du champ perpendiculaire au plan d'incidence. En général, un système SAR privilégie toujours une de ces deux direc-

tions : polarisation V pour ERS-1, et H pour les systèmes JERS-1 et RADARSAT (chapitre 2).

L'onde ainsi définie se propage dans l'air jusqu'à ce qu'elle rencontre un élément diffuseur, constituant un changement de milieu. Avant de voir plus en détail l'interaction qui se produit, il est nécessaire de définir un peu mieux la nature du diffuseur. Pour nous, ce sera par exemple une feuille d'arbre. Non seulement il est nécessaire de connaître la forme, et donc les paramètres géométriques de ce diffuseur, mais il est également nécessaire de définir ses propriétés physiques, c'est à dire sa permittivité diélectrique ϵ ou encore son indice n , par exemple. Le paramètre ϵ est dans le cas général un nombre complexe, et se met sous la forme :

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$$

L'indice n est donc également un nombre complexe :

$$n = n' + jn''$$

avec n' l'indice de réflexion, et n'' l'indice d'absorption du diffuseur considéré, tels que l'on ait :

$$n' = \sqrt{\left(\frac{\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}}{2}\right)}$$

$$n'' = \sqrt{\left(\frac{-\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}}{2}\right)}$$

Pour avoir un ordre de grandeur, la permittivité diélectrique des feuilles du maïs [ULAB-87] est : $\epsilon' = 28$ et $\epsilon'' = 5$ pour une fréquence comprise entre 4 GHz et 11 GHz, ce qui donne pour l'indice n du milieu : $n' = 5.31$ et $n'' = 0.47$. Ces indications numériques montrent que ces feuilles sont bien plus réfléchissantes qu'absorbantes.

Reste à détailler le processus de réflexion à l'interface de ce diffuseur. En considérant que θ_i est l'angle d'incidence entre le vecteur d'onde \vec{k}^i et la normale à la surface du diffuseur, les lois de Snell-Descartes, valables dans le cas où la surface est grande par rapport à λ^2 , permettent de repérer géométriquement l'onde réfléchie et transmise :

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_r \\ \sin \theta_i = n' \sin \theta_t \end{cases}$$

avec θ_r l'angle de réflexion repéré entre le vecteur d'onde \vec{k}^r et la normale à la surface du diffuseur, θ_t l'angle de transmission entre le vecteur d'onde \vec{k}^t et la normale interne au diffuseur, et en supposant que l'indice de l'air égale 1.

Mais, ces relations ne suffisent pas à déterminer la portion d'énergie réfléchie (r), ou au contraire transmise (t). Si nous faisons abstraction des pertes, le principe de conservation de l'énergie propose :

$$r + t = 1$$

Dans ce cas, la détermination d'un des deux termes est suffisante pour connaître la répartition de l'énergie après interaction avec le diffuseur. Pour cela, on introduit r_H et r_V [LEVI-68] les coefficients définissant la quantité d'énergie réfléchie pour une polarisation horizontale et verticale des ondes. Selon le principe de Fresnel, ces deux coefficients ont pour expression :

$$r_H = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{n'^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{n'^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (8.1)$$

$$r_V = \frac{\sqrt{n'^2 - \sin^2 \theta_i} - n'^2 \cos \theta_i}{\sqrt{n'^2 - \sin^2 \theta_i} + n'^2 \cos \theta_i} \quad (8.2)$$

La figure (Fig 8.8) illustre le comportement de ces deux coefficients, en fonction de l'angle d'incidence θ_i , et pour diverses valeurs de l'indice n' , en supposant que ce dernier est toujours supérieur à l'indice de l'air ($n = 1$).

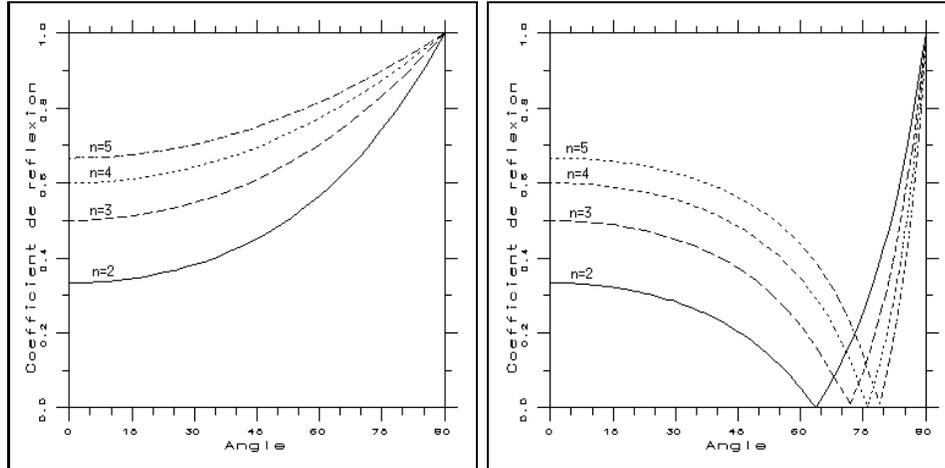


FIG. 8.8 – Comportement du coefficient de réflexion (à gauche : r_H , à droite : r_V) en fonction de l'angle d'incidence θ_i et de l'indice n' du diffuseur. Notons que le coefficient de réflexion sur le graphe en polarisation V (à droite) s'annule pour un certain angle d'incidence. Cet angle est couramment appelé "l'angle de Brewster".

Pour pouvoir apporter quelques conclusions à cette étude locale, il est nécessaire de prendre en compte certaines caractéristiques des capteurs SAR, et plus spécifiquement considérer que l'émetteur et le récepteur sont à des positions confondues.

Comment pouvons nous envisager d'utiliser ces propriétés pour rendre compte de la rétrodiffusion du couvert? Il nous faut choisir un modèle de distribution géométrique des feuilles : densité des feuilles, mais aussi orientation, par exemple des feuilles plutôt "horizontales" ou plutôt distribuées suivant un cône et estimer le trajet des rayons : propagations libres, réflexions, transmissions. On peut raisonnablement estimer que la traversée d'une feuille ne se traduit que par une atténuation que l'on pourra supposer constante (lame à faces parallèles). Une réflexion suivra la loi de Fresnel exactement et un rayon ressortira du couvert avec une orientation donnée dépendant des réflexions qu'il aura subies et une amplitude dépendant des transmissions. On pourra espérer déterminer les probabilités de l'orientation et de l'amplitude, peut-être théoriquement pour des modèles simples, plus sûrement par simulation. Il sera alors possible de prédire l'énergie rétrodiffusée vers le capteur. Anticipons sur le calcul. Si nous admettons que les arbres possèdent une même orientation par rapport à la verticale quelque soit la pente du sol, il semble raisonnable de conclure que des probabilités identiques seront obtenues sur un sol plat ou incliné. Le pourcentage d'énergie retourné vers le capteur sera égal quelque soit l'orientation du sol, ce qui est bien l'hypothèse lambertienne. Ce raisonnement n'est valable que si l'onde pénètre suffisamment le couvert pour être peu affectée par l'effet de "coin"¹ dû à l'orientation de la surface extérieure des arbres (et bien sûr si elle pénètre insuffisamment pour être affectée par la réflexion du sol).

8.2 Estimation du modèle de rétrodiffusion

Comme présentée précédemment, une estimation théorique nécessite un trop grand détail de la couverture végétale du terrain imagé. Sachant qu'il est, de plus, très complexe de prendre en compte la moindre interaction, ce moyen ne permet donc pas d'établir le modèle de rétrodiffusion adéquat au terrain imagé, mais reste utile uniquement dans le cadre d'une vérification approximative des hypothèses employées. On peut cependant envisager deux autres moyens pour son estimation, l'un consistant à utiliser des bases de données expérimentales, et l'autre correspondant à une évaluation par les cartes d'altitude obtenues par notre procédé de restitution. Ces deux méthodes d'estimation sont détaillées dans cette partie.

8.2.1 Evaluation par l'expérience

Il s'agit de montrer ici, que les mesures expérimentales, réalisées depuis l'apparition des capteurs radar, est un des moyens les plus robustes de détermination du coefficient de rétrodiffusion. Nous mettrons également en évidence, que certaines difficultés subsistent quant à l'utilisation effective de ces modèles pour notre application. Rappelons que la plus importante série de mesures a été débutée dans les années 50-60. A cette époque, un bras articulé ou une grue servait de plateforme au capteur SAR, et ainsi permettait d'acquérir des mesures à de très fines résolutions.

1. Effet de coin : si le sol est incliné, il y a un important déficit de réflexions dans l'espace libre au dessus des arbres.

Ces expériences ont été effectuées à seules fins de caractériser la réponse de nombreux types de terrains illuminés par le faisceau d'onde radar, incluant les ensembles agricoles, les divers espaces naturels de végétation, les surfaces recouvertes de béton ou d'asphalte, et également les surfaces enneigées. Même incomplètes, ces mesures ont largement été employées comme référence standard, durant de nombreuses années. Evidemment, au cours du temps, elles ont été remises en cause de nombreuses fois, par l'évolution sans cesse plus performante des plateformes de support, et des capteurs SAR. Au niveau des plateformes de support, cette évolution s'est traduite progressivement par l'utilisation de systèmes aériens tels que les avions et les hélicoptères, aux systèmes satellitaires actuels, donnant alors la possibilité de recouvrir de plus grandes surfaces, et également de caractériser celles alors peu étudiées telles que les mers et océans, ainsi que diverses autres régions terrestres peu accessibles. En ce qui concerne les systèmes d'acquisition radar, les avancées technologiques sont peut être plus marquantes, par la nécessité d'établir des mesures références toujours plus précises. Ainsi, on assiste au passage de mesures obtenues par un capteur à bande large à des mesures multi-spectrales : citons les capteurs de type SPOT et les capteurs SAR polarimétriques, et bien d'autres. Ces efforts technologiques ont donc permis de constituer une importante base de données, et de faire ressortir les propriétés de diffusion vis à vis du faisceau d'onde radar, de nombreux types de couvert (terrestres, et aquatiques, incluant les régions polaires) à divers stades suivant les saisons et en fonction de conditions externes liées au vent, à l'humidité, et autres. Il en découle également de nombreux modèles mathématiques du coefficient de rétrodiffusion. Ulaby (cité dans [MARC-93]) propose un modèle général pour ce coefficient ($\bar{\sigma}_o$ en dB) sous la forme :

$$\bar{\sigma}_o = P_1 + P_2 \exp(-P_3 \theta_i) + P_4 \cos(P_5 \theta_i + P_6)$$

Ce coefficient moyen est prédit avec une certaine déviation standard, également en dB¹ ; son expression est :

$$SD(\theta_i) = M_1 + M_2 \exp(-M_3 \theta_i)$$

Ces deux expressions dépendent de l'angle d'incidence θ_i ² entre le faisceau d'onde radar et la normale à la surface étudiée, et des paramètres P_i et M_i , dont les valeurs sont référées dans des tables pour diverses fréquences et polarisations du capteur et pour différentes catégories de couvert surfacique :

- *Surfaces rocheuses et terreuses (1)* : sol aride, clairsemées de végétation. Cette catégorie inclue les éléments volcaniques, les surfaces de gravier et de désert, ainsi que les terres agricoles dénudées de végétation.

1. La conversion des valeurs pour passer de l'espace log-normal (dB) à l'espace linéaire demande à utiliser l'expression : $X_{lin} = \exp\left(X_{log} + \frac{SD_{log}^2}{2}\right)$ pour la valeur moyenne estimée X, et : $SD_{lin} = \exp(2X_{log} + SD_{log}^2) \exp(SD_{log}^2 - 1)$ pour la déviation standard.

2. Des développements ultérieurs utilisent aussi des puissances de θ_i .

- *Surfaces couvertes d'arbres (2)*: forêts et vergers. Cette catégorie comprend tous les types d'arbre, les épineux et feuillus avec ou sans feuilles.
- *Surfaces herbeuses (3)*: espace naturel tel que les prairies et les pâturages. Cette catégorie inclue également certaines surfaces agricoles telles que le foin, et les cultures céréalières (orge, avoine, seigle et blé).
- *Surfaces d'arbustes (4)*: buissons, broussailles, et certaines cultures telles que le maïs, la luzerne, le coton, etc.
- *Petite végétation (5)*: herbes, petits arbustes et marécage. Les marais et les surfaces agricoles inondées (soja) sont compris dans cette catégorie.
- *Routes (6)*: toutes surfaces construites en béton, en asphalte, ou recouvertes de gravier.
- *Surfaces couvertes de neige sèche (7)*: surfaces enneigées contenant moins de 1% d'eau liquide par volume.
- *Surfaces couvertes de neige humide (8)*: surfaces de neige contenant plus de 1% d'eau liquide par volume.

La figure (Fig 8.9) illustre l'évolution du coefficient $\bar{\sigma}_o$ en fonction de l'angle d'incidence θ_i , pour les divers paysages définis précédemment. Comme attendu, ce coefficient présente de grandes différences d'un paysage à l'autre. Il dépend non seulement des paramètres d'acquisition radar tels que la polarisation (Fig 8.10) et la fréquence (Fig 8.11), mais également des contraintes externes telles que l'humidité, le vent et autres [SHI-97]. Par ailleurs, le modèle de Lambert, hypothèse utilisée dans notre procédé, ne se vérifie pas par ces représentations. Ce désaccord montre donc la nécessité de considérer un modèle pour ce coefficient tout autre que celui de Lambert. Mais, il subsiste certaines difficultés quant à l'utilisation effective du modèle présenté précédemment. Rappelons tout d'abord que seuls les paramètres d'acquisition sont entièrement connus. En ce qui concerne la composition des surfaces du terrain étudiées, nous avons également connaissance de son type (forêt généralement), mais certaines données telles que l'humidité sont manquantes, et sont des plus essentielles dans le choix des paramètres du modèle de rétrodiffusion, (paramètres non référés pour cette catégorie de surfaces (2)). De ce fait, nous n'avons pas entrepris d'utiliser le modèle proposé par Ulaby. L'idéal serait de procéder à une série de mesures locales du site étudié, parallèlement à l'acquisition du système SAR satellitaire (donc posséder un capteur identique à celui satellitaire), de façon à établir préalablement le modèle de rétrodiffusion adéquat pour notre procédé de restitution du relief.

8.2.2 Evaluation par les reliefs restitués

Nous venons de voir les moyens théoriques et expérimentaux d'évaluation du comportement de la rétrodiffusion. Ces deux moyens s'étant malheureusement avérés inefficaces pour la vérification précise de l'usage de la loi de Lambert dans notre

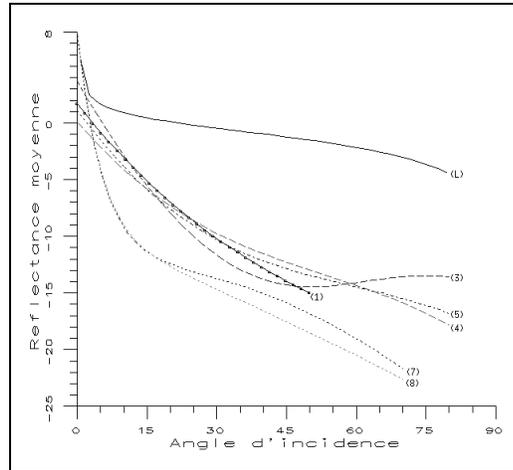


FIG. 8.9 – Coefficient de rétrodiffusion moyen ($\bar{\sigma}_o$) selon le modèle de Ulaby pour 6 catégories de couvert en fonction de l'angle d'incidence (les paramètres du modèle pour la catégorie (2) (forêts et vergers) et (6) (routes) n'ayant pas été déterminés). Les paramètres du modèle ont été établis, pour cet exemple, à partir de mesures acquises par un système radar en bande C et de polarisation HH. La courbe (L) illustre le comportement du coefficient de rétrodiffusion selon le modèle de Lambert.

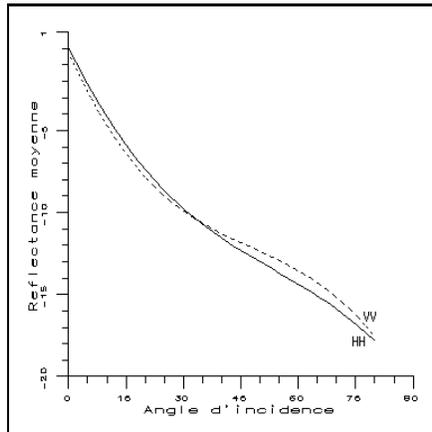


FIG. 8.10 – Représentation du coefficient de rétrodiffusion moyen ($\bar{\sigma}_o$) des surfaces recouvertes d'arbustes (4) en fonction de l'angles d'incidence et de la polarisation utilisée (HH et VV) (même bande de fréquence C pour les deux courbes).

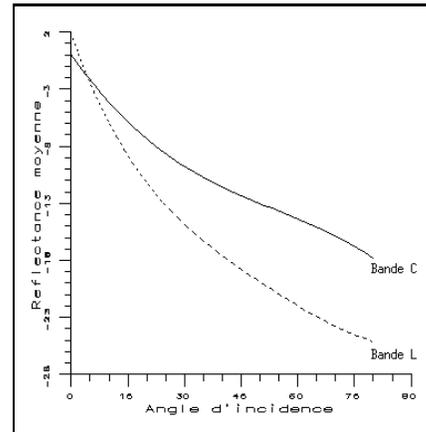


FIG. 8.11 – Représentation du coefficient de rétrodiffusion moyen ($\bar{\sigma}_o$) des surfaces recouvertes d'arbustes (4) en fonction de l'angle d'incidence et de la bande de fréquence utilisée (C et L) (même polarisation pour les deux courbes HH).

application, il reste cependant un dernier moyen. Il consiste à utiliser conjointement les données SAR initiales, et la carte d'altitude résultante de notre procédé. A chaque pixel de l'image radar, il correspond d'une part une intensité I , et d'autre part par l'utilisation de la carte d'altitude restituée, un couple d'angles (α, β) , que l'on estime de la même manière que lors de la restauration markovienne (chapitre 4). Par ce couple d'angle, il est possible de calculer l'intensité rétrodiffusée \hat{I} répondant au critère lambertien ; son expression est donnée par (Eq 4.6). En théorie, si le critère lambertien se vérifie, on doit alors avoir égalité entre l'intensité I provenant de l'image radar, et celle \hat{I} calculée à partir du couple d'angles. Or, inutile de préciser à nouveau en détail, que l'on va se heurter au problème de speckle présent dans les données radar. Et de ce fait, pour une estimation de l'intensité \hat{I} , il correspond en réalité plusieurs intensités I de l'image radar. Cet effet peut facilement être mis en évidence, en considérant par exemple les intensités pour un couple (α, β) particulier tel que $\alpha = 0$ et $\beta = 0$. Ceci est illustré par la figure (Fig 8.12). On constate effectivement une grande variabilité dans les données radar initiales, rares sont celles vérifiant exactement la valeur établie par notre modèle lambertien. La distribution statistique filtrée ne laisse malheureusement pas apparaître une loi de type Rayleigh comme on aurait pu s'y attendre si seul le speckle était responsable de la dispersion. La loi est plutôt gaussienne. Ceci nous amène à supposer que les erreurs sur l'estimation de l'orientation contribuent de façon assez dominante à l'erreur globale. Cette constatation a été faite pour un couple d'angle particulier, mais se généralise pour tous les autres. Malgré ce fait, on peut toutefois chercher à vérifier le bon usage de la loi de Lambert. En considérant chaque couple d'angle (α, β) possible, soit encore chaque valeur estimée \hat{I} , nous calculons l'intensité moyenne \bar{I} de l'ensemble des pixels de l'image radar correspondant. La figure (Fig 8.13) illustre le comportement de cette valeur moyenne en fonction de l'estimée \hat{I} . Globalement, on constate que l'écart à la loi de Lambert est relativement faible, mis à part pour les couples d'angles de faible valeur, c'est à dire pour les surfaces orientées face opposée au capteur SAR. Sur cette figure, nous avons également représenté les valeurs de l'intensité moyenne pour lesquelles le nombre de pixels intervenant dans son calcul est supérieur à 200, taille d'un échantillon statistiquement représentatif de cette mesure (chapitre 7). Vis à vis de la droite indicative d'une correspondance exacte avec la loi de Lambert, le biais semble peu important. Donc l'hypothèse lambertienne semble être utilisée de manière relativement correcte.

Reste, cependant à quantifier ce biais. Pour cela, trois types de calcul d'erreur peuvent être considérés :

◊ le premier calcul est une simple mesure d'écart type, telle que :

$$e_1^T = \left[\frac{\sum_{(i,j)} (I_{i,j} - \hat{I}_{i,j})^2}{n_T} \right]^{1/2} \quad (8.3)$$

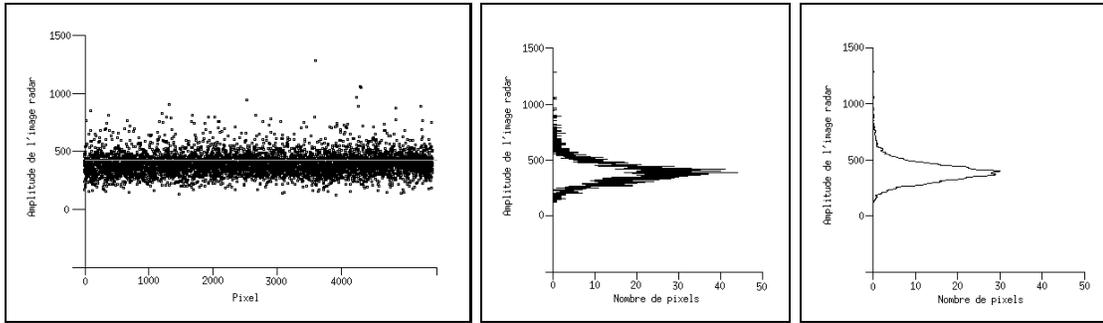


FIG. 8.12 – Mise en évidence de la grande variabilité radiométrique de l'image radar (Fig 4.1) correspondant à un couple d'angle particulier ($\alpha = 0$, $\beta = 0$) de la carte d'altitude (Fig 4.12) établie par notre procédé de restitution (chapitre 4). Le nombre de pixels, vérifiant la condition de déclivité nulle en distance et en azimuth, représente 2,6% de la totalité de l'image. A gauche : une représentation de l'ensemble des radiométries de l'image radar vérifiant la condition (la droite figurant sur ce schéma indique la position de l'intensité estimée \hat{I} à partir de l'expression (Eq 4.6)), au centre : l'histogramme de cet ensemble, et à droite : l'histogramme filtré par une gaussienne.

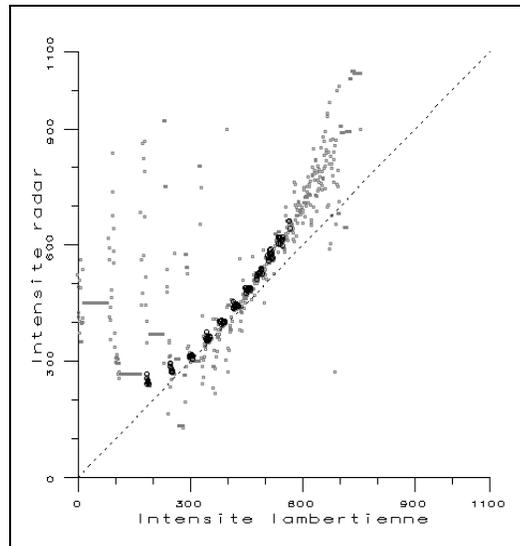


FIG. 8.13 – Intensité moyenne \bar{I} de l'image radar (Fig 4.1), correspondant à chaque couple d'angle (α , β), ou encore à chaque intensité établie à partir de la carte d'altitude (Fig 4.12) selon l'expression (Eq 4.6). Les points en gris clair représentent l'ensemble des intensités moyennes ; les points en gris foncé mettent en évidence les intensités moyennes estimées avec plus de 200 pixels de l'image radar. La droite indique le lieu de la parfaite égalité entre les intensités.

n_T étant alors le nombre total de pixels de l'image.

- ◇ le deuxième calcul consiste à considérer séparément les intensités de l'image radar correspondant à chaque couple d'angles, soit à chaque intensité estimée par le modèle de Lambert. Pour une de ces intensités estimées \hat{I} , l'écart au modèle lambertien a pour expression :

$$e_2(\hat{I}) = \left[\frac{\sum_{(i,j)|\hat{I}_p=\hat{I}} (I_{i,j} - \hat{I}_p)^2}{n(\hat{I})} \right]^{1/2} \quad (8.4)$$

avec $n(\hat{I})$ le nombre de pixels ayant la même valeur estimée \hat{I} .

Si l'on cherche à connaître l'écart moyen sur la globalité du modèle utilisé, il suffit alors de sommer sur l'ensemble des intensités \hat{I} :

$$e_2^T = \frac{\sum_{\hat{I}} e_2(\hat{I})}{\sum_{\hat{I}} 1} \quad (8.5)$$

- ◇ Contrairement à ce qui précède, le troisième calcul d'erreur possible tient compte, par l'usage de la moyenne, de l'ensemble des intensités de l'image radar correspondant à chaque intensité \hat{I} . Le fait d'utiliser la moyenne permet de réduire de manière non négligeable l'effet du speckle. L'écart au modèle lambertien utilisé a alors pour expression :

$$e_3(\hat{I}) = \left| \frac{1}{n(\hat{I})} \sum_{(i,j)|\hat{I}_p=\hat{I}} I_{i,j} - \hat{I}_p \right| \quad (8.6)$$

Comme précédemment, si l'on cherche à connaître l'écart moyen sur la globalité e_3^T du modèle utilisé, il suffit de sommer sur l'ensemble des intensités \hat{I} possibles.

Si on considère la totalité des données pour le calcul de ces trois erreurs, on obtient alors, pour le même jeu d'images que celui utilisé pour la figure (Fig 8.13) :

$$\begin{aligned} e_1^T &= 109.3 \\ e_2^T &= 147.8 \\ e_3^T &= 110.6 \end{aligned}$$

Ces trois valeurs sont indicatives de la présence d'un biais relativement important. Vis à vis de la gamme radiométrique de l'image radar, cela représente plus de 10% d'erreur. Sans impliquer ici le fait d'avoir choisi une modélisation lambertienne du coefficient de rétrodiffusion, il reste donc à vérifier si le speckle est responsable de ce biais. Pour ce faire, utilisons uniquement les mesures d'erreur e_2^T et e_3^T . Elles mettent en jeu la taille de l'échantillon et, pour que ces mesures soient fiables, la taille de l'échantillon doit être suffisamment importante, donc statistiquement représentatif, comme cela a été décrit au chapitre 7. De ce fait, leur calcul est réalisé en considérant uniquement les échantillons ayant un nombre de pixels supérieur à 200. On obtient alors, toujours pour le même jeu d'images que (Fig 8.13) :

$$\begin{aligned} e_2^T &= 97.4 \\ e_3^T &= 15.5 \end{aligned}$$

Par ce calcul, on remarque que e_3^T est très nettement inférieur à e_2^T . Le fait de moyennner préalablement les intensités radar, et d'avoir considéré uniquement celles ayant été estimées par un grand nombre de pixels a, sans aucun doute, une forte incidence sur la réduction du speckle, mais l'information principale à retenir de cette restriction en pixels réside dans les dernières valeurs de l'erreur obtenue. En effet, elles représentent un écart au modèle utilisé tout à fait acceptable, et confirment ainsi le bon usage de la loi de Lambert.

Bien que l'on étaye ici l'hypothèse lambertienne, on peut se poser le problème du cas inverse, où la loi utilisée ne convient pas. On se retrouve alors confronté à un point essentiel : chercher à déterminer un modèle de rétrodiffusion adéquat à nos données. Mises à part les études théoriques et expérimentales qui ont été décrites au cours de ce chapitre, on pourrait éventuellement envisager de tester chacun des modèles théoriques et empiriques présentés au chapitre 3. Mais, d'une part rien ne nous garantit que l'un quelconque de ces modèles soit bien adapté à nos données, et d'autre part, ces modèles sont très certainement bien moins faciles à inverser, et nécessiteraient le développement de méthodes d'inversion complexes. En conséquence, nous proposons ici un autre moyen de détermination du modèle de rétrodiffusion.

L'objectif de cette méthode n'est surtout pas d'apposer un nom au modèle qui sera établi, mais de tirer pleinement profit du procédé décrit au chapitre 4, sans y apporter trop de modifications. Nous retenons donc le modèle de Lambert (Eq 4.6). Après la première restitution par ce modèle, il est possible de chercher la transformation F (par exemple polynôme de degré d), qui permet d'obtenir l'intensité de l'image radar à partir de celle estimée par le modèle de Lambert \hat{I} . L'inversion de cette fonction permettra d'avoir directement accès à la valeur de l'intensité estimée \hat{I} en fonction de celle de l'image radar.

$$I = F(\hat{I}) = \sum_0^d a_d \hat{I}^d \quad (8.7)$$

$$\hat{I} = F^{-1}(I) \quad (8.8)$$

avec d le degré du polynôme, et a_d les coefficients de la fonctions F . La figure (Fig 8.13) nous montre que F sera une fonction monotone relativement régulière. Son inversion devrait donc être aisément déterminée.

Evidemment, et comme précédemment décrit lors du calcul de l'erreur, toutes les intensités ne sont pas employées directement pour l'estimation des coefficients. Pour pallier le speckle, on utilise les intensités radar moyennes \bar{I} intervenant pour chaque valeur \hat{I} , estimée à partir de la carte d'altitude résultant du premier procédé, et selon l'expression (Eq 4.6). De plus, on considère uniquement les couples (\bar{I}, \hat{I}) où \bar{I} est calculée à partir d'échantillons de taille suffisamment importante.

Reste à définir le degré du polynôme. Il faut tout d'abord préciser un peu mieux, l'apport de ces deux transformations. En ce qui concerne la transformation F , elle permet d'obtenir, de manière approchée, le modèle de rétrodiffusion correspondant au mieux à nos données. En ce qui concerne la transformation inverse à F , elle est essentielle à notre procédé, puisqu'elle nous permet de ramener facilement le modèle de rétrodiffusion de l'image radar traitée au cas lambertien, soit de projeter en quelques sortes l'intensité radar d'origine vers une donnée lambertienne. Cette transformation intervient donc uniquement sur les données radar initiales, et permet ainsi la réalisation d'une seconde restitution du relief par le procédé décrit au chapitre 4. Le choix du degré dépend donc uniquement de la fonction F , mais il faut remarquer que plus le degré sera petit plus l'inversion sera simple. On procède donc par applications successives suivant le principe des moindres carrés, en partant du degré 1, et en l'augmentant à chaque nouvelle application. Pour l'exemple utilisé jusqu'à présent, le degré 2 pour la fonction F semble suffisant. La correspondance avec les points ayant permis l'estimation des coefficients est alors quasiment parfaite. On obtient aisément :

$$I = \alpha \bar{I}^2 + \beta \bar{I} + \gamma \quad (8.9)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{2\alpha} \left(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha(\gamma - I)} \right) \quad (8.10)$$

La figure (Fig 8.14) illustre le comportement de cette fonction. Il ne reste donc plus qu'à inverser cette fonction selon le principe présenté précédemment. La figure (Fig 8.15) présente le comportement de la fonction inverse obtenue. Comme on peut le constater, elle diffère de la loi de Lambert, mais en reste proche. D'autre part, il faut insister sur le fait que, cette simple transformation qui est destinée à être appliquée sur les données SAR d'origine n'aura aucune incidence sur le speckle présent. Ce n'est pas un filtrage. De ce fait, tout le procédé développé au chapitre 4 est à utiliser.

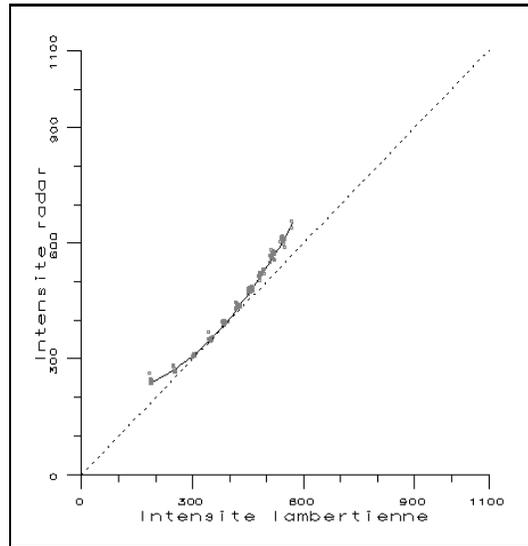


FIG. 8.14 – Représentation de la fonction F , modèle de rétrodiffusion correspondant au mieux à nos données SAR. Ce modèle est une composition de loi de Lambert, sous la forme d'un polynôme de degré 2. Les points représentés sont ceux ayant permis de déterminer les coefficients du polynôme.

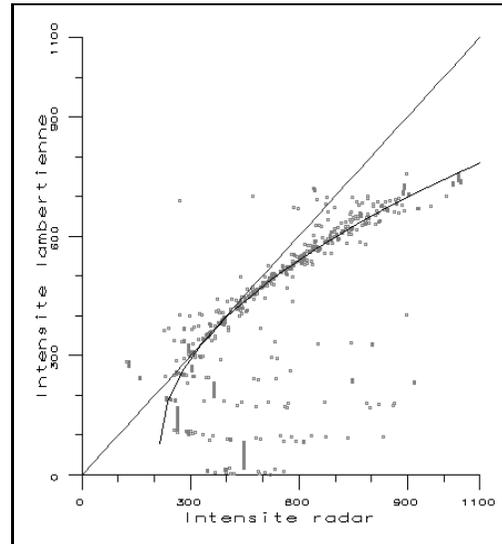


FIG. 8.15 – Représentation de la fonction inverse à F (polynôme de degré 2), vis à vis de l'ensemble des intensités moyennes radar correspondant à chaque intensité lambertienne déduite de la carte d'altitude (Fig 4.12).

Le principe de cette méthode de réévaluation est donc assez simple. Partant d'une première restitution du relief, elle consiste à déterminer la transformation qui permettra ensuite de modifier les intensités radar d'origine en intensités lambertiennes, et de façon à procéder à une seconde restitution. D'un point de vue qualitatif, les résultats altimétriques obtenus suivant ce principe sont comparables à la première carte du relief restituée. Numériquement, il y a également très peu de différences, les altitudes étant légèrement inférieures à celle de la première carte d'altitude. Ceci est dû au fait que le modèle de rétrodiffusion réévalué par le principe exposé ici est d'une part très proche du modèle de Lambert, et d'autre part ne modifie en rien la présence du speckle.

8.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes exclusivement intéressés à la vérification de l'usage correct de la loi de Lambert. Trois différentes méthodes ont été proposées pour cette vérification. Deux d'entre elles, méthodes théoriques et expérimentales, se sont avérées bien trop complexes et donc inefficaces pour l'établissement du modèle de rétrodiffusion. En revanche, l'utilisation des reliefs obtenus par le procédé de radarclinométrie développé a permis d'une part de démontrer le usage correct du modèle de Lambert dans le cas d'images radar de la Guyane, acquises par le système ERS-1, et toutefois de proposer une méthode de réévaluation du modèle. Cette technique mérite d'être plus amplement approfondie et testée par simulation de manière à en évaluer la robustesse.

Chapitre 9

Conclusion

L'étude que nous avons présentée, a entièrement été consacrée à la radarclino-métrie, qui est une des méthodes de restitution du relief à partir d'images de radar à ouverture synthétique. Sans trop de raisons, cette méthode a longtemps été laissée de côté pour le compte de techniques d'une part plus courantes telles que la radargrammétrie, et d'autre part plus modernes telles que l'interférométrie. Notre objectif était donc de développer cette méthode de restitution, et d'en évaluer le plus précisément possible les performances. A ce titre, nous proposons un procédé original, permettant d'avoir rapidement accès à des données d'altitude du terrain. Le principal avantage de cette approche est de calculer les éléments sur l'orientation du terrain uniquement à partir de la connaissance de la radiométrie acquise par le capteur. De ce fait, elle ne nécessite l'usage que d'une seule et unique image radar contrairement aux deux autres méthodes.

La démarche suivie au cours de nos travaux peut se résumer en 4 principales étapes.

- La première étape s'appuie d'une part sur le principe du fonctionnement des systèmes radar satellitaires, et d'autre part sur l'analyse de l'image délivrée par un tel système. Ces deux études nous ont permis d'identifier les contraintes géométriques ainsi que les divers paramètres liés au système imageur utiles à notre problème, et de proposer une modélisation pour le terrain imagé. Au cours de cette étape, une première hypothèse sur la réponse électromagnétique du terrain vis-à-vis des ondes radar s'est avérée nécessaire. Elle porte sur ce que l'on appelle couramment le coefficient de rétrodiffusion. Sans connaissance a priori de ce coefficient, ni de possibilités d'évaluation à ce stade des travaux, nous avons donc considéré par simplification le cas lambertien. Ceci a permis d'établir la relation entre l'intensité reçue par le capteur et les paramètres liés à l'orientation du terrain.
- Partant de cette relation, le problème a alors consisté à élaborer une stratégie pour accéder à des informations altimétriques à partir de la radiométrie de l'image radar. Ceci constitue la deuxième étape de la démarche, le "cœur" de cette thèse. La stratégie développée se découpe en 3 phases. La première est une phase d'inversion de la relation établie précédemment, suivie d'une intégration selon les lignes de l'image, nécessitant l'utilisation d'une hypothèse sur la radiométrie d'un sol de réf-

rence. Nous avons également posé, et justifié, une approximation sur l'orientation du terrain vis-à-vis du capteur, permettant ainsi l'obtention, par inversion, de données correspondant à la déclivité locale du terrain, et, par intégration, d'une première carte d'altitude. Cette carte comporte de très sérieux défauts du fait de la présence de speckle sur l'image initiale. Nous avons démontré que filtrer l'image n'est pas la solution appropriée à l'élimination de ces défauts. Nous avons donc proposé une seconde phase dite de correction, correspondant à une restauration markovienne. Cette phase s'est avérée efficace, mais demande à être correctement initialisée par une carte d'altitude relativement proche de la réalité. Cette initialisation correspond à la dernière phase de la stratégie, et consiste à une reconstruction nettement plus adaptée à la présence du speckle, impliquant plusieurs directions de profil contrairement à la première intégration.

- La troisième étape est dédiée à la validation de la méthode de restitution employée. Deux grandes techniques d'évaluation ont été considérées, d'une part par l'utilisation d'images radar simulées, et d'autre part par la comparaison directe des reliefs restitués à divers types de données cartographiques de référence (MNT, cartes topographiques, et autres). Ces deux techniques se sont avérées très différentes, n'impliquant pas les mêmes problèmes. Pour la simulation, il nous est difficile de vérifier que la modélisation du bruit utilisée correspond réellement à celui introduit par le fouillis végétal revêtant la surface d'un terrain. Pour la comparaison avec des données cartographiques précises, ce sont plus des problèmes de recalage et de résolution qui interviennent. Ces deux techniques ne permettent pas de conclure quant à la précision des cartes d'altitude obtenues par notre méthode de restitution. Elles montrent cependant que ces cartes sont qualitativement correctes, les formes et les positions des grandes structures du relief étant relativement bien respectées.

- La quatrième et dernière étape de notre travail est une justification de deux grandes hypothèses considérées. La première correspond à la connaissance d'une radiométrie de sol de référence, et plus précisément de sol plat. La justification de cette hypothèse est tout d'abord apportée, puis, nous proposons un moyen simple de son évaluation par recherche d'un équilibre dans le relief. La seconde hypothèse, bien plus importante à notre sens, a consisté à considérer que le coefficient de rétrodiffusion du terrain suit le modèle de Lambert. Elle demande à être finement vérifiée et si ce n'est pas le cas à être réévaluée. Nous avons décrit divers procédés effectuant cette réévaluation ; un seul pouvant être appliqué aux résultats de notre stratégie a été développé, et permet réellement de conclure sur la validité de l'hypothèse lambertienne. Cette méthode de réévaluation a été intégrée dans un processus itératif de manière à affiner la restitution.

Ainsi, notre recherche a apporté des solutions originales dans le développement de l'une des méthodes de restitution du relief à partir d'images radar. Nous avons montré que cette méthode conduit, au prix de coûts humains et informatiques modestes, à une reconstruction du relief de bonne qualité visuelle. Cependant, la validation numérique point à point de la carte d'altitude n'a pas pu être réellement mise en évidence, et plusieurs hypothèses sur l'origine des biais ont été posées sans qu'il

nous soit possible de les vérifier. Au niveau de l'utilisateur, la radarclinométrie, trop longtemps mise à part à notre sens, peut apporter de précieux renseignements altimétriques sur des régions du globe telle que la Guyane, pour lesquelles l'utilisation des deux autres méthodes de restitution se solde par un échec.

Les perspectives de prolongement de cette thèse sont nombreuses, sur tous les plans, aussi bien au niveau de la démarche suivie que sur les applications pouvant en découler.

Au niveau de la démarche, il faut voir que l'un des premiers problèmes liés à l'imagerie radar et auxquels on se trouve confronté est le speckle. Les filtres classiques, linéaires et non-linéaires n'étant pas appropriés, l'une des voies possibles serait l'utilisation d'une image radar multi-temporelle. Le multi-temporel permet la construction d'une image avec un grand nombre équivalent de vues, à partir d'images radar acquises à des dates différentes par un même capteur. A l'heure actuelle, de nombreuses études sont menées sur ce filtrage, et toutes montrent une très nette réduction du speckle. L'utilisation d'une telle image ne modifierait aucunement la démarche proposée, mais permettrait très probablement d'obtenir des données altimétriques bien plus proches de la réalité. D'autre part, une contribution bien plus importante que celle décrite précédemment peut être envisagée. Elle consiste à faire intervenir dans notre procédé des connaissances externes sur le terrain imagé. Ces connaissances peuvent être par exemple fournies sous la forme de points de contrôle établis lors d'une levée terrain, mais également sous la forme de primitives connues géographiquement telles que le bord des rivières, le trait de côte, etc. La stratégie développée demanderait alors à être adaptée de façon à prendre totalement en compte ces informations. Cette adaptation interviendrait à tous les niveaux de la restitution, au niveau de l'estimation de la radiométrie du sol plat et de l'étape de reconstruction, et également au niveau de la restauration markovienne : la précision des données altimétriques restituées serait probablement améliorée.

Au niveau de l'utilisation effective de la radarclinométrie, il faut souligner qu'elle établit des cartes d'altitudes certes peu précises, mais qui peuvent très certainement apporter des renseignements utiles aux deux autres méthodes de restitution. On peut envisager deux façons pour faire coopérer ces trois méthodes. La première approche serait d'utiliser la radarclinométrie uniquement comme une aide aux deux autres. Si l'on considère par exemple le cas de la radargrammétrie, on sait que le point sensible de cette technique est la mise en correspondance des couples d'images radar stéréoscopiques. La restitution par radarclinométrie pourrait alors présenter des informations non pas numériques mais plutôt structurelles et morphologiques du relief, et de ce fait faciliterait cette difficile étape de mise en correspondance. En résumé, cette façon de procéder n'impliquerait que partiellement les données fournies par la méthode que nous proposons. La seconde approche pourrait prendre en compte entièrement les résultats obtenus par radarclinométrie, et ainsi considérer que les trois méthodes de restitution sont complémentaires les unes des autres, chacune fournissant des données altimétriques plus ou moins précises. C'est cette voie de recherche qui sera à notre sens la plus exploitable, fondée sur la fusion de données

numériques [TANN-96]. Beaucoup de questions restent en suspens quant à l'élaboration de cette fusion. On peut effectivement se demander quel sera l'opérateur de fusion à utiliser, et également si la coopération ne reviendra pas à privilégier les résultats d'une des trois méthodes.

Un dernier point peut également être considéré pour la poursuite de nos recherches sur la radarclinométrie. Il consiste à exploiter au maximum les images radar multi-incidentes. Nous avons présenté au cours de notre étude quelques reliefs obtenus à l'aide de notre approche et utilisant de telles images. Comme nous l'avons déjà remarqué, ces résultats sont de qualité très différente suivant l'angle d'incidence du radar. Mais on pourra également opter pour des stratégies de fusion différentes, intervenant avant ou pendant la restitution du relief. Un travail d'adaptation des divers outils développés sera alors nécessaire, montrant ainsi que la radarclinométrie reste un sujet ouvert.

Annexe A

Limite sur la Longueur en Site d'une Parcelle

Le but de cette annexe est de calculer la limite sur la longueur L en site d'une parcelle.

A.1 Onde sphérique

La détermination de l'expression de la longueur L , portion en site interceptée par une cellule de résolution du radar, s'obtient entièrement par la connaissance de l'onde émise par le capteur SAR. D'après la figure A.1, la longueur en site $L(\alpha)$ est la longueur OT , d'angle α comprise entre deux fronts d'onde successifs. Nous considérons ici des ondes sphériques pour déterminer la valeur limite de $L(\alpha)$ quand α tend vers θ . Rappelons que dans l'approximation des fronts d'onde plans, $L(\alpha)$ tend vers l'infini.

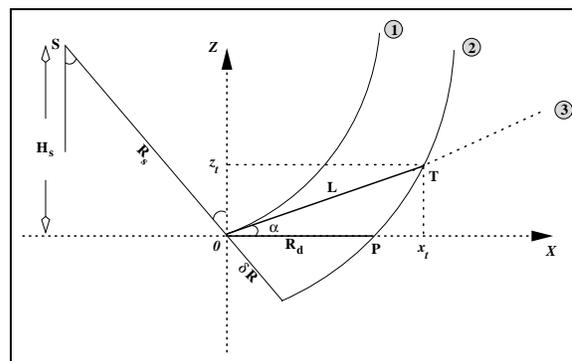


FIG. A.1 – Schématisation de la portion de terrain en site interceptée par une cellule de résolution radar dans le cas d'ondes sphériques.

Equation du problème

De la figure (Fig A.1), on déduit les équations des deux cercles (1) et (2), et de la

droite (3) :

$$(x + R_s \sin \theta)^2 + (z - R_s \cos \theta)^2 = R_s^2 \quad (\text{A.1})$$

$$(x + R_s \sin \theta)^2 + (z - R_s \cos \theta)^2 = (R_s + \delta R)^2 \quad (\text{A.2})$$

$$z = x \tan \alpha \quad (\text{A.3})$$

où R_s est la distance du point 0 au satellite.

Résolution

Au point P, on a : $x_p = R_d$ et $z_p = 0$, R_d étant supposé connu. L'équation A.2 s'écrit alors :

$$(R_s + \delta R)^2 = (R_d + R_s \sin \theta)^2 + (R_s \cos \theta)^2 \quad (\text{A.4})$$

Pour déterminer l'expression de la longueur L , on se place au point T. On a alors :

$$L = \frac{x_t}{\cos \alpha}$$

En utilisant cette dernière relation, ainsi que les équations A.3 et A.4, la relation A.2 s'écrit alors :

$$L^2 + 2LR_s \sin(\theta - \alpha) - (R_d^2 + 2R_d R_s \sin \theta) = 0$$

Il ne reste donc plus qu'à résoudre cette équation du second degré en L . Sachant que L doit être strictement positive, on utilise donc uniquement la racine vérifiant cette condition :

$$L = -R_s \sin(\theta - \alpha) + \sqrt{R_s^2 \sin^2(\theta - \alpha) + 2R_d R_s \sin \theta + R_d^2} \quad (\text{A.5})$$

Cette équation devrait remplacer l'équation 3.2 approchée obtenue sous l'hypothèse d'ondes planes. Ces deux équations ne diffèrent qu'au voisinage de $\alpha = \theta$, où la formule approchée donne une parcelle infinie tandis que la formule exacte A.5 donne la taille maximale de la parcelle :

$$\lim_{\alpha \rightarrow \theta} L = \sqrt{2R_d R_s \sin \theta + R_d^2}$$

Commentaire

Prenons l'exemple du système radar ERS-1, on trouve alors que la limite de L est de 3 km. Certes, on borne la longueur de terrain en site qui est interceptée par le radar. Mais, la solution trouvée paraît disproportionnée vis à vis de la réalité. En effet, une surface terrestre de 23° de déclivité sur une distance de 3 km, ce qui donne une pente d'environ 40%, est plutôt rare !

A.2 Passage de l'onde sphérique à l'onde plane

A partir de l'expression de la longueur en site établie précédemment (Eq A.5), on cherche à retrouver l'expression obtenue dans le cas de l'approximation en onde plane au chapitre 3.

L peut encore s'écrire :

$$L = R_s \sin(\theta - \alpha) \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2R_d \sin \theta}{R_s \sin^2(\theta - \alpha)} + \frac{R_d^2}{R_s^2 \sin^2(\theta - \alpha)}} \right)$$

Sachant que R_s est très largement supérieur à R_d , un développement limité de l'expression précédente peut donc être réalisé. On obtient alors :

$$L = \frac{R_d \sin \theta}{\sin(\theta - \alpha)} + O^2\left(\frac{R_d}{R_s}\right)$$

On retrouve bien l'expression de la longueur en site établie au chapitre 3.

Annexe B

D'autres Résultats

Nous proposons dans cette annexe diverses cartes d'altitude résultant de notre procédé de restitution décrit au chapitre 4. Elles recouvrent des surfaces terrestres, se trouvant principalement en Guyane, mais aussi en France et au Cameroun. Pour chacun des résultats, nous apporterons quelques commentaires sur les divers problèmes rencontrés lors de la restitution.

B.1 La Guyane

La Guyane est la région qui a été le plus étudiée au cours de cette thèse. Les zones recouvrent des terrains de morphologies très différentes. La figure (Fig B.1) illustre la position de ces zones. Nous présentons, dans ce qui suit, les résultats de chacune d'elles, et apportons quelques commentaires.

B.1.1 Zones 1, 2 et 3

Ces trois zones ont été largement détaillées tout au long de ce manuscrit, au niveau de la stratégie (chapitre 4), au niveau de l'estimation de la radiométrie du sol plat (chapitre 7), et au niveau de la quantification des reliefs restitués (chapitre 6). Nous ne détaillons pas à nouveau ici, les résultats de ces trois zones que l'on peut consulter en figure (Fig 6.2), (Fig 4.12) et (Fig 4.20). Apportons cependant apporter un dernier commentaire concernant plus précisément la zone 1.

Ses dimensions sont de 6 km \times 6 km en surface terrestre, soit 480 \times 480 pixels pour l'image radar. L'étendue maximale des massifs est de l'ordre de 130 pixels, pour une altitude allant jusqu'à 215 mètres d'après la carte IGN au 1/50.000^{ième}. La zone est donc relativement petite, tout comme la gamme d'altitudes. Ceci peut contribuer à expliquer la faible qualité numérique constatée au chapitre 6.

B.1.2 Zones 4

Cette zone recouvre un important massif, la montagne des *Trois Roros*. Ses dimensions sont de 25 km \times 25 km. L'altitude maximale de cette zone est de 406

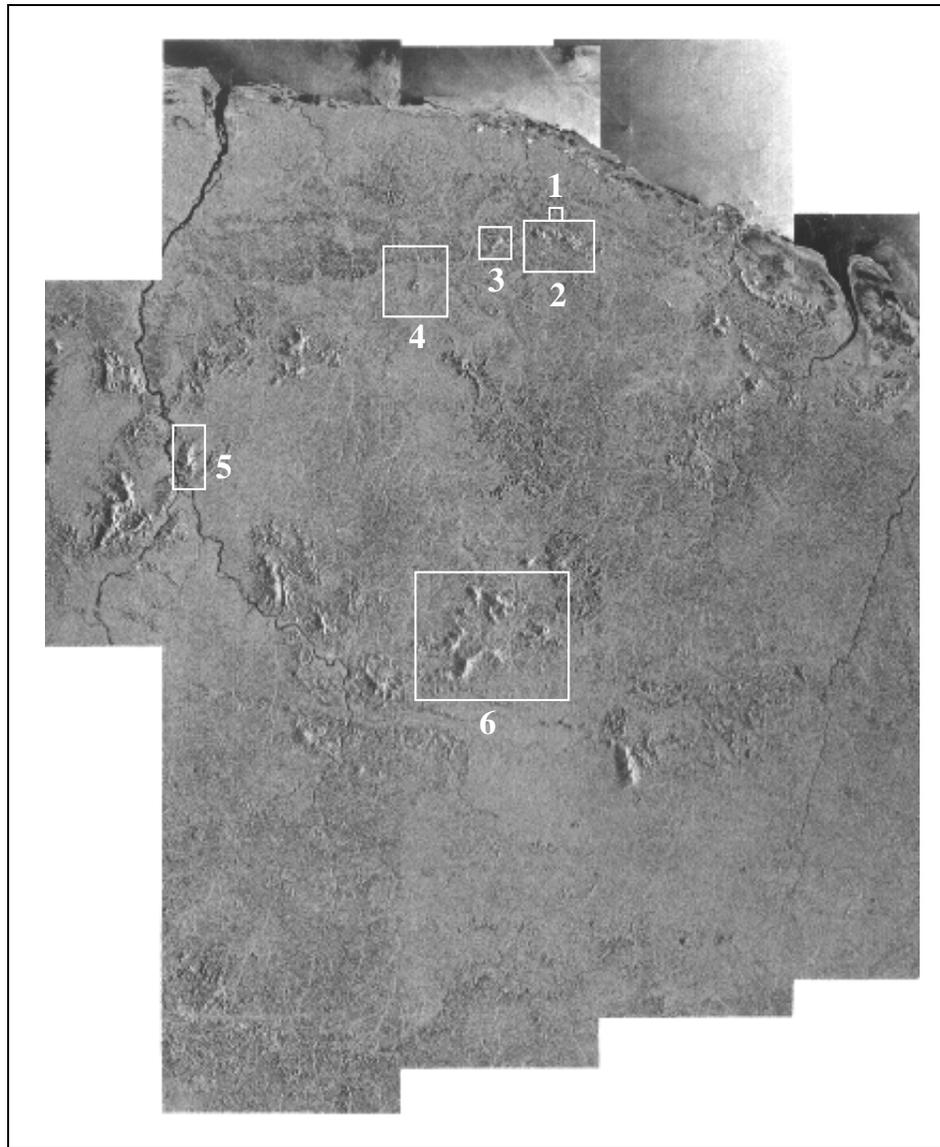


FIG. B.1 – Localisation des 6 zones de Guyane étudiées. Mosaïque d'images ERS-1, réalisée au Département Images de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications par J.M. Rosaz et H. Maître, avec la collaboration de J.P. Rudant, Université Pierre et Marie Curie - laboratoire LGGST.

mètres, selon la carte touristique de l'IGN.

L'image radar, provenant de l'acquisition par le système SAR ERS-1, est illustrée par la figure (Fig B.2). Selon les procédés successifs de la restitution décrits au chapitre 4, on obtient une première carte d'altitude (Fig B.3) par intégration suivant diverses directions, puis une carte finale (Fig B.4) après le processus markovien. Comme pour les autres reliefs présentés au cours du manuscrit, ce résultat, par comparaison au

MNT de l'IGN illustré par la figure (Fig B.5), présente de fins détails du relief restitué correspondant aussi bien aux diverses lignes de crêtes qu'aux lits des rivières. Ces détails se retrouvent également dans la carte d'altitude (Fig B.6) obtenue à partir des données RADARSAT.

B.1.3 Zone 5

Cette zone est située à l'EST de la Guyane, au bord du fleuve *Maroni*, frontière naturelle avec le Suriname. Elle recouvre un important massif montagneux : *Les Montagnes Françaises (GAA KABA)*, d'altitude maximale de l'ordre de 552 mètres.

L'usage de cette zone acquise par un même capteur radar (ERS-1) sous deux angles d'incidence différents, mais restant relativement proches ($19,5^\circ$ pour l'une, 25° pour l'autre) peut nous permettre encore ici, après restitution du relief par notre procédé, de quantifier les différences. La figure (Fig B.7) illustre le contenu de ces deux extraits de scène ERS-1. L'angle d'incidence d'acquisition n'est pas le seul élément de différence entre ces deux extraits. La date d'acquisition fait également partie de ces différences, l'une des scènes ayant été acquise le 20 avril 1992, et l'autre le 10 juin 1992. Ceci implique donc probablement une pluviométrie, et un état surfacique végétal différents.

Un dernier point est à remarquer à la vue des données radar (Fig B.7), avant de procéder à la restitution du relief. Il porte sur la présence d'un fleuve large (*Le Maroni*) dans nos données initiales. Or, comme décrit au chapitre 7, le fait d'être en présence de deux surfaces de nature différente (le couvert végétal et l'eau) demanderait une segmentation initiale en régions homogènes. Nous n'avons pas réalisé cette segmentation, préférant utiliser les données de manière aveugle. C'est aussi un moyen de vérifier l'incidence de cette inhomogénéité sur le relief par notre procédé de restitution.

Les reliefs obtenus sont illustrés par la figure (Fig B.8). Leurs formes sont qualitativement en bon accord. Les fins détails se retrouvent facilement et identiques dans les deux reliefs. Le fait de ne pas avoir segmenté initialement les données SAR a une incidence sur la partie droite de la scène, mais aussi par translation des altitudes sur toute la scène. Le fleuve apparaît tel un fossé, et l'un de ses bords donne l'impression de falaise. Le reste du relief semble donc sur-estimé. La gamme d'altitudes, identique pour les deux restitutions, confirme largement cette dernière impression. Elle s'étale entre 0 mètre au niveau du fleuve à environ 770 mètres au point le plus élevé du relief. Il y a donc un important écart avec les valeurs lues dans la carte IGN. Malgré cet écart, on peut toutefois vérifier l'effet de l'angle d'incidence, par comparaison entre les deux reliefs. L'écart altimétrique point par point entre les deux modèles est relativement important. Il atteint une valeur maximale de plus de 200 mètres, et un écart type de 25 mètres. On pourrait encore ici reprendre les conclusions établies au chapitre 6. Mais il faudrait très certainement, pour cette application, y associer le problème de recalage ainsi que celui dû à l'inhomogénéité du couvert.

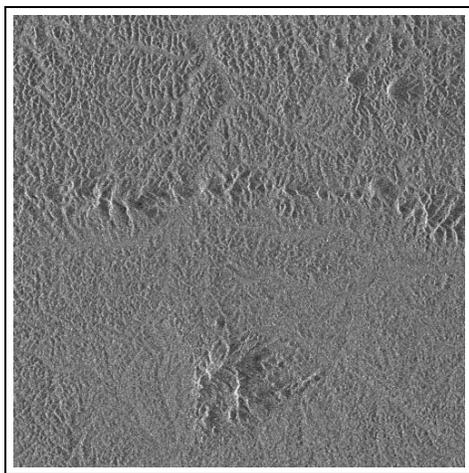


FIG. B.2 – Image radar acquise par le système ERS-1 de massifs montagneux guyanais (montagne des Trois Roros) (zone 4 de la figure (Fig B.1)).

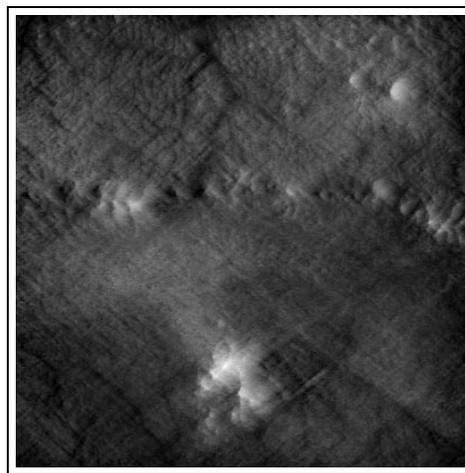


FIG. B.3 – Carte d'altitude résultant de l'intégration suivant diverses directions, à partir de l'image radar (Fig B.2).

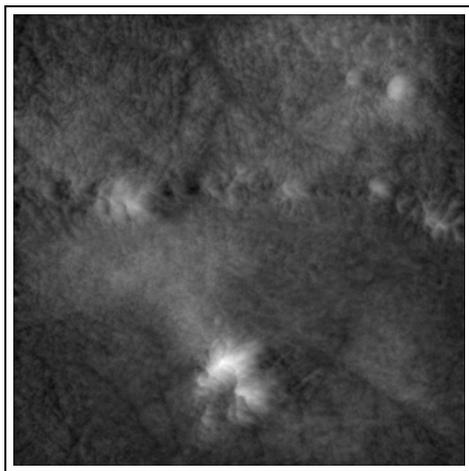


FIG. B.4 – Carte d'altitude obtenue après restauration markovienne, à partir de l'image radar (Fig B.2) et de la carte initiale (Fig B.3).



FIG. B.5 – Détail de la zone extraite du MNT de la Guyane (source IGN/CEGN), issue de la figure (Fig 6.6).

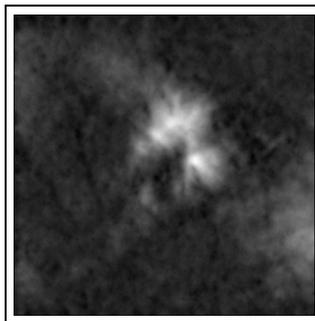


FIG. B.6 – Détail de la montagne des Trois Roros, à partir de données SAR acquises par le système RADARSAT.

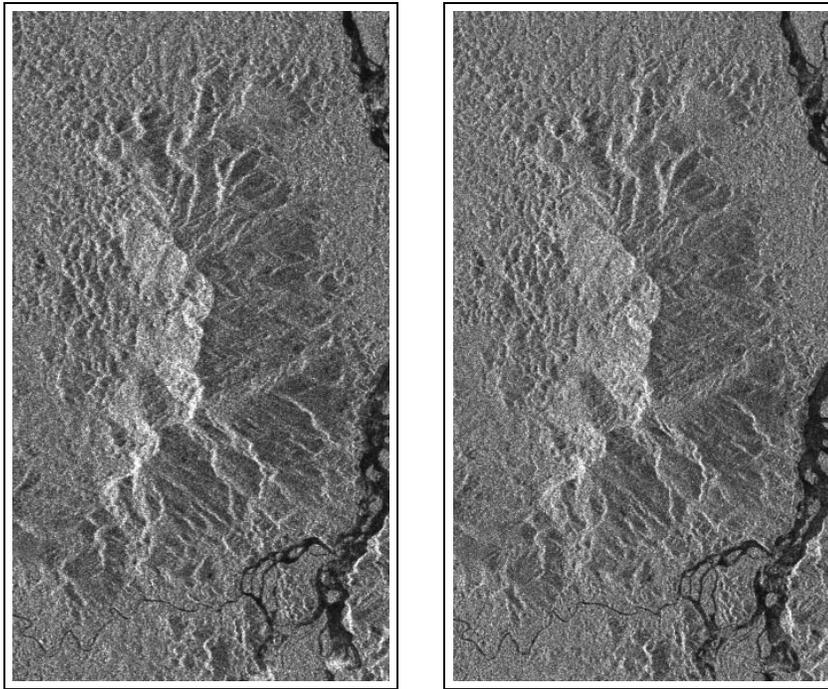


FIG. B.7 – *Extrait de bord de scènes acquises par le système ERS-1 de la zone 5. A gauche : l'angle d'incidence θ des ondes émises par le radar est de $19,5^\circ$, à droite : l'angle est de 25° .*

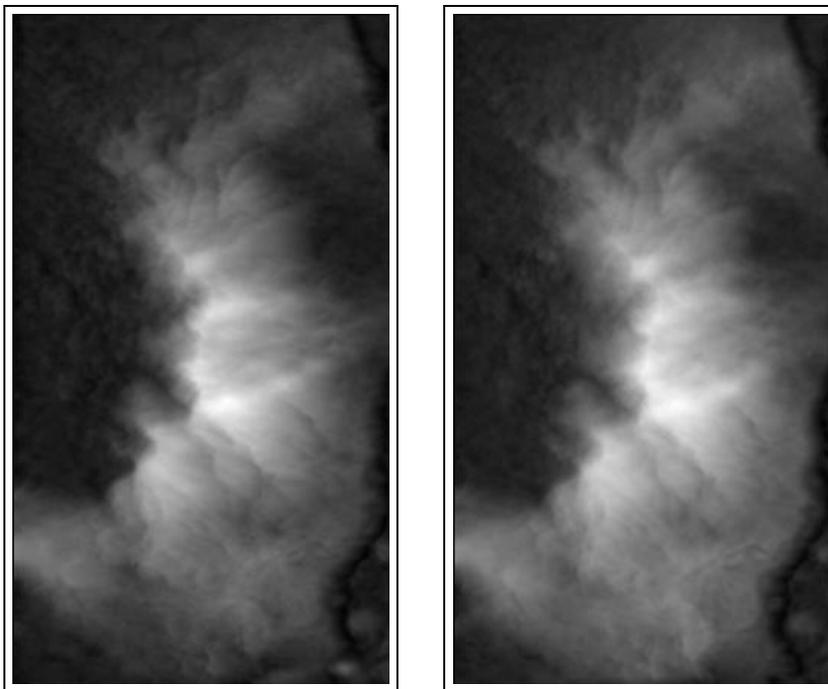


FIG. B.8 – *Reliefs obtenus par notre procédé de restitution à partir de l'utilisation séparée des deux images radar (Fig B.7), et sans aucune segmentation initiale du fleuve.*

B.1.4 Zone 6

Cette dernière zone se situe au sud de la Guyane. C'est la région la plus élevée, l'altitude maximale atteignant 848 mètres, mais aussi la moins bien connue, et de ce fait la moins bien cartographiée. C'est à ce titre un bon exemple de l'apport possible de la radarclinométrie dans les zones mal topographiées.

L'image radar acquise par le système radar ERS-1 est illustrée par la figure (Fig B.9). Elle recouvre une surface au sol de 3125 km^2 (soit 4000×5000 pixels), et de ce fait, constitue la plus grande surface terrestre traitée au cours de la thèse. Comme décrit au chapitre 4, nous établissons une première carte d'altitude par intégration en ligne suivant diverses directions, de façon à atténuer le plus possible l'effet du speckle. Dès cette étape, les limitations dues à la taille de l'image sont sensibles. Nous sommes amenés à limiter le nombre d'orientations d'estimation (conformément à la figure (Fig 4.16)), cette carte est représentée en figure (Fig B.10), une vue 3D de ce relief est associée en figure (Fig B.11). On peut tout d'abord constater que les structures fines, initialement présentes dans les données SAR, ont été préservées par ce processus d'intégration. La gamme d'altitude est aussi très proche de la réalité, elle est comprise entre 0 mètre et 823 mètres. Il reste cependant des défauts que seul le processus markovien peut réduire. Or, ce dernier processus n'a pu être employé pour des raisons de temps de calcul et de mémoire machine. On pourrait envisager de réduire la résolution, mais il est alors nécessaire d'établir un nouveau jeu de paramètres pour le recuit simulé. Un simple filtrage par la moyenne peut dans ce cas s'avérer suffisant, mais les fins détails se retrouvent alors estompés. Une impression de flou apparaît par ce filtrage. Un redécoupage en plus petites zones serait un moyen pour l'utilisation du processus markovien (nous pensons présenter ces résultats lors de la soutenance).

B.2 France Métropolitaine

La région étudiée se situe au sud-est de la France. Elle comporte un massif montagneux – *la montagne Sainte-Victoire* – fort connu et privilégié des cartographes, permettant une réelle mise à l'épreuve de tout algorithme se proposant de restituer le relief. Son altitude maximale est de 1011 mètres. Elle présente une abrupte falaise qui se traduit par de forts recouvrements lors de l'acquisition par le radar. Donc en théorie, cette région est particulièrement inadaptée à notre procédé de restitution. Ce n'est pas la seule caractéristique qui va à l'encontre de notre méthode. En effet, le couvert de cette zone est assez inhomogène, présence de nombreuses habitations, de cultures dans les vallées, et d'un couvert végétal naturel assez variable suivant l'altitude, et dégradé par des incendies dont les effets sont très irréguliers. Mais, c'est encore ici le moyen de connaître un peu mieux l'incidence de ces caractéristiques sur la restitution par radarclinométrie.

L'image radar de cette région, acquise par le système SAR ERS-1, est illustrée en figure (Fig B.12). Elle couvre une étendue de 12 km^2 . Par une simple intégration en ligne suivant des directions différentes, de part et d'autre de l'axe en site (axe défini

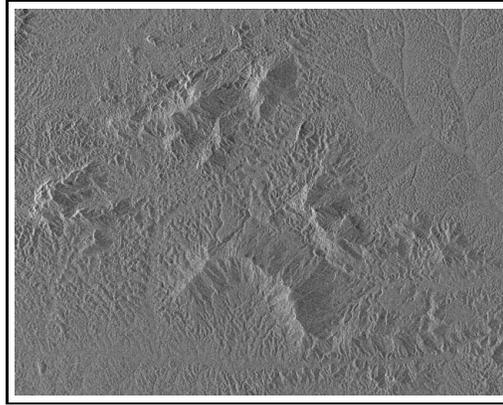


FIG. B.9 – Image radar acquise par le système radar ERS-1, de la région 6 (zone la plus élevée de la Guyane).

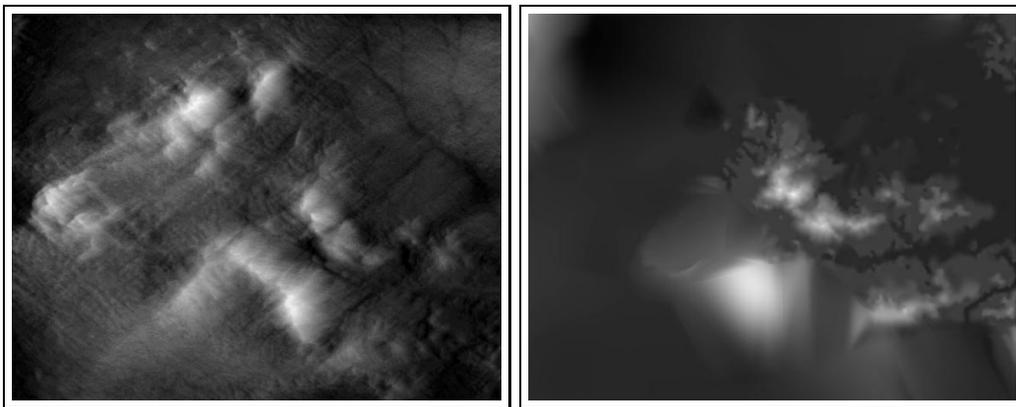


FIG. B.10 – A gauche : relief obtenu à partir de l'image radar représentée en figure (Fig B.9) par simple intégration en ligne suivant diverses directions ; à droite : détail de la zone extraite du MNT de la Guyane (source IGN/CEGN), issue de la figure (Fig 6.6).

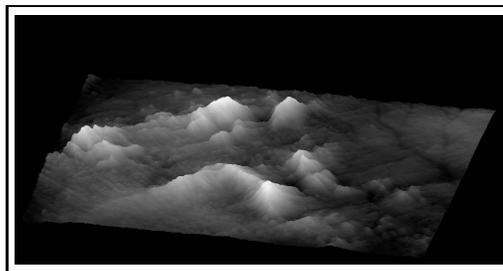


FIG. B.11 – Représentation 3D du relief présenté en figure (Fig B.10).

par la direction de visée du radar), on obtient aisément la première carte d'altitude, illustrée par la figure (Fig B.13). Au niveau numérique, les données altimétriques semblent assez réalistes, puisqu'elles sont comprises entre 0 mètre et 960 mètres. On peut donc conclure que ce processus est bien adapté, tout d'abord, pour réduire l'effet du speckle, mais également pour atténuer les effets dus à la présence de recouvrement et d'inhomogénéité dans les données SAR initiales. Ce résultat n'est cependant pas optimal, souffrant de la présence de défauts au niveau des structures du relief. La restauration markovienne serait des plus nécessaire pour contraindre le relief à être continu. Mais, ceci constitue un problème quant à son application effective. En effet, le modèle markovien présenté au chapitre 4 ne prend pas en compte la possibilité de recouvrement dans les données SAR. Il serait nécessaire de le modifier en conséquence. Par acquis de conscience, nous l'avons toutefois utiliser tel quel, mais comme attendu la continuité est bien trop privilégié dans ce processus, et de ce fait, le relief résultant se retrouve alors bien trop lisse et flou (Fig B.14).

B.3 Le Cameroun

Par sa couverture végétale très homogène, le Cameroun pourrait être comparé à la Guyane. Les massifs montagneux sont cependant d'une morphologie très différente. La région plus amplement étudiée se situe au sud-ouest, en bordure de l'océan atlantique. La figure (Fig B.15) illustre l'image radar acquise par le système ERS-1 de cette région (24 km² de surface).

Le procédé décrit au chapitre 4 est, encore ici, employé sans aucune modification. La première carte d'altitude obtenue par ce procédé est présentée par la figure (Fig B.16). Comme toutes les autres applications, ces premières données altimétriques se révèlent être relativement précises par la présence de fines structures dans le relief. Ces données constituent une bonne initialisation de notre processus markovien, permettant de reconstruire un relief sous contrainte de continuité surfacique. La carte d'altitude obtenue de ce processus, et finale à tout notre procédé de restitution développé, est illustrée par la figure (Fig B.17). La gamme d'altitude de cette carte est comprise entre 0 mètre et 290 mètres. Ses formes sont en accord avec les données SAR initiales. Toutefois, cette carte restituée demanderait encore une fois à être validée.



FIG. B.12 – Images radar de la montagne Sainte-Victoire, située au sud-est de la France, acquises par le système ERS-1.

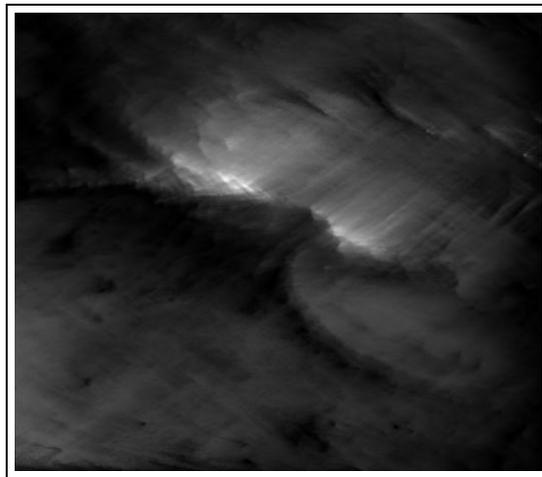


FIG. B.13 – Restitution de la montagne Sainte-Victoire par une simple intégration en ligne suivant des directions différentes de part et d'autre de l'axe en site.

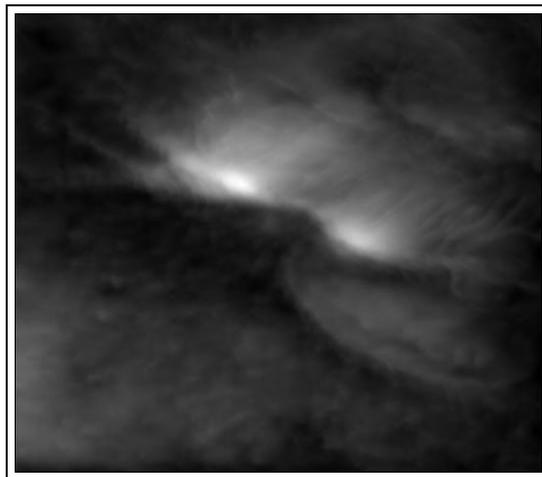


FIG. B.14 – Résultat final de la montagne Sainte-Victoire, par la totalité du procédé décrit au chapitre 4.

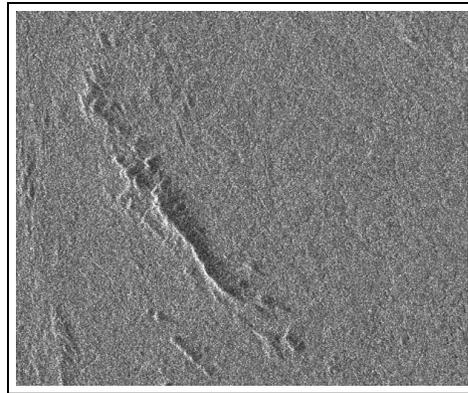


FIG. B.15 – Images radar ERS-1 d'une région sud du Cameroun. Le couvert végétal y apparaît très homogène ce qui remplit une des conditions d'utilisation de notre procédé de restitution.

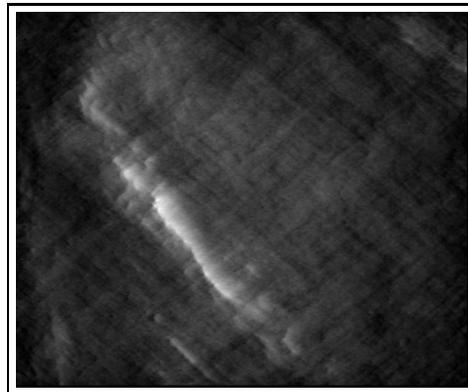


FIG. B.16 – Relief obtenu à partir de l'image radar (Fig B.15), et par une simple intégration en ligne suivant diverses directions de part et d'autre de l'axe en site. Cette carte relativement proche de la réalité permet l'initialisation du procédé markovien.

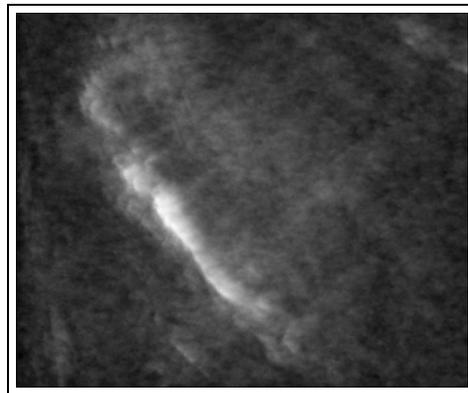


FIG. B.17 – Relief final obtenu à partir de l'image radar (Fig B.15), et résultant du processus markovien initialisé par la carte d'altitude figurant en (Fig B.16).

Bibliographie

- [ARMA-92] Pierre ARMAND and Daniel VIDAL-MADJAR. Synthetic Aperture Radar Simulation on Radar Terrain Clutter. *Proceedings of IEEE*, pages 189–191, 1992.
- [ARMA-94] Philippe ARMAND and Laurent POLIDORI. Simulation d'images de radar à synthèse d'ouverture. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, pages 131–136, 1994.
- [ARSE-84] Henri H. ARSENAULT and Martin LEVESQUE. Combined Homomorphic and Local-statistics Processing for Restoration of Images Degraded by Signal-dependent Noise. *Applied Optics*, 23(6):845–850, March 1984.
- [ARSE-86] Henri H. ARSENAULT and Gilbert V. APRIL. Information Content of Images Degraded by Speckle Noise. *Optical Engineering*, 25(5):662–666, May 1986.
- [BAYE-91] Thomas BAYER, Rudolf WINTER, and Gunter SCHREIER. Terrain Influences in SAR Backscatter and Attempts to their Correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(3):451–462, May 1991.
- [BIGN-95] Frank BIGNONE et Philippe NONIN. Une amélioration de la méthode spline plaque-mince en vue du calcul de Modèles Numériques de Terrain. In *Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, number 139, pages 20–31, 1995.
- [BLOC-94] Isabelle BLOCH. *Introduction à la Morphologie Mathématique*. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, mai 1994.
- [CHAR-94] P. CHARBONNIER. *Reconstruction d'images: régularisation avec prise en compte des discontinuités*. PhD thesis, Université de Nice Sophia Antipolis, 1994.
- [CURL-91] John C. CURLANDER and Robert N. McDONOUGH. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: Wiley, 1991.

- [DUPO-97] S. DUPONT, P. NONIN, G. PICHON, and L. RENOUARD. Artefacts atmosphériques: une limitation pour la génération de MNT inRSOERS. *Bulletin de la SFPT - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection.*, (146), 1997.
- [ELAC-88] Charles ELACHI. *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. 1988.
- [ELLI-94] Ken ELLIS. *Reflectance Phenomenology And Modeling Tutorial*. ERIM, <http://www.erim.org/on-line-docs/GUIDE/guide frm.html>, October 1994.
- [FITC-88] J. P. FITCH. *Synthetic Aperture Radar*. Springer-Verlag, 1988.
- [FJOR-95] R. FJORTOFT, P. MARTHON, A. LOPES, and E. CUBEROCASTAN. Edge detection in radar images using recursive filters. *ACCV'95 Second Asian Conference on Computer Vision*, 1995.
- [FORD-93] John P. FORD, Jeffrey J. PLAUT, Catherine M. WEITZ, Tom G. FARR, David A. SENSKE, Ellen R. STOFAN, Gregory MICHAELS, and Timothy J. PARKER. Guide to magellan image interpretation. JPL Publication, 1993-1994.
- [FRAN-87] Robert T. FRANKOT and Rama CHELLAPPA. Application of a shape from shading technique to synthetic aperture radar imagery. *Proceedings of IGARSS'87 Symposium*, pages 1323–1329, May 1987.
- [FRAN-88] Robert T. FRANKOT and Rama CHELLAPPA. A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(4) :439–451, 1988.
- [FRAN-90] R. FRANKOT and R. CHELLAPPA. Estimation of surface topography from sar imagery using shape from shading techniques. *Artificial Intelligence*, (43) :271–310, 1990.
- [FRAN-94] G. FRANCESCHETTI, M. MIGLIACCIO, and D. RICCIO. SAR Simulation of Natural Landscapes. *Proceedings of IGARSS'94 Symposium*, pages 1181–1183, 1994.
- [GEMA-84] Stuart GEMAN and Donald GEMAN. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, PAMI-6(6) :721–741, November 1984.
- [GOOD-75] J. W. GOODMAN. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In J. C. Dainty, editor, *Laser speckle and related phenomena*, volume 9, pages 9–75, Heidelberg, 1975. Springer-Verlag.

- [GOOD-76] J. W. GOODMAN. Some Fundamental Properties of Speckle. *Journal Optical Society of America*, 66 :1145–1150, 1976.
- [GOUI-95] Christophe GOUINAUD and Isabelle PONS. *Etude sur les paramètres angle d'incidence et heure locale d'acquisition d'un futur SAR*. Contrat CNES : 95/0128, juin 1995.
- [GOUI-96a] Christophe GOUINAUD and Isabelle PONS. Use of geometrical SAR simulation for visibility prediction : Application to mission planning and urban study. *Proceedings of IGARSS'96 Symposium*, 1 :257–259, May 1996.
- [GOUI-96b] Christophe GOUINAUD. *Traitement d'Images Satellitaires pour la Détection d'Agglomérations*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, décembre 1996.
- [GUIN-90] Bert GUINDON. Development of a Shape-From-Shading Technique for the Extraction of Topographic Models from Individual Spaceborne SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4) :654–661, July 1990.
- [HARD-95] Jean-Philippe HARDANGE, Philippe LACOMME, and Jean-Claude MARCHAIS. *Radars Aéroportés et Spatiaux*. MASSON, 1995.
- [HEGA-96] Sylvie LE HEGARAT-MASCLE. *Classification Non Supervisée d'Images SAR Polarimétriques*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, septembre 1996.
- [HOLE-93] Francesco HOLECZ, Erich MEIER, and Daniel NUESCH. *Postprocessing of Relief Induced Radometric Distorted Spaceborne SAR Imagery.*, chapter 14, pages 299–352. Wichmann, gunter scheier edition, 1993.
- [HORN-75] B. HORN. *Obtaining Shape from Shading Information*. McGraw-Hill Book Company, 1975.
- [HORN-90] B. HORN. Height and gradient from shading. *IJCV*, 5(1) :37–75, 1990.
- [JUNG-89] Claudine JUNG. *Etude et Correction de l'Influence du Relief sur la Radiométrie d'une Image Radar à Ouverture Synthétique par Simulation de la Réponse Radar*. PhD thesis, Université PARIS 7, 1989.
- [KASI-94] Eric S. KASISCHKE, Norman L. CHRISTENSEN Jr., and Eric M. HANEY. Modeling of Geometrie Properties of Loblolly Pine Tree and Stand Characteristics for Use in Radar Backscatter Studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4) :800–820, July 1994.
- [KEND-52] M. G. KENDALL and A. STUART. *The Advanced Theory of Statistics*, volume 1. Charles Griffin & Company Limited, London, third edition, 1952.

- [KUAN-85] D. T. KUAN, A. A. SAWCHUK, T. C. STRAND, and P. CHAVEL. Adaptive noise smoothing filter with signal dependant noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (2) :165–177, March 1985.
- [LAUR-89] Henri LAUR. *Analyse d' Images Radar en Télédétection. Discriminateurs Radiométriques et Texturaux*. PhD thesis, Université Paul SABATIER de Toulouse (Sciences), 1989.
- [LEBE-90] Franz W. LEBERL. *Radargrammetric Image Processing*. Artech House, 1990.
- [LEE-80] J. S. LEE. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Patern Analysis and Machine Intelligence*, (2) :165–168, March 1980.
- [LEVI-68] Leo LEVI. *Applied Optics: a Guide to Optical System Design*, volume 1. John Wiley & Sons, Inc., 1968.
- [LEVO-96] Marc LEVOY. *Computer Graphics: Image Synthesis Techniques*. Spring Quarter, 1996.
- [LIN-95] Yi-Cheng LIN and Kamal SARABANDI. Electromagnetic scattering model for a tree trunk above a tilted ground plane. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4) :1063–1070, July 1995.
- [LIND-93] Wilfried LINDER and Heinz-Friedrich Meuser. *Automatic Tiepointing in SAR Images.*, chapter 9, pages 207–212. WICHMANN, gunter schreier edition, 1993.
- [LOPE-93] A. LOPES, E. NEZRY, R. TOUZI, and H. LAUR. Structure detection, and statistical adaptive filtering in SAR images. *Int. J. Remote Sensing*, 14 :1735–1758, 1993.
- [MANG-95] Jean-François MANGIN. *Mise en correspondance d'images médicales 3D multi-modalités multi-individus pour la corrélation anatomofonctionnelle cérébrale*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST 95 E 010), 1995.
- [MARC-93] Williams MARCHIN. *Radar Engineer's Sourcebook*. Boston, Mass., Artech House, 1993.
- [MASS-93] D. MASSONNET et T. RABAUTE. Radar interferometry : Limits and potentials. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (3) :445–464, 1993.
- [MENC-96] Menegassi MENCHIK, M.T., and D. FERNANDEZ. Modeling and simulation of real aperture radar images. Proceedings of IGARSS'96 Symposium, May 1996.

- [MOOR-91] R. K. MOORE, M. S. OSMAN, R. ZOUGHI, and J. BREDOW. Measurements of radar backscatter from an artificial tree : an indication of azimuthal variations and polarization sensitivity of trees. *International Journal of Remote Sensing*, 12(3) :401–417, 1991.
- [NASR-89] Jean Marc NASR. *Etude et Réalisation d'un Simulateur d'Images de Cibles Géométriques Simples Vues par un Radar à Ouverture Synthétique Embarqué sur Satellite*. PhD thesis, Université Paris VII, 1989.
- [NEZR-92] Edmond NEZRY. *Restauration de la réflectivité radar. Application à l'utilisation conjointe des images des radars à synthèse d'ouverture et optiques en télédétection*. PhD thesis, Université Paul SABATIER de Toulouse (Sciences), 1992.
- [NICO-77] F. E. NICODEMUS, J. C. RICHMOND, J. J. HSIA, J. W. GINSBERG, and T. LIMPERIS. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. NBS Monogram 160, National Bureau of Standards, October 1977.
- [NICO-97] Jean-Marie NICOLAS. Les satellites de télédétection. capteurs optiques et capteurs radar. Cours d'option traitement des images. module SIS. systèmes d'imagerie satellitaire, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, mai 1997.
- [NOCE-96] Lucien NOCERA. *Reconstruction du Relief à partir d'Images de Satellite Radar à Ouverture de Synthèse: Stéréoscopie et Ombrages*. PhD thesis, Université PARIS VII, 1996.
- [OGOR-96] Benoît OGOR, Véronique HAESE-COAT, and Joseph RONSIN. SAR Image Segmentation by Mathematical Morphology and Texture Analysis. *Proceedings of IGARSS'96 Symposium*, 1:717–719, May 1996.
- [OLMS-93] Coert OLMSTED. Scientific SAR User's Guide. Technical report, Alaska SAR Facility, July 1993.
- [POLI-91a] Laurent POLIDORI. Digital Terrain Models from Radar Images : a Review. *Proceedings of International Symposium on Radar and Lidar in Earth and Planetary Sciences*, (ESA SP-328) :141–146, September 1991.
- [POLI-94a] Laurent POLIDORI. Apport de la Simulation d'Images à la Validation des Techniques de Cartographie Radar. *Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (138) :16–25, November 1994.
- [POLI-94b] Laurent POLIDORI and Pierre ARMAND. On the use of SAR image simulation for the validation of topographic mapping techniques. *EAR-SEL Advances in Remote Sensing*, 4(2) :40–48, 1994.

- [POLI-95a] Laurent POLIDORI. Réflexions sur la Qualité des Modèles Numériques de Terrain. *Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (139):10–19, May 1995.
- [POLI-95b] Laurent POLIDORI. Quality Specifications for Radar Derived Digital Elevation Models. *Proceedings of IGARSS'95 Symposium*, pages 208–209, May 1995.
- [RICA-96] Michael R. RICARD. Spaceborne SAR. ASE 389P - Remote Sensing from Space. Term Project: Sensor Portion., University of Texas at Austin, March 1996.
- [ROSE-82] Azriel ROSENFELD and Avinash C. KAK. *Digital Picture Processing*, volume 1. ACADEMIC PRESS, second edition, 1982.
- [ROSE-84] Azriel ROSENFELD. *Multiresolution Image Processing and Analysis*. Springer Verlag, BERLIN, 1984.
- [SCHA-89] Robert J. SCHALKOFF. *Digital Image Processing and Computer Vision*. John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [SHI-97] Jiancheng SHI, James WANG, Ann Y. HSU, Peggy E. O'NEILL, and Edwin T. ENGMAN. Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-band SAR Image Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5):1254–1266, September 1997.
- [SIGE-93] Marc SIGELLE. *Champs de Markov en Traitement d'Images et Modèles de la Physique Statistique: Applications en Relaxation d'Images de Classification*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, décembre 1993.
- [SKOL-70] M. I. SKOLNIK. *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1970.
- [SLUI-95] Hélène VAN DER SLUIJS. Extraction et reconstruction des courbes de niveau d'une carte géographique. Stage, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 1995.
- [STUO-96] Paul A. STUOPIS, James M. HENSON, and R.E. DAVIS. The modeling of forested areas for real and synthetic aperture imaging radar simulation. *Proceedings of IGARSS'96 Symposium*, 1:254–256, May 1996.
- [TANN-96] Issam TANNOUS, Frederic LE GOFF, and Claude PENICAND. Fusion of ERS 3D Information for DEM Generation. *Fusion of Earth Data, Cannes France*, February 1996.

- [TAUD-95] Hind TAUD and Jean-François PARROT. Qualitative digital elevation model from sar data. In Christopher J. OLIVIER, Shagram TAJBAKSH, Giorgio FRANCESCHETTI, and James C. SHIUE, editors, *SPIE Proceedings "Synthetic Aperture Radar and Passive Microwave Sensing"*, volume 2584, pages 226–233, September 1995.
- [TONO-93] M. TONON, J. P. RUDANT, D. SABATIER, E. NEZRY, F. de GRANDI, and A. SIEBER. Relief Estimation in Tropical Context (French Guyana) with SAR-ERS1 Imagery. *Proceedings Second ERS-1 Symposium*, (ESA SP-361) :1261–1265, October 1993.
- [TORR-67] K. TORRANCE and E. SPARROW. Theory for Off-Specular Reflexion From Roughened Surfaces. *Journal Optical Society of America*, 57, September 1967.
- [TROU-93] Emmanuel TROUVE. Recalage de données multispectrales et multi-sources sur un modèle numérique de terrain. Stage, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 1993.
- [TROU-96] Emmanuel TROUVE. *Imagerie Interférentielle en Radar à Ouverture Synthétique*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, juillet 1996.
- [TUPI-97] Florence TUPIN. *Reconnaissance des formes et analyse de scènes en imagerie radar à ouverture synthétique*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, septembre 1997.
- [ULAB-87] Fawwaz T. ULABY, Ahad TAVAKOLI, and Thomas B. A. SENIOR. Microwave propagation constant for a vegetation canopy with vertical stalks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(6) :714–725, November 1987.
- [VISS-94] Philippe VISSIERE. Perception du Relief à partir d'Images Radar ERS-1 par Méthode Radarclinométrique sur la Guyane Française. Mémoire de stage de DESS de Télédétection, Méthodes et Applications, juillet 1994.
- [WIDL-86a] Robert L. WIDLEY. Radarclinometry. *Earth, Moon and Planets*, 36 :217–247, 1986.
- [WIDL-86b] Robert L. WIDLEY. Radarclinometry for the Venus Radar Mapper. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(1) :41–50, January 1986.
- [WU-90] Y. WU and Henri MAITRE. A speckle suppression method for SAR images using maximum homogeneous region filtering. *Proceedings of IGARSS'90*, III :2413–2416, May 1990.

- [YUEH-92] Simon H. YUEH, J. A. KONG, Jen King JAO, Robert T. SHIN, and Thuy LE TOAN. Branching Model for Vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2) :390–402, March 1992.
- [ZEBK-86] H.A.ZEBKER and GOLDSTEIN. Topographic mapping from interferometric sar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91(B5) :4993–4999, 1986.