HAL
open science

Evaluation du potentiel de la technique PolInSAR pour l'estimation des paramètres physiques de la végétation en conditions satellitaires

Franck Garestier

To cite this version:

Franck Garestier. Evaluation du potentiel de la technique PolInSAR pour l'estimation des paramètres physiques de la végétation en conditions satellitaires. Physique [physics]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2006. Français. NNT : . tel-00080832

HAL Id: tel-00080832

https://theses.hal.science/tel-00080832

Submitted on 20 Jun 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

Mention : Astrophysique, Plasma, Corpuscules

par

Franck GARESTIER

Équipe d'accueil : UMR 5804-L3AB (Observatoire de Bordeaux)

École Doctorale : Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Évaluation du potentiel de la technique PolInSAR pour l'estimation des paramètres physiques de la végétation en conditions satellitaires

Soutenue le 26 janvier 2006 devant la commission d'examen :

Rapporteurs
Mme Thuy Le Toan : Ingénieur de Recherche Hors Classe, CESBIO, Université de Toulouse III
M. Eric Pottier : Professeur, IETR, Université de Rennes I

Examinateurs
Mme Irena Hajnsek : Ingénieur de Recherche, DLR, Allemagne
M. Jean-Paul Parneix : Professeur, ENSCPB, Université de Bordeaux I

Encadrants
Mme Pascale Dubois-Fernandez : Ingénieur de Recherche, ONERA, CSP
M. Philippe Paillou : Professeur, OASU, Université de Bordeaux I

Remerciements

C'est Pascale Dubois-Fernandez que je tiens en premier lieu à remercier pour m'avoir formé et encadré ces trois dernières années en m'ayant fait profiter de sa grande expérience dans la recherche, et pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer un séjour très enrichissant dans l'équipe PolInSAR du DLR. Je remercie sincèrement Philippe Paillou pour ses précieux conseils et sa disponibilité malgré la distance astronomique qui sépare l'ONERA de Salon de Provence de l'Observatoire de Bordeaux. Je désire également remercier Xavier Dupuis pour son aide dans l'encadrement de ma thèse et pour m'avoir représenté à l'étranger, ainsi qu'Olivier Ruault du Plessis pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Thuy Le Toan et Eric Pottier pour avoir porté un grand intérêt à mon travail de thèse, ainsi que Jean-Paul Parneix pour avoir présidé mon jury, et Irena Hajnsek pour avoir accepté de venir d'Allemagne en tant qu'examinatrice.

Durant cette thèse, j'ai eu l'occasion d'effectuer une coopération avec l'équipe PolInSAR du DLR pendant trois mois, où j'ai énormément appris. Je tiens donc à remercier Kostas Papathanassiou, Irena Hajnsek et Alberto Moreira, pour m'avoir fait participer à la vie du groupe. Je souhaite également exprimer ma gratitude envers Matteo Nannini, pour m'avoir formé au traitement SAR avec pédagogie, et envers Rafael Zandona-Schneider, Tobias Mette, Kaïs Ben Khadhra, Karlus Macedo, Angelo Liseno et Vito Alberga pour m'avoir accueilli au sein de leur confrérie.

Je souhaite remercier les personnes de l'INRA avec lesquelles j'ai eu l'occasion d'interagir de manière constructive : Isabelle Champion, Jean-Pierre Wigneron, Dominique Guyon, Annabel Porté et André Chanzy.

Je tiens à remercier Florian Leforestier pour ses conseils et son soutien inépuisable, ainsi que Jérôme Morio pour ces heures de l'après-midi, situées quelque part entre le radar et la philosophie. Je remercie également l'ensemble de l'équipe RIM pour ses nombreux coups de main, et plus particulièrement Daniel Heuzé et Colette Coulombeix pour leur aide dans les séances de manœuvres en plein air. De même, je tiens à dire merci aux autres personnes de l'ONERA qui m'ont apporté leur aide, qu'elle soit d'ordre technique, administratif ou informatique.

Je remercie également les enseignants de l'École de l'Air avec lesquels j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler : Pascal Rischette, Alain Deluzerieux, Patrick Difazio, Christophe Costes, Jacques Raout ; ainsi que Patrick Ré pour m'avoir fait confiance. Je souhaite également remercier mon binôme de cours, Sébastien Kolb, avec qui j'ai beaucoup appris.

Mes remerciements vont aussi à Yannick Lasne, pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences forestières, à Stéphane Guillaso et Andreas Reigber, pour m'avoir rendu service au moment où j'en avais besoin.

Je profite de l'occasion pour dire merci à deux enseignants qui m'ont particulièrement marqué, Daniel Moreau et Michel Rabinowicz, ainsi qu'à Hervé Carfantan, Loïc Jahan et Jean Arnaud, qui m'ont initié au Traitement du Signal.

Je souhaite maintenant remercier ceux qui m'ont soutenu sans pour autant avoir d'affinités particulières avec le radar, Fabrice, Bob, Sylvain, Fab, Yann, Julien, Arnaud, Speedy, Albin, Jacques, Lucas, JC, Jo, Yann, Fred, Nat, Caro, Hacène, Delphine, Wahid... ainsi que mes trois fidèles *cornichons du DEA*, Manu, Bertrand et Raymond.

C'est bien évidemment à mes parents que revient l'essentiel de ma reconnaissance, pour leur inestimable soutien tout au long de mes études, et pour leur compréhension dans les différents choix que j'ai eu à faire. Je souhaite également remercier mes grands-parents et le reste de ma famille car leurs encouragements ont été primordiaux durant cette longue période.

Enfin, je souhaite remercier de tout cœur Magali, dont le réconfort sans faille a été précieux durant ces trois années et est resté constant même dans la dernière ligne droite, si préjudiciable à la santé mentale.

Table des matières

Introduction **1**

1 L'interférométrie polarimétrique **5**
1.1 Introduction . . . 5
1.2 Formation des images SAR . . . 5
1.2.1 Principe du SAR . . . 5
1.2.2 Le filtrage adapté . . . 7
1.3 L'interférométrie . . . 11
1.3.1 Approche géométrique . . . 11
1.3.2 La cohérence interférométrique . . . 15
1.4 La polarimétrie . . . 19
1.4.1 Description de l'état de polarisation d'une onde . . . 19
1.4.2 Caractérisation des cibles naturelles . . . 22
1.4.3 Définition des paramètres polarimétriques . . . 24
1.5 Fondements de l'interférométrie polarimétrique . . . 28
1.6 La calibration de données PolInSAR . . . 32
1.6.1 Description du système RAMSES . . . 32
1.6.2 Principe de la méthode de calibration [Dubois-Fernandez 05] . . . 34
1.7 Exemple des structures urbaines en Bande X . . . 36
1.7.1 Les données RITAS . . . 36
1.7.2 Inversion de la hauteur des constructions urbaines . . . 41
1.8 Conclusion . . . 52

2 Analyse PolInSAR multi-fréquentielle de la végétation **53**
2.1 Introduction . . . 53
2.2 Bande L . . . 54
2.2.1 Présentation des données . . . 54
2.2.2 Inversion de paramètres à partir de données PolInSAR : le modèle RVoG 60
2.3 Bande X . . . 68
2.3.1 Les surfaces agricoles . . . 68
2.3.2 Inversion de la hauteur d'une forêt de pins . . . 74
2.4 Bande P . . . 85
2.4.1 Sensibilité radiométrique et polarimétrique à la biomasse . . . 85
2.4.2 Analyse PolInSAR et extraction de paramètres . . . 89
2.5 Conclusion . . . 108

3 Transposition aux conditions spatiales **111**
3.1 Le bruit thermique 112
3.1.1 Description du phénomène 112
3.1.2 Impact sur l'anisotropie polarimétrique en bande P 113
3.1.3 Effet du SNR sur la cohérence interférométrique 115
3.1.4 Biais sur l'extraction de paramètres 117
3.2 La résolution 118
3.2.1 Dégradation de la résolution : méthodologie 118
3.2.2 Impact sur l'information polarimétrique et PolInSAR en bande P 122
3.2.3 Impact sur l'information PolInSAR en bandes X et L 126
3.2.4 Biais sur l'extraction de paramètres 128
3.3 Discussion sur la fréquence 130
3.4 Conclusion 135

Conclusion **139**

Bibliographie **141**

Glossaire **155**

Introduction

Les systèmes d'observation spatiaux constituent un outil efficace pour l'étude de la surface terrestre car ils permettent une couverture de l'ensemble des régions du globe, ainsi que leur suivi temporel. L'imagerie radar SAR (Synthetic Aperture Radar) présente un intérêt particulier pour ce type de thématiques car ses performances sont indépendantes des conditions climatiques, à la différence des capteurs optiques, et car il est possible d'échantillonner la surface terrestre avec une bonne résolution.

De nombreuses applications des techniques spatiales basées sur l'imagerie SAR ont été révélées par l'apparition de la polarimétrie et de l'interférométrie. La polarimétrie radar, qui utilise une antenne émettant et recevant selon deux états de polarisation orthogonaux, permet une caractérisation fine des mécanismes de rétrodiffusion. Cette technique s'avère très efficace pour la discrimination des rétrodiffuseurs et pour l'identification des surfaces naturelles et urbaines. L'interférométrie radar est quant à elle une technique de mesure de la hauteur des centres de phase. La formation d'interférogrammes nécessite l'acquisition du signal par deux antennes décalées spatialement ou deux acquisitions effectuées par la même antenne à deux positions différentes. La carte de la différence de phase de ces signaux permet de calculer un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) à partir de la connaissance de la géométrie d'acquisition. La cohérence du signal interférométrique est également un outil de caractérisation des rétrodiffuseurs et un critère de qualité de la phase interférométrique, important pour son déroulement. L'évolution de l'instrumentation spatiale de ces vingt dernières années a conduit à l'acquisition de données interférométriques, avec les systèmes ERS (ESA), JERS (NASDA), SRTM/XSAR (JPL/NASA/DLR), et de données polarimétriques, avec les satellites SIRC (JPL /NASA), Envisat-ASAR (ESA), sur la majeure partie de la surface terrestre. Les thématiques concernées par les applications sont multiples : agriculture, forêts, zones urbaines, sols nus, glace et océan. Les techniques satellitaires sont auparavant expérimentées en utilisant des systèmes radar aéroportés plus flexibles, c'est-à-dire avec lesquels il est possible de contrôler l'ensemble des paramètres système (fréquence, angle d'incidence, ligne de base, résolution...) et d'effectuer des acquisitions sur des sites de test dans des conditions optimales. Il existe actuellement plusieurs systèmes aéroportés expérimentaux dont les caractéristiques sont différentes et complémentaires : RAMSES (ONERA), ESAR (DLR), AIRSAR (JPL/NASA), PISAR (NASDA), CV 580 (CCT)... L'interférométrie polarimétrique (PolInSAR) est une technique récente [Cloude 98] qui utilise deux antennes polarimétriques spatialement décalées et qui permet de mesurer la cohérence associée aux différents canaux polarimétriques ainsi que la hauteur des centres de phase polarimétriques. Le potentiel de cette technique pour l'extraction des paramètres physiques de la végétation, de la glace et des zones urbaines a été validé sur divers jeux de données acquis en bande L par les systèmes aéroporté ESAR et spatial SIRC, et demeure en cours d'évaluation sur d'autres types de données acquises à haute résolution par des systèmes aéroportés.

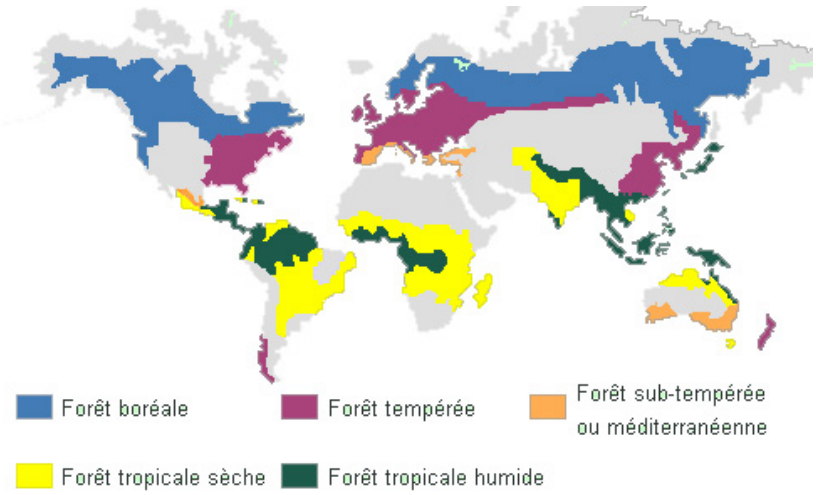

FIG. 1 – Répartition mondiale des différents types de forêts.

Une des priorités de la recherche scientifique actuelle est la compréhension des variations temporelles du climat qui sont étroitement liées au cycle du carbone. L'ensemble des forêts couvre environs 30 % de la surface continentale, comme l'illustre la figure 1, et assimile le gaz carbonique de l'air. Les forêts interviennent dans la régulation du taux de carbone dans l'atmosphère et constituent un réservoir de carbone difficilement quantifiable qui varie au cours du temps. La biomasse continentale, qui représente la quantité de carbone contenue dans la végétation, est essentiellement contenue dans les forêts. Elle est bien plus importante dans les forêts tropicales que dans les forêts boréales, ces dernières couvrant une surface plus étendue. Les techniques spatiales apparaissent donc comme un outil très efficace pour caractériser la distribution spatiale des forêts, leur type et effectuer leur suivi temporel dans le but de mesurer l'évolution spatio-temporelle de la quantité de carbone stocké dans ce réservoir. La quantité de carbone contenu dans les troncs, les branches et les feuilles ou les aiguilles des arbres est la biomasse aérienne. Elle peut être reliée à la hauteur des arbres par une relation allométrique empirique qui dépend de l'espèce et des conditions locales. La capacité de la technique PolInSAR pour estimer la hauteur des arbres avec le modèle RVoG (Random Volume over Ground) [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 03a] a été démontrée sur différents jeux de données acquis en bande L par le système ESAR. Cette technique présente par conséquent un grand intérêt pour la cartographie de la biomasse continentale.

L'objectif de ce travail de thèse a été d'évaluer le potentiel de la technique PolInSAR pour l'étude de la végétation à différentes fréquences et la transposition au cas spatial. Cette analyse qui concerne aussi bien la précision que la robustesse de l'inversion PolInSAR a été effectuée sur des données aéroportées acquises à haute résolution par le système RAMSES en bandes X, L et P.
Une méthode de calibration de ce nouveau type de données a tout d'abord été développée [Dubois-Fernandez 05]. Ensuite, la majeure partie de ce travail a consisté à adapter les hypothèses de la modélisation cohérente de la forêt et à développer une procédure d'inversion de la hauteur des arbres propre à chacune des fréquences extrêmes du spectre généralement utilisées : les bandes X et P. En conditions spatiales, la qualité des données décroît par rapport au

cas aéroporté pour des raisons technologiques et parce que la distance antenne-cible augmente considérablement. Pour simuler la transposition aux conditions spatiales de ce type d'inversion, les effets de la diminution du rapport signal à bruit et de la dégradation de la résolution sur l'information PolInSAR, c'est-à-dire la cohérence interférométrique des différents canaux polarimétriques, sont quantifiés et les conséquences sur l'extraction de paramètres sont évaluées en fonction de ces deux paramètres système.

Le premier chapitre débute par la présentation du principe de la formation des images SAR, l'introduction de l'interférométrie et de la polarimétrie radar, et l'exposé des fondements de l'interférométrie polarimétrique. Tout le formalisme fondamental nécessaire à la compréhension des analyses ultérieures est résumé dans les premières parties. Ensuite, le principe de la méthode de calibration de données PolInSAR acquises en mode "démodulation en réception", développée dans le contexte de ce travail de thèse, est détaillé. Puis, une illustration des performances de la technique PolInSAR et des possibilités qu'offre l'analyse temps-fréquence des données pour l'extraction de paramètres est présentée dans le contexte de structures urbaines sur des données acquises en bande X, car ils possèdent une structure plus déterministe que la forêt.

Le chapitre suivant traite de l'analyse PolInSAR multi-fréquentielle de la végétation et est décomposé en trois parties correspondant à chacune des trois fréquences L, X et P.

- La bande L a fait l'objet de nombreux travaux antérieurs dans le domaine du PolInSAR et sera à ce titre seulement abordée de manière superficielle. L'information radiométrique et polarimétrique de données acquises sur une forêt de pins sont analysées de manière préliminaire. Les hypothèses du modèle RVoG sont ensuite exposées et l'extraction de paramètres est illustrée sur des données PolInSAR simulée.

- La bande X interagit essentiellement avec le feuillage et son potentiel pour la discrimination des surfaces agricoles est évalué à partir de données polarimétriques et PolInSAR. Une étude de la capacité de cette fréquence à estimer la hauteur d'une forêt de pins à partir de données PolInSAR est ensuite présentée.

- La bande P est caractérisée par une importante profondeur de pénétration dans le couvert végétal et est donc plus adaptée à l'étude de la végétation haute. Le potentiel de l'information radiométrique et polarimétrique pour l'estimation de la biomasse est analysé dans un premier temps sur des données acquises sur une forêt de pins. Une étude de données PolInSAR conduit ensuite à l'élaboration d'une méthode d'inversion de la hauteur des arbres.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de la robustesse de l'analyse PolInSAR pour l'extraction de paramètres en conditions spatiales. Les effets de la diminution du SNR et de la dégradation de la résolution sur l'information polarimétrique en bande P et sur l'information PolInSAR à toutes les fréquences sont quantifiés pour déterminer la qualité du système au-dessous de laquelle les performances de l'inversion sont significativement détériorées. Afin d'accéder à une meilleure compréhension de l'influence de la résolution sur l'analyse des données, les rôles antagonistes du fenêtrage lié à l'augmentation de la taille de la cellule de résolution et du filtrage fréquentiel du spectre des images SAR, lorsque la résolution est dégradée, sont analysés séparément. Enfin, pour compléter l'étude de l'influence des paramètres système sur l'extraction des paramètres physiques de la végétation, le rôle de la fréquence est abordé par une discussion sur la nature des rétrodiffuseurs en bandes X, L et P.

En conclusion, les recommandations propres à l'analyse de données acquises par des systèmes

orbitaux à ces différentes fréquences sont évoquées et les perspectives directes de ce travail de thèse sont énumérées.

Chapitre 1

L'interférométrie polarimétrique

1.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est d'introduire les fondements de l'interférométrie SAR polarimétrique (PolInSAR) et d'illustrer le potentiel de cette technique sur des zones urbaines en bande X avant de considérer l'étude plus complexe de la végétation dans le chapitre suivant.

Le principe de la formation des images SAR est tout d'abord rappelé car leurs propriétés et l'information qu'elles contiennent en dépendent directement.

L'interférométrie radar est ensuite introduite en commençant par l'aspect géométrique de la technique, puis en portant l'accent sur la cohérence interférométrique complexe. Comme l'estimation de ce paramètre occupe un rôle central dans le traitement de l'information interférométrique, sa précision et son comportement sont dans un premier temps illustrés, et différentes sources de décorrélation du signal interférométrique sont ensuite détaillées.

La troisième partie concerne la présentation de la polarimétrie radar, allant de la description de l'état de polarisation d'une onde à celle des outils servant à caractériser les propriétés polarimétriques des surfaces naturelles et urbaines.

La partie suivante est consacrée à la présentation de la technique PolInSAR et son principe est décrit dans la continuité du formalisme utilisé précédemment.

Avant de considérer l'analyse de données PolInSAR acquises par un système utilisant un mode "démodulation en réception" (RAMSES), une méthode de calibration de ce type de données est décrite.

Enfin, les relations entre l'information PolInSAR et la structure des rétrodiffuseurs sont illustrées dans la dernière partie en utilisant l'exemple des structures urbaines en bande X.

1.2 Formation des images SAR

1.2.1 Principe du SAR

L'imagerie SAR (Synthetic Aperture Radar) est un outil puissant pour l'étude des surfaces naturelles. La popularité de cette technique pour l'observation de la Terre tient principalement au fait que ses performances sont indépendantes des conditions météorologiques, justifiant ainsi le qualificatif d'"imageur tout temps". L'embarquement d'un système SAR sur une plate-forme spatiale est alors un moyen sûr de constituer une base de données sur l'ensemble de la surface

terrestre.

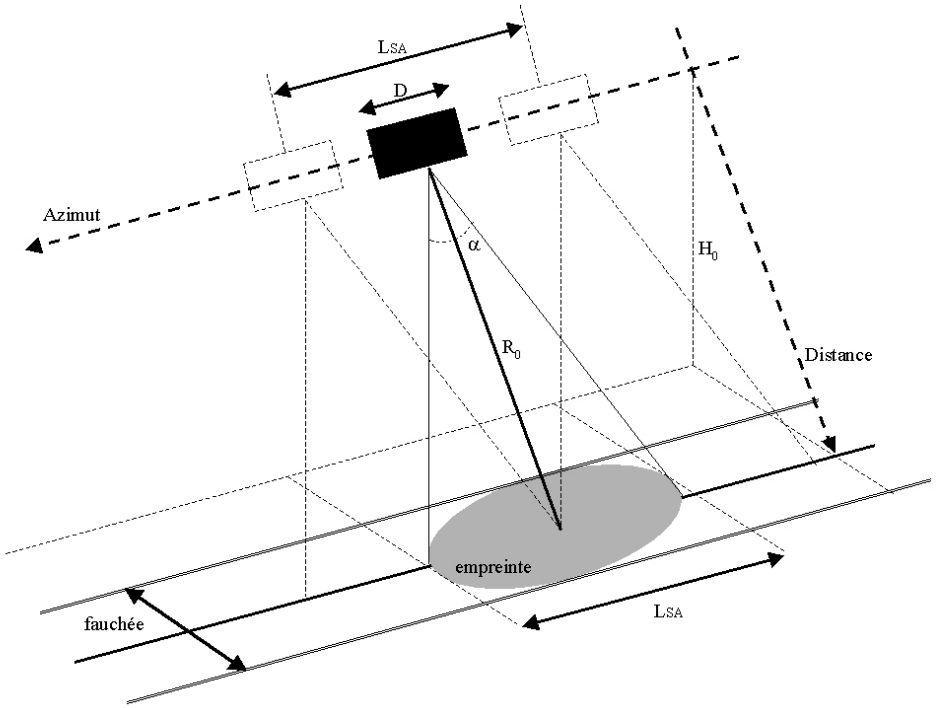

FIG. 1.1 – Géométrie d'acquisition d'un système SAR.

Quel que soit le type de plate-forme, avion ou satellite, la direction de visée des antennes d'émission et de réception est perpendiculaire à celle du mouvement supposé rectiligne de la plate-forme, comme l'illustre la figure 1.1. Ces deux directions sont respectivement appelées "distance" et "azimut" par convention. A mesure que la plate-forme avance avec une vitesse v_p, des signaux sont émis et leur échos sont reçus sans que la position de celle-ci n'ait changé de manière significative, du fait que la célérité de la lumière est largement supérieure à la vitesse de la plate-forme : $c \gg v_p$. Comme le montre la figure 1.1, à chaque position de la plate-forme en azimut, la surface est illuminée sur un intervalle en distance appelé la fauchée.

La résolution de l'antenne en azimut dépend de l'ouverture angulaire α de celle-ci et de la distance entre la plate-forme et le centre de l'empreinte R_0 (figure 1.1). L'ouverture angulaire de l'antenne est proportionnelle à sa taille dans la direction azimutale D et à la longueur d'onde λ du rayonnement émis :

$$\alpha \simeq \frac{\lambda}{D} \tag{1.1}$$

On en déduit la résolution en azimut :

$$\delta_{Az} = R_0 \alpha = R_0 \frac{\lambda}{D} \tag{1.2}$$

Une résolution angulaire α constante implique que la résolution azimutale sera moins bonne quand la distance radiale R_0 augmente, jusqu'à devenir médiocre en conditions spatiales, puisqu'il n'est pas possible d'embarquer une antenne démesurément longue pour des raisons de charge utile. C'est pourquoi le procédé dit d'"antenne synthétique" est utilisé afin d'augmenter la résolution en azimut tout en disposant d'une antenne de faible encombrement. Celui-ci consiste en l'intégration cohérente de la réponse d'un rétrodiffuseur par une antenne réseau synthétique. Cette antenne réseau est formée par la réception du signal avec la même antenne à différentes positions spatiales de la plate-forme sur sa trajectoire. De même que dans le cas d'une antenne à ouverture réelle, la résolution angulaire de l'antenne à ouverture synthétique de longueur L_{SA} est donnée par la relation :

$$\alpha_{SA} \simeq \frac{\lambda}{2L_{SA}} \tag{1.3}$$

La résolution en azimut obtenue avec une antenne à ouverture synthétique devient donc :

$$\delta_{Az} = \frac{\lambda}{2L_{SA}} R_0 \tag{1.4}$$

La longueur de l'antenne à ouverture synthétique L_{SA}, qui est reliée au temps d'éclairement par la vitesse de la plate-forme, est proportionnelle à la distance R_0 et à l'inverse de la taille réelle de l'antenne D :

$$L_{SA} = \alpha R_0 = \frac{\lambda}{D} R_0 \tag{1.5}$$

La résolution angulaire de l'ouverture synthétique diminue avec la distance R_0 :

$$\alpha_{SA} = \frac{D}{2R_0} \tag{1.6}$$

La résolution maximale qu'il est possible d'obtenir en azimut ne dépend alors plus de la distance R_0, ni de la fréquence du rayonnement émis, mais seulement de la taille de l'antenne embarquée :

$$\delta_{Az} = \alpha_{SA} R_0 = \frac{D}{2} \tag{1.7}$$

C'est pourquoi, pour une même taille d'antenne embarquée, la résolution transverse (ou azimutale) théorique maximale sera la même pour des données spatiales et aéroportées.

1.2.2 Le filtrage adapté

A mesure que la plate-forme évolue le long d'une trajectoire supposée rectiligne, la distance R entre l'antenne située à une position x et la cible, illustrée par la figure 1.2, est donnée par la relation :

$$R = \sqrt{x^2 + {R_0}^2} \tag{1.8}$$

Comme la largeur de l'empreinte au sol dans la direction azimutale est très largement inférieure à la distance minimale entre la trajectoire de la plate-forme et la cible ($x \ll R_0$),

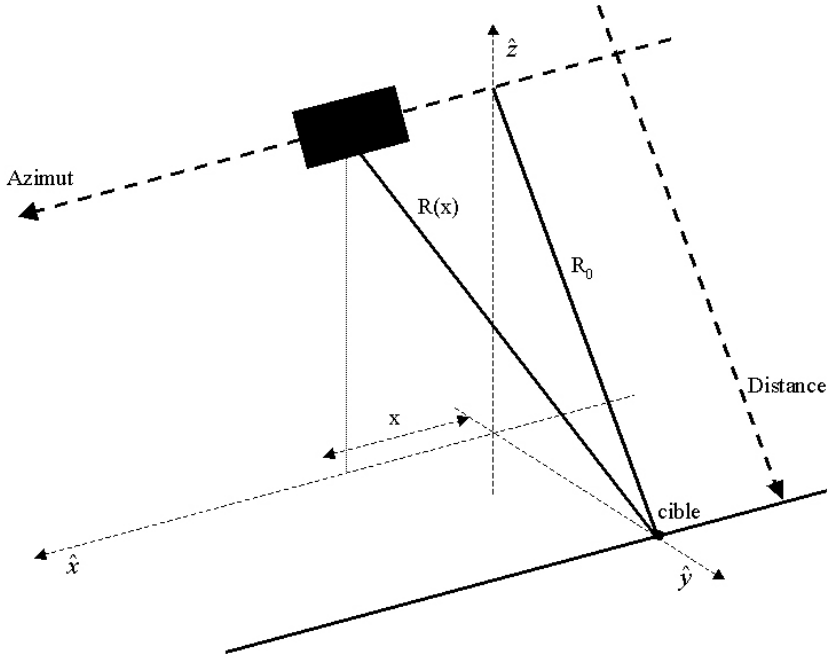

FIG. 1.2 – Définition du référentiel dans lequel les positions de l'antenne et de la cible sont exprimées.

on peut faire l'approximation que la distance R suit une tendance hyperbolique en fonction de la trajectoire. L'expression de R est obtenue par développement en séries de Taylor :

$$R = R_0\sqrt{1 + \frac{x^2}{{R_0}^2}} \simeq R_0 + \frac{x^2}{2R_0} \tag{1.9}$$

La phase d'un écho reçu s'exprime de la manière suivante en prenant en compte le double trajet plate-forme-cible :

$$\varphi(x) = \frac{4\pi}{\lambda}\left(R_0 + \frac{x^2}{2R_0}\right) \tag{1.10}$$

En négligeant le terme constant $(4\pi R_0/\lambda)$ et en supposant la vitesse de la plate-forme constante, la phase $\varphi(t)$ s'exprime de forme quadratique en fonction du temps :

$$\varphi(t) = \frac{2\pi v_p^2 t^2}{\lambda R_0} \tag{1.11}$$

L'hypothèse faite pour obtenir la relation 1.9 ($x \ll R_0$) conduit à une expression de la fréquence Doppler linéaire :

$$f_D(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{\partial\varphi(t)}{\partial t} = \frac{2v_p^2}{\lambda R_0}t \tag{1.12}$$

L'expression du "signal azimutal" correspondant à un rétrodiffuseur ponctuel est la suivante :

$$S_{Az}(t) = A_0 e^{j\varphi(t)} = A_0 e^{jkt^2} \text{ avec } k = \frac{2\pi x^2}{\lambda R_0} \tag{1.13}$$

L'objectif du traitement SAR est de focaliser les échos dispersés de la scène imagée, constituant les données brutes, afin de former une image à haute résolution en utilisant la technique de compression d'impulsions en distance et en azimut. Comme de nombreux ouvrages traitent du sujet ([Bamler 94], [Curlander 91] et [Hardange 92]), le principe de cette technique est exposé simplement ici en s'appuyant sur les démonstrations de [Reigber 97]. La focalisation des échos en azimut est effectuée à l'aide du filtrage adapté du signal transverse reçu. Ceci revient à effectuer une corrélation de ce signal avec un signal de référence qui est égal au conjugué complexe de (1.13). Comme le signal transverse reçu est de durée finie égale à t_{max}, le signal de référence $Sref_{Az}$ doit être pondéré par une fenêtre rectangulaire $Rect(t)$.

$$Rect(t) = 1_{[-t_{max}/2, t_{max}/2]} \text{ avec } t_{max} = \frac{L_{SA}}{v_p} = \frac{\theta_{Az_{max}} R_0}{v_p} \tag{1.14}$$

$\theta_{Az_{max}}$ étant la variation maximale d'angle de visée en azimut.

$$Sref_{Az}(t) = A_0 e^{-jkt^2} Rect(t) \tag{1.15}$$

L'angle d'observation θ_{Az} avec lequel la cible est vue durant l'intégration azimutale est associé à une fréquence Doppler f_D qui varie en fonction de la vitesse de rapprochement de la cible par rapport à la plate-forme. L'injection de 1.14 dans 1.12 permet de relier l'angle maximal $\theta_{Az_{max}}$ sous lequel la cible est vue à la bande passante B_{Az} du signal reçu dans la direction azimut, et donc à la résolution dans cette direction à l'aide de la relation 1.23 :

$$\theta_{Az_{max}} = \frac{B_{Az}\lambda}{2v_p} = \frac{\lambda}{2\delta_{Az}} \tag{1.16}$$

La vitesse de rapprochement de la cible vers l'antenne radar v_{p_r} s'exprime en fonction de l'angle de visée θ_{Az} de la manière suivante :

$$v_{p_r} = v_p \sin\theta_{Az} \tag{1.17}$$

La relation entre la fréquence Doppler f_D et l'angle de visée θ_{Az} est alors :

$$\theta_{Az} = \arcsin\left(\frac{f_D\lambda}{2v_p}\right) \tag{1.18}$$

La relation entre la corrélation et la convolution est la suivante :

$$S_{Az}(t) \otimes Sref_{Az}(-t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{Az}(\tau) Sref_{Az}(t+\tau) d\tau \tag{1.19}$$

Le filtrage adapté peut alors s'exprimer sous la forme d'une corrélation. On montre que :

$$\begin{aligned} C_{Az}(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{Az}(\tau) Sref_{Az}(t+\tau) d\tau \\ &= A_0 t_{max} \sqrt{2\pi} e^{-jkt^2} \left[\frac{\sin(kt_{max}t)}{kt_{max}t} \right] \end{aligned} \tag{1.20}$$

Le sinus cardinal, qui confère à la fonction de corrélation $C(t)$ son allure générale, est obtenu par transformée de Fourier de la fenêtre de pondération $Rect(t)$. A mesure que la longueur de l'antenne synthétique L_{SA} augmente, et par conséquent le temps d'illumination t_{max}, le sinus cardinal va tendre vers une impulsion de Dirac. En pratique, dans un souci d'économies de calcul, la corrélation du chirp reçu avec le signal de référence est effectuée dans le domaine fréquentiel :

$$C_{Az}(t) = \mathcal{TF}^{-1} \Big[\mathcal{TF}[S_{Az}(t)] \mathcal{TF}[Sref_{Az}(-t)] \Big] \tag{1.21}$$

Où $\mathcal{TF}[.]$ symbolise la transformée de Fourier.

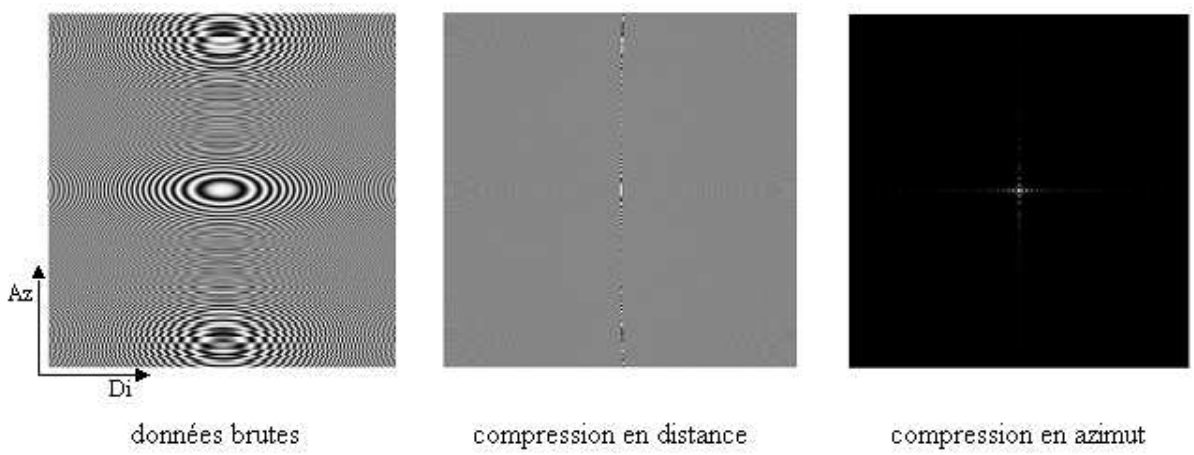

FIG. 1.3 – Chaîne de traitement SAR dans le cas d'un rétrodiffuseur ponctuel.

Pour accéder à une haute résolution dans la direction perpendiculaire à la trajectoire du radar, il suffit théoriquement d'émettre un pulse de courte durée. Cependant, il est matériellement difficile d'émettre suffisamment d'énergie pour que l'écho rétrodiffusé ait un rapport signal à bruit (SNR) satisfaisant. Des formes d'onde de type "chirp" sont alors émises afin d'utiliser la technique de compression d'impulsions pour obtenir des résolutions supérieures. La fonction de corrélation dans cette direction s'écrit de la manière suivante :

$$C_{Di}(t) = A_0 \tau_c \sqrt{2\pi} e^{j \frac{\pi B_{Di}}{\tau_c} t^2} \left[\frac{\sin(B_{Di}\pi t)}{B_{Di}\pi t} \right] \tag{1.22}$$

Où τ_c est la durée du chirp émis, B_{Di} est sa bande passante et A_0 est son amplitude. La figure 1.3 est une illustration des différentes étapes du traitement SAR décrites précédemment, appliquées aux données simulées d'un rétrodiffuseur ponctuel. Le sinus cardinal obtenu après compression dans les deux directions représente la réponse impulsionnelle de la chaîne de traitement SAR. Cette réponse est observable sur les réflecteurs de calibration (trièdres) et sa largeur à 3dB donne les dimensions de la cellule de résolution en distance et en azimut. Notons que comme la longueur d'onde est inférieure à la taille de la cellule de résolution, le nombre de rétrodiffuseurs au sein d'une cellule de rétrodiffusion est important et la somme des contributions cohérentes des rétrodiffuseurs spatialement distribués est à l'origine du bruit de speckle.

Bien que l'utilisation de l'antenne synthétique permette d'atteindre de hautes résolutions en azimut comme l'a montré la relation 1.7, les images formées possèdent généralement des cellules de résolution dont la taille est du même ordre de grandeur en distance et en azimut. Une partie seulement de la bande passante des fréquences Doppler disponible est donc utilisée. La résolution en azimut s'exprime alors ainsi :

$$\delta_{Az} = \frac{v_p}{B_{Az}} \tag{1.23}$$

B_{Az} étant la bande passante conservée en azimut.

La résolution en distance dépend de la bande passante du chirp émis B_{Di} [Hardange 92] et peut être obtenue par la relation suivante :

$$\delta_{Di} \simeq F\frac{c}{2B_{Di}} \tag{1.24}$$

F étant un facteur de pondération égal à 0,89.

1.3 L'interférométrie

1.3.1 Approche géométrique

L'interférométrie est une technique exploitant le déphasage entre deux signaux reçus par deux antennes décalées spatialement afin d'extraire une information topographique [Graham 74]. C'est à partir de l'image de la différence de phase que sont construits les modèles numériques d'élévation ([Bamler 94], [Gabriel 88] et [Zebker 86]).

La réception d'échos en mode interférométrique est possible avec une seule plate-forme équipée de deux antennes (interférométrie mono-passe) séparées par une ligne de base fixe ou bien avec une seule antenne effectuant deux passages à deux moments différents au dessus d'une même zone (interférométrie multi-passes). La figure 1.4 représente la géométrie d'acquisition d'une scène par un système interférométrique. Les deux antennes A_1 et A_2, séparées par une ligne de base de longueur B, reçoivent respectivement des signaux s_1 et s_2 :

$$s_1 = |s_1|e^{j\phi_1} \text{ et } s_2 = |s_2|e^{j\phi_2} \tag{1.25}$$

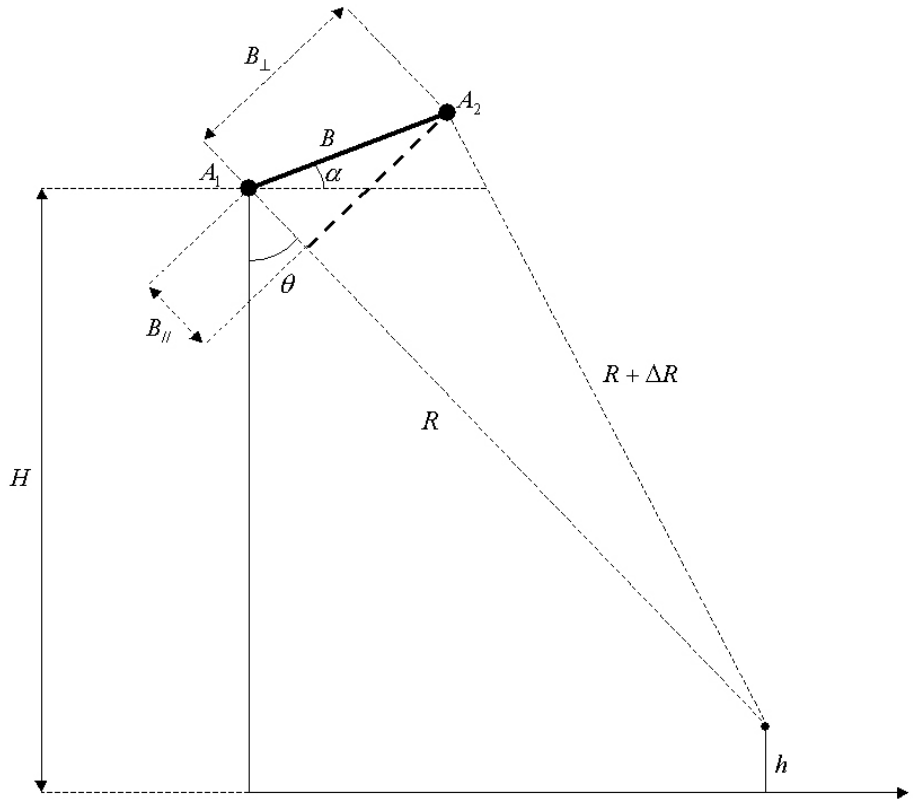

FIG. 1.4 – Géométrie d'acquisition d'un signal interférométrique.

Leurs phases se décomposent selon la somme d'un terme lié au double trajet antenne-cible et d'un terme de déphasage induit par l'interaction de l'onde avec la cible :

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}R + \phi_{p1} \text{ et } \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(R + \Delta R) + \phi_{p2} \tag{1.26}$$

Comme la différence d'angles de vue des deux antennes est faible, l'approximation $\phi_{p1} = \phi_{p2}$ est possible. L'image des différences de phase, obtenue après formation d'un interférogramme $s_1 s_2^*$, est donc directement proportionnelle à la différence de trajets ΔR des deux signaux :

$$s_1 s_2^* = |s_1 s_2^*| e^{j(\phi_1 - \phi_2)} = |s_1 s_2^*| e^{j(\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R)} \tag{1.27}$$

L'argument de l'interférogramme est la phase interférométrique, qui est distribuée selon une loi normale [Bamler 94], [Lee J.-S. 94].

$$\Phi = Arg(s_1 s_2^*) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R + 2k\pi \text{ avec } k \text{ entier} \tag{1.28}$$

Comme la phase interférométrique Φ est mesurée modulo 2π, l'interférogramme présente des franges issues des repliements de celle-ci. Un déroulement de phase est donc nécessaire pour estimer la phase absolue. Les performances d'une telle procédure sont essentiellement dépendantes

du niveau de bruit affectant la phase interférométrique et de la topographie de la scène illuminée. ΔR s'exprime en fonction des trajets de l'onde pour chacune des deux antennes, de la longueur de la ligne de base B et de l'angle d'incidence θ comme suit :

$$\sin(\theta - \alpha) = -\frac{R^2 - (R + \Delta R)^2 + B^2}{2RB} \tag{1.29}$$

θ étant l'angle d'incidence et α l'angle formé par la ligne de base et l'horizontale. En négligeant le terme ΔR^2, la différence de trajet de l'onde entre les deux antennes devient :

$$\Delta R = \frac{B^2}{2R} + B\sin(\theta - \alpha) \tag{1.30}$$

Pour les lignes de base courtes comparées à la distance antenne-cible, propre au cas spatial, le terme $B^2/2R$ devient proche de 0. La relation 1.30 peut se simplifier de la manière suivante :

$$\Delta R \simeq B\sin(\theta - \alpha) \tag{1.31}$$

D'un autre côté, les composantes de la ligne de base B sur l'axe distance $B_{||}$ et sa normale $B_{\perp}$ s'exprime en fonction des paramètres géométriques de la configuration interférométrique :

$$B_{||} = B\sin(\theta - \alpha) \text{ et } B_{\perp} = B\cos(\theta - \alpha) \tag{1.32}$$

Ceci permet d'établir une expression de la phase interférométrique en fonction de la géométrie du système interférométrique en combinant les relations 1.28 et 1.31 :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} B\sin(\theta - \alpha) = \frac{4\pi}{\lambda} B_{||} \tag{1.33}$$

Afin d'évaluer la sensibilité en hauteur d'un système interférométrique multi-passes, considérons la différence des phases interférométriques relatives à deux points situés à la même distance radiale et à deux hauteurs différentes (figure 1.5). Les angles d'incidence sous lesquels les deux cibles sont vues diffèrent de $\Delta\theta_z$. La phase interférométrique associée à un point situé à une hauteur Δz est donnée par la relation :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} B\sin(\theta - \alpha + \Delta\theta_z) \tag{1.34}$$

Une distance verticale Δz séparant deux points induit une variation de phase interférométrique $\Delta\Phi_z$:

$$\Delta\Phi_z \simeq \frac{4\pi}{\lambda} B\cos(\theta - \alpha)\Delta\theta_z \tag{1.35}$$

Comme la distance $R \gg \Delta z$, l'écart angulaire des angles d'incidence $\Delta\theta_z$ est petit et il est donc possible de faire l'approximation : $R\Delta\theta_z \simeq R\sin(\Delta\theta) = \Delta z/\sin(\theta)$:

$$\Delta\Phi_z = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_{\perp}}{R\sin\theta}\Delta_z \tag{1.36}$$

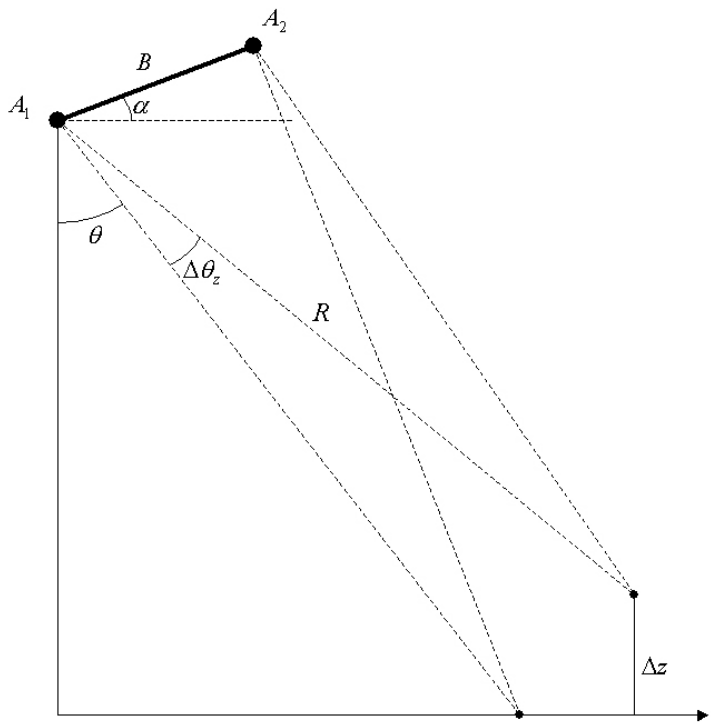

FIG. 1.5 – Géométrie d'acquisition de signaux interférométriques provenant d'une même case distance mais de différentes hauteurs.

La sensibilité en hauteur du système interférométrique peut alors s'exprimer ainsi :

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta z} = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp}{R\sin\theta} \tag{1.37}$$

Celle-ci est d'autant plus grande que le rapport $B_\perp/R$ est élevé, c'est-à-dire que l'écart angulaire $\Delta\theta_z$ des incidences entre les deux antennes est grand, comme le montre la figure 1.4. La différence de hauteurs induisant une différence de phases interférométriques égale à 2π, appelée hauteur d'ambiguïté, se déduit de la relation précédente :

$$Ha = \Delta z_{2\pi} = \frac{\lambda}{2}\frac{R\sin\theta}{B_\perp} \tag{1.38}$$

La hauteur d'ambiguïté permet de traduire la phase interférométrique en hauteur afin de construire les Modèles Numériques d'Élévation (MNE) :

$$\Delta z = \frac{Ha}{2\pi}\Delta\Phi \tag{1.39}$$

Notons que dans le cas de données aéroportées, la hauteur d'ambiguïté est variable en fonction de la distance, de même que la sensibilité en hauteur, alors qu'on peut les supposer constantes pour

des données spatiales. Une courte ligne de base assure une bonne sensibilité en hauteur, mais les repliements de la phase interférométrique sous forme de franges seront plus nombreux que dans le cas d'une ligne de base plus longue. Il apparaît donc nécessaire d'adapter la géométrie du système interférométrique à la distribution verticale de la scène étudiée afin de limiter l'enroulement de phase interférométrique tout en conservant une sensibilité en hauteur convenable.

1.3.2 La cohérence interférométrique

La "ressemblance" de deux signaux interférométriques est mesurable en calculant la cohérence interférométrique, qui est leur corrélation complexe normalisée :

$$\gamma = \frac{E(s_1 s_2^*)}{\sqrt{E(|s_1|^2)E(|s_2|^2)}} \tag{1.40}$$

Comme on ne dispose que d'une seule paire d'images interférométriques, l'espérance mathématique est supposée équivalente au moyennage spatial des pixels (ergodicité) :

$$\gamma = \frac{< s_1 s_2^* >}{\sqrt{< |s_1|^2 >< |s_2|^2 >}} \tag{1.41}$$

La cohérence $|\gamma|$ varie de 0, dans le cas du bruit, à 1 si les deux signaux sont complètement corrélés. C'est un indicateur du niveau de bruit de la phase interférométrique et donc de la qualité d'un interférogramme : une cohérence élevée garantie une bonne précision de l'estimation de la phase interférométrique. Les bornes de Cramer-Rao de la variance de la phase interférométrique σ_Φ^2 ont été calculées par [Seymour 94] pour en estimer le minimum, qui correspond à la précision maximale de l'estimation de la phase interférométrique, en fonction de la cohérence $|\gamma|$ et de la taille de la fenêtre de moyennage N :

$$\sigma_\Phi^2 = \frac{1 - |\gamma|^2}{2N|\gamma|^2} \tag{1.42}$$

La figure 1.6 illustre la relation entre l'écart-type de la phase interférométrique et la cohérence pour plusieurs tailles de fenêtre. Il apparaît clairement qu'un compromis doit être fait pour avoir une précision de l'estimation de la phase interférométrique satisfaisante sans trop dégrader la résolution spatiale de l'interférogramme. La résolution altimétrique σ_h d'un MNE est calculée en combinant l'expression de précision de la phase interférométrique σ_Φ (relation 1.42) et celle de la hauteur d'ambiguïté H_a (relation 1.38) :

$$\sigma_h = \frac{H_a}{2\pi}\sigma_\Phi \tag{1.43}$$

Même si la cohérence était constante sur toute l'image, la résolution altimétrique d'un MNE formé à partir d'une acquisition aéroportée demeurerait variable en fonction de la distance, comme la hauteur d'ambiguïté.

En ce qui concerne la norme de la cohérence, sa variance est donnée par la relation suivante :

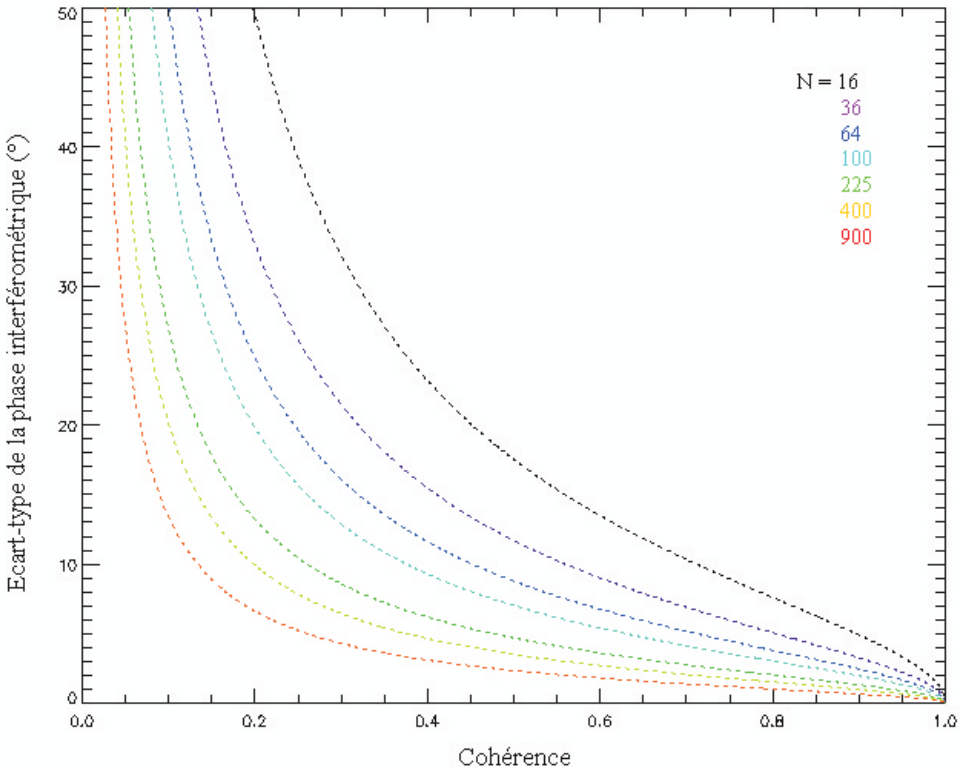

FIG. 1.6 – Précision de la phase interférométrique en fonction de la cohérence pour plusieurs tailles de fenêtre d'après [Seymour 94].

$$\sigma^2_{|\gamma|} = \frac{\left(1 - |\gamma|^2\right)^2}{2N} \tag{1.44}$$

Pour conserver une même précision de l'estimation de la cohérence, la taille de la fenêtre doit s'adapter à la valeur de la cohérence induisant une diminution de la résolution spatiale lorsque la cohérence décroît. Mais la nécessité d'utiliser une taille de fenêtre suffisante pour estimer la cohérence tient essentiellement au fait que celle-ci est biaisée vers les hautes valeurs, le biais dépendant de la valeur de la cohérence, comme il est démontré dans [Touzi 99]. A titre d'exemple, l'estimation de la cohérence sur une zone caractérisée par une valeur non-biaisée égale à 0,5 avec une fenêtre de 4 looks indépendants présentera une surestimation de 0,1.

Les sources potentielles de décorrélation du signal interférométrique sont multiples, certaines étant irréversibles (c'est-à-dire que la connaissance du système interférométrique ne permet pas d'effectuer de corrections) :

– γ_{SNR} représente la décorrélation associée à l'ajout de bruit thermique.

Comme les deux signaux interférométriques sont reçus par deux antennes distinctes, chaque signal est affecté par un bruit additif gaussien indépendant n_i. Si nous supposons que la ligne de base est nulle, il est possible de faire l'approximation que $s_1 = s_2 = s$. Dans ce cas :

$$s_1 = s + b_1 \text{ et } s_2 = s + b_2 \tag{1.45}$$

Comme la corrélation du signal et du bruit est nulle :

$$\gamma_{SNR} = \frac{|s|^2}{|s|^2 + |b|^2} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \tag{1.46}$$

En définissant le rapport signal à bruit de la manière suivante : $SNR = |s|^2/|b|^2$.

– γ_{temp} est la décorrélation temporelle.

Les changements de réflectivité complexe entre deux acquisitions décalées dans le temps dus à une variation des propriétés du rétrodiffuseur, qu'elles soient géométriques ou diélectriques, sont à l'origine de cette perte de cohérence. En prenant l'exemple d'une forêt, le mouvement des feuilles induit par le vent ainsi que la variation de l'hygrométrie de la canopée et/ou du sol sont source de décorrélation temporelle.

– γ_{geom} est la décorrélation géométrique.

Elle est due à la différence d'angle d'incidence des antennes interférométriques. Il a été démontré dans [Prati 93] que les spectres respectifs des signaux interférométriques s_1 et s_2 correspondent à différentes bandes de fréquence. Le nombre d'onde en distance k_y projeté au sol s'exprime ainsi :

$$k_y = \frac{4\pi}{\lambda}\sin(\theta - \varepsilon) = \frac{4\pi f}{c}\sin(\theta - \varepsilon) \tag{1.47}$$

ε est la pente supposée uniforme du terrain, θ est l'angle d'incidence, λ est la longueur d'onde, f est la fréquence et c est la célérité de la lumière dans le vide. La variation de nombre d'onde Δk_y d'une antenne à l'autre est reliée à celle de l'angle d'incidence $\Delta\theta$ par la relation suivante :

$$\Delta k_y = \frac{4\pi f \Delta\theta}{c}\cos(\theta - \varepsilon) \tag{1.48}$$

Cette différence responsable de la décorrélation spatiale pourrait être évitée en utilisant deux systèmes SAR émettant à deux fréquences centrales légèrement différentes. Mais comme k_y varie peu en fonction de la distance, il est possible négliger l'"étirement" du spectre fréquentiel et donc de remplacer f par la fréquence centrale f_0 dans la relation 1.48 :

$$\Delta k_y = \frac{4\pi f_0 \Delta\theta}{c}\cos(\theta - \varepsilon) \tag{1.49}$$

D'après [Gatelli 94], le décalage fréquentiel induit par la différence d'angle d'incidence $\Delta\theta$ entre les deux antennes interférométriques est quantifié en fonction de la distance antenne-cible R par la relation :

$$\Delta f = -\frac{f_0 \Delta\theta}{\tan(\theta - \varepsilon)} = -\frac{cB_\perp}{R\lambda\tan(\theta - \varepsilon)} \tag{1.50}$$

On en déduit l'expression de la ligne de base normale critique, pour laquelle le décalage fréquentiel Δf est égal à la bande passante du chirp émis :

$$|B_{\perp c}| = \left|\frac{B_{Di} R\lambda\tan(\theta - \varepsilon)}{c}\right| \tag{1.51}$$

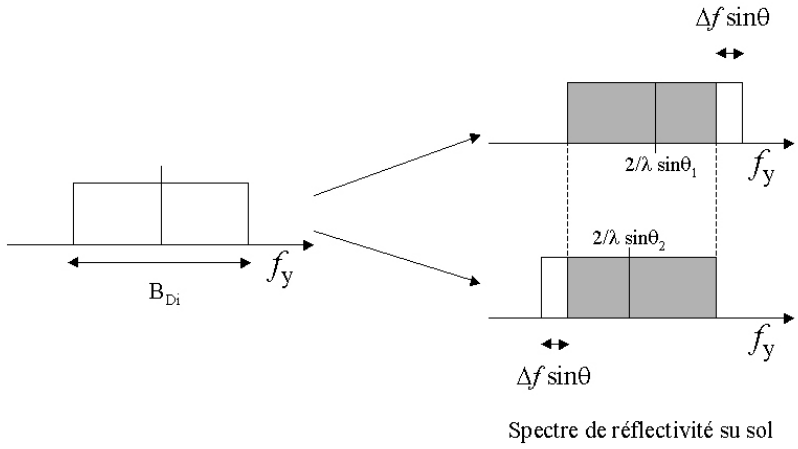

FIG. 1.7 – Illustration du décalage fréquentiel en distance des spectres de deux images interférométriques, induit par la différence d'angle d'incidence des deux antennes, projeté au sol, dans le cas où la scène ne présente aucune topographie (ε=0).

D'un autre côté, l'expression de la décorrélation spatiale établie par [Zebker 92] est :

$$\gamma_{geom} = 1 - \frac{2\cos(\theta - \varepsilon) R_y B_\perp}{\lambda R} \tag{1.52}$$

Elle comprend la décorrélation topographique liée à la pente du terrain ε [Lee H. 01]. La résolution en distance projetée s'écrit ainsi :

$$R_y = \frac{c}{2B_{Di}|\sin(\theta - \varepsilon)|} \tag{1.53}$$

En combinant 1.50, 1.52 et 1.53, la décorrélation spatiale devient :

$$\gamma_{geom} = 1 - \frac{|\Delta f|}{B_{Di}} \tag{1.54}$$

La décorrélation augmente à mesure que la partie commune des spectres fréquentiels des deux images interférométriques décroît et devient totale lorsque les spectres sont totalement disjoints. Dans l'approximation d'un terrain plat ($\varepsilon = 0$), la décorrélation géométrique peut s'exprimer en fonction de la ligne de base normale $B_\perp$ et de la ligne de base normale critique $B_{\perp c}$ [Bamler 94] :

$$\gamma_{geom} = 1 - \frac{B_\perp}{B_{\perp c}} \tag{1.55}$$

La figure 1.7 représente schématiquement les spectres fréquentiels en distance des deux images interférométriques, projetés au sol. Le filtrage des spectres des deux images interférométriques

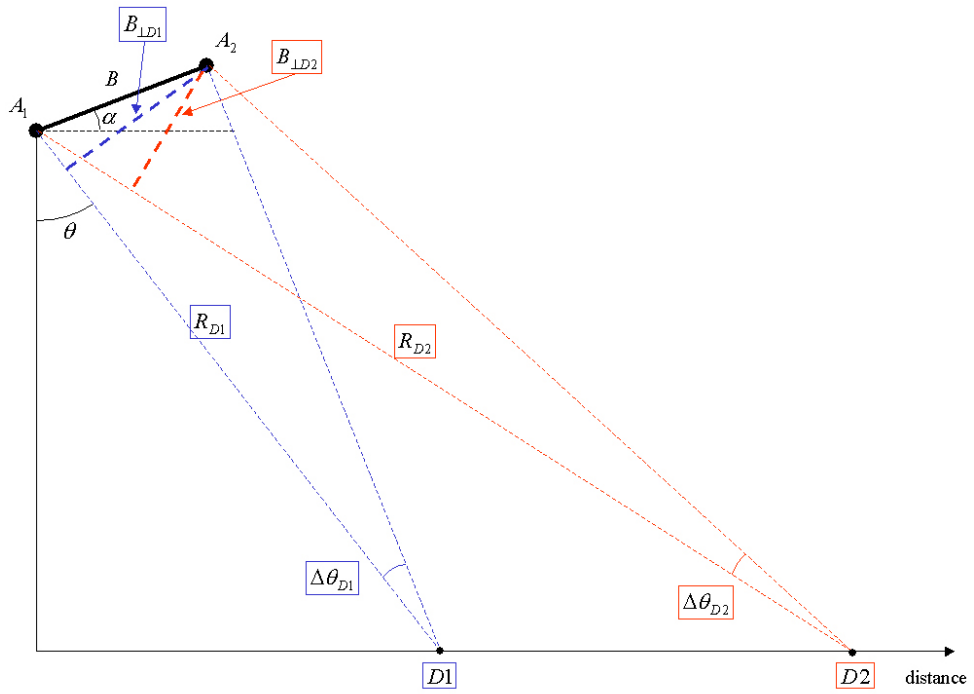

FIG. 1.8 – Variation de la ligne de base normale $B_\perp$ en fonction de la distance dans le cas aéroporté.

dans le but de ne conserver que la partie commune, qui apparaît de couleur grisée sur la figure 1.7, permet d'annuler la décorrélation spatiale. Dans le cas d'une surface, γ_{geom} deviendra alors égal à 1. Comme l'indique la relation 1.24, la conséquence de la réduction de la bande passante B_{Di} est une diminution de la résolution en distance δ_{Di}.

Il est important de noter que dans le cas aéroporté, l'angle d'incidence θ du système interférométrique, la distance R et donc la ligne de base normale $B_\perp$ sont variables en fonction de la distance, comme l'illustre la figure 1.8 alors que dans le cas spatial on peut supposer ces grandeurs constantes. En conséquence, le décalage spectral Δ_f entre les spectres des deux images interférométriques, donc la décorrélation géométrique, est aussi variable en fonction de la distance.

- γ_{SAR} représente la décorrélation associée à la qualité du traitement SAR.
- $\gamma_{co-regist}$ représente la décorrélation associée à l'erreur de co-registration du couple interférométrique.

1.4 La polarimétrie

1.4.1 Description de l'état de polarisation d'une onde

Les propriétés structurales d'un milieu vont conditionner le changement d'état de polarisation et de degré de polarisation lors de la transformation d'une onde radar incidente en une

onde rétrodiffusée. L'information polarimétrique étant dépendante des propriétés géométriques et électriques de la cible, elle présente un fort potentiel pour la caractérisation et la classification des surfaces naturelles et artificielles.
Dans l'approximation d'une onde plane se propageant dans un milieu homogène selon une direction $\mathbf{k}$, le champ électrique réel $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ est défini à un instant t et une position $\mathbf{r}$ de la manière suivante :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cos(\omega t) \tag{1.56}$$

$\mathbf{E}(\mathbf{r})$ étant l'amplitude réelle du champ électrique et ω, la pulsation de l'onde. Dans le cas d'une onde monochromatique, la représentation complexe du champ électrique indépendante du temps est :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E} e^{j(\mathbf{kr}+\omega t)} \tag{1.57}$$

L'amplitude complexe $\mathbf{E}$ se décompose en deux composantes complexes orthogonales horizontale et verticale E_h et E_v. Le vecteur $\mathbf{E}$, appelé vecteur de Jones, est alors défini comme suit :

$$\mathbf{E} = E_h \mathbf{h} + E_v \mathbf{v} \tag{1.58}$$

D'une manière générale, la polarisation d'une onde électromagnétique décrit l'orientation du champ électrique en fonction du temps dans le plan perpendiculaire à sa direction de propagation $\mathbf{k}$, indépendamment du référentiel dans lequel elle est décrite. L'état de polarisation le plus général d'une onde plane est représenté par l'ellipse de la figure 1.9. Il peut donc être complètement décrit par deux angles : un angle d'orientation Ψ et un angle d'ellipticité χ. Quelle que soit la valeur de l'angle Ψ, le signe de χ indique le sens de rotation du vecteur $\mathbf{E}$: s'il est

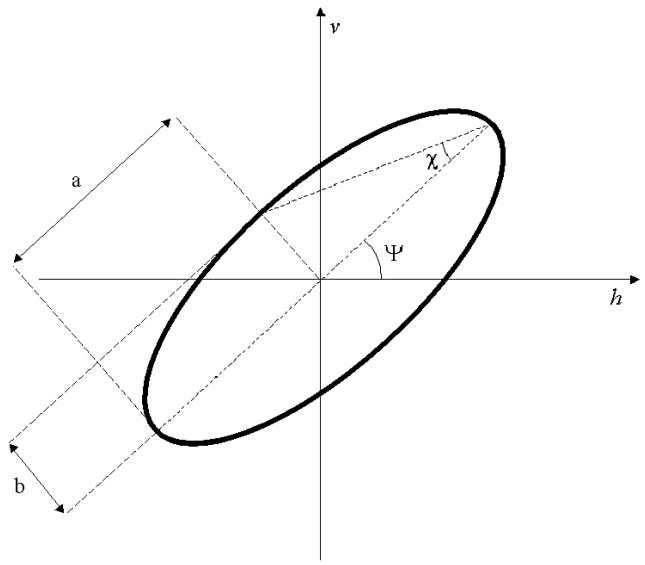

FIG. 1.9 – Ellipse de polarisation représentée dans le plan $\{h, v\}$. a et b sont les grand et petit axes de l'ellipse, Ψ et χ sont les angles d'orientation et d'ellipticité.

positif, la rotation s'effectue dans le sens senestre par définition, s'il est négatif, c'est dans le sens dextre. Lorsque χ est nul, la polarisation est dite linéaire, et lorsque celui-ci est égal à $\pm\pi/4$, il s'agit d'une polarisation circulaire et dans ce cas la valeur de l'angle Ψ n'a plus d'importance.

Le vecteur de Jones $\mathbf{E}$, qui est une représentation complexe et indépendante du temps du champ électrique, contient toute l'information pour décrire complètement une onde plane. Pour ce faire, en plus des deux angles Ψ et χ destinés à la caractérisation de son état de polarisation, deux paramètres supplémentaires sont nécessaires : son amplitude A_0, proportionnelle à la taille de l'ellipse, et sa phase absolue φ_0. L'expression du vecteur de Jones $\mathbf{E}$ en fonction de ces paramètres dans une base orthonormale quelconque $\{m, n\}$ est :

$$\mathbf{E}_{mn} = A_0 e^{-j\varphi_0} \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi \\ \sin\Psi & \cos\Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\chi \\ j\sin\chi \end{bmatrix} \tag{1.59}$$

Le milieu avec lequel interagit l'onde plane est quant à lui décrit par une matrice de rétrodiffusion $[S]$, appelée aussi matrice de Sinclair, qui contient les coefficients de rétrodiffusion S_{mn} associés aux polarisations co-polaires et croisées de la base $\{m, n\}$. Dans le cas de la base $\{h, v\}$, la matrice de rétrodiffusion s'exprime de la manière suivante :

$$[S] = \frac{e^{jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \tag{1.60}$$

e^{jkr}/r est lié à l'atténuation de l'onde durant son trajet, k étant le nombre d'onde. La puissance totale PT rétrodiffusée par la cible est égale à la somme des modules des coefficients de rétrodiffusion au carré :

$$PT = |S_{HH}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 \tag{1.61}$$

A titre d'exemple, le tableau 1.1 présente l'expression de matrices de rétrodiffusion relatives à quelques cibles canoniques dans une base de polarisations $\{m, n\}$ en fonction de l'angle η formé par l'axe de symétrie principal de la cible et l'axe de visée du radar. Selon les propriétés polarimétriques de la cible dont témoigne $[S]$, l'interaction d'une onde avec celle-ci peut conduire à un changement de la polarisation de l'onde incidente ainsi que de son degré de polarisation. La transformation de l'état de polarisation de l'onde incidente $\mathbf{E}_i$ en celui de l'onde réfléchie $\mathbf{E}_r$ est représentée par la relation suivante :

$$\mathbf{E}_r = [S]\mathbf{E}_i \ , \ \begin{bmatrix} E_h^r \\ E_v^r \end{bmatrix} = \frac{e^{jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \tag{1.62}$$

Le calcul d'un coefficient de rétrodiffusion correspondant à deux états de polarisation XY selon lesquels le signal est respectivement émis et reçu (décrits par les vecteurs de Jones respectifs $\mathbf{E}_{em}$ et $\mathbf{E}_{rec}$) est effectué en projetant le vecteur de Jones décrivant la polarisation du signal rétrodiffusé $\mathbf{E}_r$ sur celui qui est associé à l'état de polarisation de réception $\mathbf{E}_{rec}$:

$$\mathbf{E}_r = [S]\mathbf{E}_{em} \ , \ S_{XY} = {\mathbf{E}_{rec}}^T \mathbf{E}_r = {\mathbf{E}_{rec}}^T [S]\mathbf{E}_{em} \tag{1.63}$$

Cible canonique	Matrice de Sinclair
Sphère, plan, trièdre	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Dipôle	$\begin{bmatrix} \cos^2\eta & \frac{1}{2}\sin 2\eta \\ \frac{1}{2}\sin 2\eta & \sin^2\eta \end{bmatrix}$
Dièdre	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} \cos 2\eta & \sin 2\eta \\ \sin 2\eta & -\cos 2\eta \end{bmatrix}$
Hélice droite	$\frac{1}{2}e^{-j2\eta}\begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$
Hélice gauche	$\frac{1}{2}e^{j2\eta}\begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$

Tab. 1.1 – Matrices de Sinclair relatives à des cibles canoniques exprimées en fonction de l'angle η formé par l'axe principal de symétrie de la cible et l'axe de visée du radar.

1.4.2 Caractérisation des cibles naturelles

Les cibles naturelles ne sont généralement pas des rétrodiffuseurs déterministes dont les propriétés polarimétriques peuvent être représentées par une simple matrice de rétrodiffusion $[S]$ en raison de leur variabilité spatiale et temporelle. On parle alors de rétrodiffuseurs partiels dont une importante classe, très représentée parmi les surfaces naturelles, sont les rétrodiffuseurs spatialement distribués. Comme la matrice de rétrodiffusion mesurée sur une cellule de résolution résulte de la sommation cohérente de celles des rétrodiffuseurs contenus dans celle-ci, les propriétés polarimétriques d'un type de surface fluctuent d'une cellule de résolution à l'autre et il est nécessaire d'effectuer une mesure statistique des coefficients de rétrodiffusion.
La matrice de rétrodiffusion est formulée de manière vectorielle à l'aide de quatre éléments complexes définis dans [Cloude 96] :

$$\mathbf{k}_4 = \frac{1}{2}Trace([S]\Psi) = [k_0, k_1, k_2, k_3]^T \tag{1.64}$$

Ψ étant une base de projection définie par un ensemble de matrices. Deux bases de projection sont souvent utilisées : la base lexicographique Ψ_L et la base de Pauli Ψ_P.

$$\Psi_L = \left\{ 2\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, 2\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \tag{1.65}$$

La projection de la matrice de rétrodiffusion dans la base lexicographique permet d'obtenir un vecteur de rétrodiffusion, ou vecteur cible, qui contient les coefficients complexes de rétrodiffusion relatifs aux polarisations linéaires d'émission et de réception du système radar :

$$\mathbf{k}_{4L} = [S_{HH}, S_{HV}, S_{VH}, S_{VV}]^T \tag{1.66}$$

Dans le cas monostatique, $S_{HV} = S_{VH}$, donc un nouveau vecteur peut être défini ainsi :

$$\mathbf{k}_{3L} = [S_{HH}, \sqrt{2}S_{HV}, S_{VV}]^T \tag{1.67}$$

La seconde base correspond aux matrices de Pauli :

$$\Psi_P = \left\{ \sqrt{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2}\begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right\} \tag{1.68}$$

Le vecteur cible associé s'exprime de la sorte pour une configuration bistatique :

$$\mathbf{k}_{4P} = \frac{1}{\sqrt{2}}[S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, S_{HV} + S_{VH}, j(S_{HV} - S_{VH})]^T \tag{1.69}$$

Dans le cas monostatique, le dernier terme complexe s'annule, et le vecteur cible devient :

$$\mathbf{k}_{3P} = \frac{1}{\sqrt{2}}[S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{HV}]^T \tag{1.70}$$

La matrice permettant le passage de la base lexicographique à la base de Pauli est :

$$[D_3] = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \tag{1.71}$$

Ainsi :

$$\mathbf{k}_{3P} = [D_3]\mathbf{k}_{3L} \text{ et } \mathbf{k}_{3L} = [D_3]^{-1}\mathbf{k}_{3P} \tag{1.72}$$

L'utilisation de la base de Pauli présente un grand intérêt pour l'analyse polarimétrique des surfaces naturelles et urbaines car les polarisations qui la constituent sont directement reliées aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion. La confrontation du tableau 1.1 et de l'expression de la base des matrices de Pauli donnée par la relation 1.68 indique que le premier élément de Ψ_P représente la matrice de rétrodiffusion d'une surface plane (rétrodiffuseur isotrope). Le second élément du groupe de matrices de la base de Pauli est associé à un dièdre d'axe de symétrie principal vertical ($\eta = 0$). Ces types de rétrodiffuseurs, présents dans les zones urbaines et dans les forêts, sont à l'origine du mécanisme de rebonds multiples paires, dont la relation entre les coefficients des canaux co-polaires est : $S_{HH} = -S_{VV}$. La troisième matrice peut être interprétée comme la matrice de rétrodiffusion d'un dièdre orienté à $\eta = \pi/4$. Lorsque les éléments co-polaires sont non nuls, la présence de signal dans le canal HV est la signature d'un milieu dépolarisant, comme la végétation.

Afin de caractériser les propriétés polarimétriques des rétrodiffuseurs spatialement distribués, les matrices de covariance et de cohérence sont construites à partir du produit direct du vecteur cible $\mathbf{k}_3$ avec son transposé conjugué, dans les bases lexicographique et de Pauli respectivement. La matrice de covariance $[C]$ s'exprime donc ainsi :

$$\begin{aligned} [C] &= < \mathbf{k}_{3L}.\mathbf{k}_{3L}{}^{\dagger} > \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} < |S_{HH}|^2 > & \sqrt{2} < S_{HH}S_{HV}{}^* > & < S_{HH}S_{VV}{}^* > \\ \sqrt{2} < S_{HV}S_{HH}{}^* > & 2 < |S_{HV}|^2 > & \sqrt{2} < S_{HV}S_{VV}{}^* > \\ < S_{VV}S_{HH}{}^* > & \sqrt{2} < S_{VV}S_{HV}{}^* > & < |S_{VV}|^2 > \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{1.73}$$

$< \ldots >$ signifie qu'un moyennage spatial est effectué sur un milieu homogène et $\dagger$ symbolise l'opérateur "transposé conjugué". La matrice de cohérence est quant à elle définie de la manière suivante :

$$\begin{aligned} [T] &= < \mathbf{k}_{3P}.\mathbf{k}_{3P}{}^{\dagger} > \\ &= \begin{bmatrix} a & b & c \\ b^* & d & e \\ c^* & e^* & f \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{1.74}$$

avec

$$\begin{aligned} a &= < |S_{HH} + S_{VV}|^2 > \\ b &= < (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* > \\ c &= 2 < (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}{}^* > \\ d &= < |S_{HH} - S_{VV}|^2 > \\ e &= 2 < (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}{}^* > \\ f &= 4 < |S_{HV}|^2 > \end{aligned}$$

Ces deux matrices contiennent la même information. Le passage de l'une à l'autre s'effectue par la relation de passage suivante :

$$[T] =< \mathbf{k}_{3P}.\mathbf{k}_{3P}{}^{\dagger} >=< [D_3]\mathbf{k}_{3L}.\mathbf{k}_{3L}{}^{\dagger}[D_3]^{\dagger} >= [D_3][C][D_3]^{\dagger} \tag{1.75}$$

$$[C] =< \mathbf{k}_{3L}.\mathbf{k}_{3L}{}^{\dagger} >=< [D_3]\mathbf{k}_{3P}.\mathbf{k}_{3P}{}^{\dagger}[D_3]^{\dagger} >= [D_3][T][D_3]^{\dagger} \tag{1.76}$$

Les matrices de covariance $[C]$ et de cohérence $[T]$ sont hermitiennes semi-définies positives et possèdent donc les mêmes valeurs propres réelles et positives.

1.4.3 Définition des paramètres polarimétriques

1.4.3.1 Entropie et anisotropie

Afin de caractériser les propriétés polarimétriques des rétrodiffuseurs spatialement distribués, une analyse en composantes principales de la matrice de cohérence $[T]$ est introduite dans [Cloude 95].

La décomposition de la matrice de cohérence sur la base des vecteurs propres permet de décomposer un vecteur cible décrivant un rétrodiffuseur spatialement distribué en trois vecteurs cible "purs" orthogonaux [Cloude 96], [Cloude 97].

$$[T] = [V][\Lambda][V]^{\dagger} = \sum_{k=1}^{3} \lambda_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k{}^{\dagger} \tag{1.77}$$

$[\Lambda]$ est une matrice diagonale constituée des trois valeurs propres λ_k et V représente la matrice complexe contenant les vecteurs propres $\mathbf{v}_k$:

$$[V] = [V_1, V_2, V_3] \text{ et } \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \text{ avec } \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \tag{1.78}$$

La diagonalisation de la matrice de cohérence $[T]$ d'un rétrodiffuseur spatialement distribué, qui est de rang 3, permet de la décomposer en trois matrices de rang 1 témoignant d'un mécanisme déterministe de rétrodiffusion et donc associées à un vecteur cible pur. La matrice de cohérence $[T]$ résulte alors de la sommation non cohérente de trois matrices $[T_k]$ indépendantes formées par les vecteurs propres et pondérée chacune par la valeur propre associée :

$$[T] = \sum_{k=1}^{3} \lambda_k [T_k] \tag{1.79}$$

L'information du type de mécanisme de rétrodiffusion est contenue dans chaque matrice $[T_k]$ et la puissance correspondante est mesurée par la valeur propre λ_k. La somme de ces trois valeurs propres est par ailleurs égale à la puissance totale rétrodiffusée par la cible :

$$PT = \sum_{k=1}^{3} \lambda_k \tag{1.80}$$

La normalisation du spectre des valeurs propres par rapport à la puissance totale permet de rendre compte de la répartition de la puissance entre les différents mécanismes. La probabilité apparente de chaque contribution est définie de la sorte :

$$P_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^{3} \lambda_k} = \frac{\lambda_k}{PT} \text{ ainsi } \sum_{k=1}^{3} P_k = 1 \tag{1.81}$$

L'entropie polarimétrique H est définie comme la somme logarithmique des probabilités apparentes P_k :

$$H = -\sum_{k=1}^{3} P_k \log_3 P_k \tag{1.82}$$

Ce paramètre varie de 0 à 1 et constitue une mesure du déterminisme du mécanisme global de rétrodiffusion. Sa valeur est nulle lorsque la cible est pure, c'est-à-dire que sa matrice de

cohérence associée est de rang 1 et ne possède qu'une seule valeur propre non nulle. Le milieu est alors non dépolarisant et peut être décrit par sa matrice de rétrodiffusion $[S]$. L'entropie est égale à 1 lorsque les trois valeurs propres sont égales, indiquant un mécanisme de rétrodiffusion totalement aléatoire, ce qui est la propriété du bruit.

L'anisotropie A est définie comme étant la différence normalisée entre la seconde et la troisième probabilité apparente :

$$A = \frac{P_2 - P_3}{P_2 + P_3} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \tag{1.83}$$

L'anisotropie est aussi comprise entre 0 et 1 et quantifie l'importance relative entre les deux mécanismes secondaires de rétrodiffusion. Elle est égale à 1 lorsque seule la troisième valeur propre est nulle. Ce paramètre est nul lorsque $\lambda_2 = \lambda_3$. Ceci est le cas d'un milieu non dépolarisant ($\lambda_2 = \lambda_3 = 0$), mais aussi d'un milieu dépolarisant tel que $\lambda_2 = \lambda_3 > 0$.

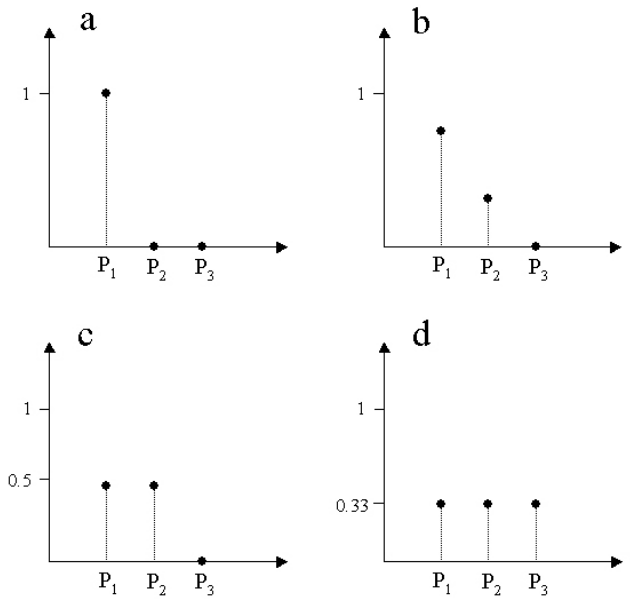

FIG. 1.10 – Représentation de spectres de probabilités apparentes P_k caractéristiques.

C'est pourquoi l'interprétation physique de la valeur de l'anisotropie doit se faire en considération de l'entropie H comme le montre la figure 1.10. Le schéma (a) correspond à une entropie et une anisotropie faible liées à un seul mécanisme dominant. Les schémas (b) et (c) sont représentatifs des cas où deux mécanismes de rétrodiffusion sont présents dans la même fenêtre. Lorsque la puissance d'un mécanisme est supérieure à l'autre, l'entropie sera plus faible que dans le cas où les deux mécanismes sont équivalents. Pour les deux configurations, comme il n'existe pas de troisième mécanisme, l'anisotropie est égale à 1. Enfin, le dernier schéma représente le spectre des probabilités apparentes d'un mécanisme totalement aléatoire, caractérisé par une entropie

égale à 1 et une anisotropie nulle. Les valeurs de ces paramètres sont invariantes par changement de base car elles ne dépendent pas de la base de polarisation dans laquelle la matrice de rétrodiffusion est mesurée.

Le moyennage spatial nécessaire à l'estimation de la matrice de cohérence implique cependant une perte de résolution de la représentation spatiale de l'entropie et de l'anisotropie comparée à celle de l'amplitude des coefficients de rétrodiffusion. En contre-partie, ceci a pour effet de réduire le bruit de speckle. Une taille de fenêtre minimale est requise pour estimer de manière non-biaisée chacun de ces paramètres : le nombre de looks doit être supérieur à 81 pour estimer l'entropie et supérieur à 121 pour l'anisotropie [Lopez-Martinez 05].

1.4.3.2 L'angle alpha

Les coordonnées d'un vecteur unitaire complexe dans un repère orthonormé tri-dimensionnel s'expriment à l'aide de cinq angles. L'expression la plus générale d'un vecteur propre est alors :

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{k}_p}{|\mathbf{k}_p|} \begin{bmatrix} \cos\alpha e^{j\varphi_1} \\ \sin\alpha\cos\beta e^{j\varphi_2} \\ \sin\alpha\sin\beta e^{j\varphi_3} \end{bmatrix} \tag{1.84}$$

D'après [Cloude 97], il est toujours possible de réduire un vecteur unitaire arbitraire à un vecteur identité $[1, 0, 0]^T$ par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_3} \end{bmatrix} \mathbf{v} \tag{1.85}$$

Comme il est résumé dans [Hajnsek 01], la troisième matrice exprime les relations entre les phases des trois éléments du vecteur $\mathbf{v}$. La seconde est quant à elle associée à la rotation de la cible par rapport à la direction de visée du radar. Seule la première matrice représente les propriétés polarimétriques de la cible. L'angle α est alors utilisé pour décrire le type de mécanisme de rétrodiffusion. En pratique, chaque angle α_k est obtenu à partir de la valeur absolue du premier élément de son vecteur propre correspondant $\mathbf{v}_k$ de la manière suivante :

$$\mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} v_{k_1} \\ v_{k_2} \\ v_{k_3} \end{bmatrix} \text{ et } \alpha_k = \arccos|v_{k_1}| \tag{1.86}$$

Comme la matrice [V] de la relation 1.77 ne possède que huit degrés de liberté et que la paramétrisation des trois vecteurs propres nécessite quinze angles, chaque angle α_k ne peut être interprété indépendamment. C'est pourquoi seule la caractérisation d'un mécanisme dominant est possible. Ainsi, l'angle α est défini par la somme des trois angles α_k pondérés par leurs probabilités apparentes respectives P_k :

$$\alpha = \sum_{k=1}^{3} P_k \alpha_k \tag{1.87}$$

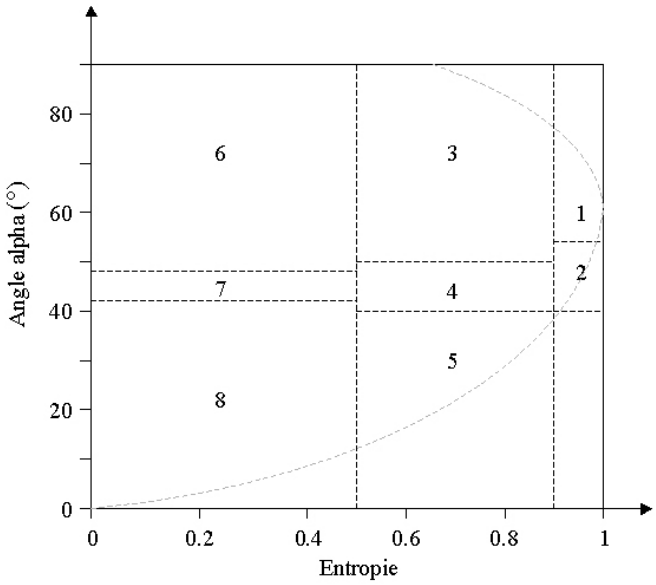

FIG. 1.11 – Représentation schématique des 8 régions utilisées pour effectuer la classification en entropie-alpha.

Le croisement de ce paramètre avec l'entropie est un moyen robuste d'effectuer une classification des surfaces naturelles et urbaines, appelée classification en entropie-alpha [Cloude 97], [Lee J.-S. 99]. Comme il sera illustré dans la section 1.7, une analyse en anisotropie-alpha complémentaire offre des possibilités de discrimination supplémentaires entre les surfaces naturelles et les surfaces urbaines.
L'axe de graduation de la valeur de l'angle alpha est délimité en trois parties : un faible angle alpha correspond au mécanisme de rétrodiffusion de surface, un angle alpha de l'ordre de 45° témoigne de la rétrodiffusion de volume généralement observée sur la végétation, et les valeurs qui tendent vers 90° sont la signature d'un mécanisme de rebonds multiples pairs, qui est essentiellement présent en milieu urbain.

1.5 Fondements de l'interférométrie polarimétrique

L'interférométrie polarimétrique (PolInSAR) est une technique récente [Cloude 98] dont le potentiel pour l'inversion des paramètres physiques de différents types de surfaces naturelles (forêt, couverture de neige...) est très prometteur et toujours en cours d'évaluation [Papathanassiou 03a], [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 05]. Comme nous l'avons vu précédemment, l'analyse d'un jeu de données polarimétriques permet la discrimination des cibles (surfaces naturelles et artificielles). L'interférométrie est quant à elle une technique permettant d'une part de mesurer simplement la hauteur des rétrodiffuseurs et d'autre part d'accéder à une information sur leur structures par la mesure de la cohérence. La connaissance de ce type d'information pour tous les états de polarisation prend tout son intérêt sur les surfaces dont les centres de phase polarimétriques sont

positionnés à différentes hauteurs (forêts, surfaces agricoles, zones urbaines), ou dont la cohérence est variable en fonction de la polarisation (surfaces agricoles de faible hauteur). La figure 1.12 illustre les différents types d'information accessibles par la polarimétrie, l'interférométrie et l'interférométrie polarimétrique, ainsi que leur complémentarité, en prenant l'exemple d'un milieu où la distribution verticale des rétrodiffuseurs change avec la polarisation. En plus de l'identification des mécanismes de rétrodiffusion à l'aide de l'information polarimétrique, un système interférométrique constitué de deux antennes complètement polarimétriques possède la capacité de localiser verticalement les centres de phase de ces mécanismes, permettant ainsi d'identifier les rétrodiffuseurs et de les associer à des éléments structuraux de la cible.

L'enrichissement d'une dimension polarimétrique comparé à l'interférométrie classique im-

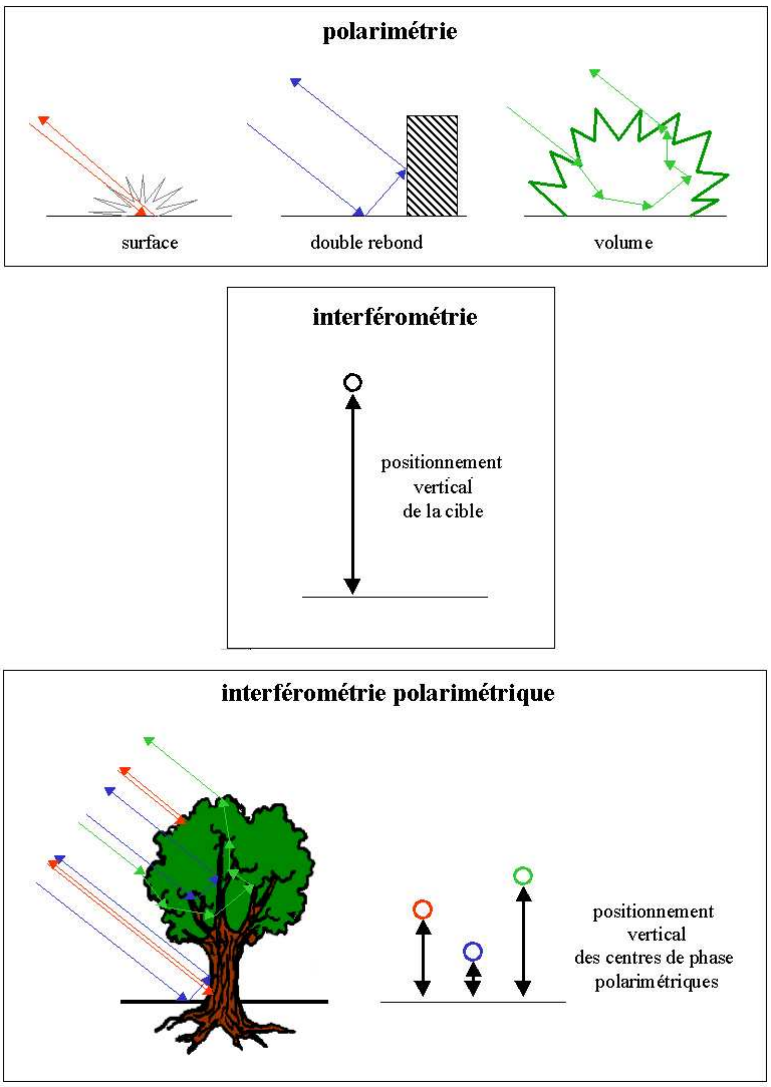

FIG. 1.12 – Illustration de la comparaison de l'information contenue dans des données polarimétriques, interférométriques et interféro-polarimétriques pour l'exemple de la forêt.

plique une reformulation de la cohérence interférométrique. Les propriétés polarimétriques des images reçues par chaque antenne interférométrique peuvent être représentées par leur vecteur de Pauli :

$$\begin{aligned} \mathbf{k_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}}[S_{1_{HH}} + S_{1_{VV}}, S_{1_{HH}} - S_{1_{VV}}, 2S_{1_{HV}}]^T \\ \mathbf{k_2} &= \frac{1}{\sqrt{2}}[S_{2_{HH}} + S_{2_{VV}}, S_{2_{HH}} - S_{2_{VV}}, 2S_{2_{HV}}]^T \end{aligned} \tag{1.88}$$

Cette base de polarisations est choisie car elle est représentative des mécanismes élémentaires de rétrodiffusion. Les deux vecteurs sont concaténés afin de former un vecteur contenant six éléments complexes. Du produit de ce nouveau vecteur avec son transposé et conjugué résulte une matrice de cohérence hermitienne positive semi définie :

$$[T_6] = \left\langle \begin{bmatrix} \mathbf{k_1} \\ \mathbf{k_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k_1 k_2} \end{bmatrix}^* \right\rangle = \begin{bmatrix} [T_{11}] & [\Omega_{12}] \\ [\Omega_{12}]^\dagger & [T_{22}] \end{bmatrix} \tag{1.89}$$

Cette matrice contient l'information polarimétrique de chacune des deux images ainsi que l'information interféro-polarimétrique :

$$[T_{11}] =< \mathbf{k}_1.\mathbf{k}_1{}^\dagger > \ , [T_{22}] =< \mathbf{k}_2.\mathbf{k}_2{}^\dagger > \text{ et } [\Omega_{12}] =< \mathbf{k}_1.\mathbf{k}_2{}^\dagger > \tag{1.90}$$

Les matrices $[T_{11}]$ et $[T_{22}]$ sont les matrices de cohérence polarimétrique définies dans la partie précédente (relation 1.75) relatives aux deux antennes, et la matrice $[\Omega_{12}]$ contient l'information des phases interférométriques entre les différents canaux polarimétriques. Comme $\mathbf{k}_1 \neq \mathbf{k}_2$ la matrice $[\Omega_{12}]$ n'est pas hermitienne :

$$< \mathbf{k}_1.\mathbf{k}_2{}^\dagger > \neq < \mathbf{k}_2.\mathbf{k}_1{}^\dagger > \text{ donc } [\Omega_{12}] \neq [\Omega_{12}]^\dagger \tag{1.91}$$

L'état de polarisation d'une onde est totalement décrit par le vecteur unitaire $\mathbf{w}$, qui symbolise un couple de polarisations émission/réception. La projection du vecteur de rétrodiffusion $\mathbf{k}$ sur le vecteur unitaire $\mathbf{w}$ permet d'obtenir le coefficient de rétrodiffusion μ associé au mécanisme de rétrodiffusion.

$$\mu_1 = \mathbf{w}_1{}^\dagger \mathbf{k}_1 \text{ et } \mu_2 = \mathbf{w}_2{}^\dagger \mathbf{k}_2 \tag{1.92}$$

La formation d'un interférogramme, comme dans le cas de l'interférométrie classique (relation 1.27), s'effectue ainsi :

$$\mu_1 \mu_2{}^* = (\mathbf{w}_1{}^\dagger \mathbf{k}_1)(\mathbf{k}_2{}^\dagger \mathbf{w}_2) = \mathbf{w}_1{}^\dagger [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2 \tag{1.93}$$

La phase interférométrique est :

$$\Psi = Arg(\mathbf{w}_1{}^\dagger [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2) \tag{1.94}$$

L'expression générale de la cohérence interférométrique de deux signaux μ_1 et μ_2 relatifs à deux mécanismes de rétrodiffusion $\mathbf{w}_1$ et $\mathbf{w}_2$ est donnée par la relation :

$$\gamma(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \frac{< \mu_1 \mu_2{}^* >}{\sqrt{< |\mu_1|^2 >< |\mu_2|^2 >}} = \frac{< \mathbf{w}_1{}^\dagger [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2 >}{\sqrt{< \mathbf{w}_1{}^\dagger [T_{11}] \mathbf{w}_2 >< \mathbf{w}_1{}^\dagger [T_{22}] \mathbf{w}_2 >}} \tag{1.95}$$

De même que 1.41, $0 \leq |\gamma_{\mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2}| \leq 1$.

Cette cohérence interférométrique peut se décomposer ainsi :

$$\gamma(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2) = \gamma_{pol} \gamma_{int} \tag{1.96}$$

où γ_{pol} devient égal à 1 lorsque $\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_2$. Par la suite, nous ne considérerons que cette configuration car elle assure les cohérences les plus élevées. La cohérence interférométrique des canaux polarimétriques linéaires est obtenue pour les valeurs de $\mathbf{w}$ suivantes ($\mathbf{w} = \mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_2$) :

$$\begin{array}{lcl} \gamma_{HH} & \rightarrow & \mathbf{w} = [1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2}, 0]^T \\ \gamma_{HV} & \rightarrow & \mathbf{w} = [0, 0, 1]^T \\ \gamma_{VV} & \rightarrow & \mathbf{w} = [1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0]^T \end{array} \tag{1.97}$$

En ce qui concerne la cohérence $|\gamma|$, la richesse de l'information PolInSAR tient au fait qu'elle peut être variable en fonction de la polarisation sur certains types de surface, comme la forêt, les surfaces agricoles et les zones urbaines. Il est donc possible d'optimiser la cohérence en fonction de la polarisation. La méthode d'optimisation [Cloude 98] doit être cohérente afin de ne pas perdre l'information de la phase interférométrique.
La maximisation de la cohérence s'effectue en utilisant le Lagrangien :

$$L = |\mathbf{w}_1{}^\dagger [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2| + \lambda_1 (\mathbf{w}_1{}^\dagger [T_{11}] \mathbf{w}_1 - c_1) + \lambda_2 (\mathbf{w}_2{}^\dagger [T_{22}] \mathbf{w}_2 - c_2) \tag{1.98}$$

c_1 et c_2 sont des constantes, λ_1 et λ_1 sont les coefficients multiplicatifs de Lagrange nécessaires à la maximisation du numérateur. L'annulation des dérivées partielles suivantes permettent de maximiser L :

$$\begin{array}{lcl} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}_1{}^\dagger} = [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2 + \lambda_1 [T_{11}] \mathbf{w}_1 = 0 & \rightarrow & \mathbf{w}_1{}^\dagger [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2 = -\lambda_1 \mathbf{w}_1{}^\dagger [T_{11}] \mathbf{w}_1 \\ \frac{\partial L^*}{\partial \mathbf{w}_2{}^\dagger} = [\Omega_{12}]^\dagger \mathbf{w}_1 + \lambda_2{}^* [T_{22}] \mathbf{w}_2 = 0 & \rightarrow & \mathbf{w}_2{}^\dagger [\Omega_{12}]^\dagger \mathbf{w}_1 = -\lambda_2{}^* \mathbf{w}_2{}^\dagger [T_{22}] \mathbf{w}_2 \end{array} \tag{1.99}$$

Le système de matrices à décomposer en vecteurs et valeurs propres est formulé de la manière suivante, avec la valeur propre commune aux deux systèmes $\nu = \lambda_1 \lambda_2{}^*$:

$$\begin{array}{l} [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^\dagger [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] \mathbf{w}_2 = \nu \mathbf{w}_2 \\ [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^\dagger \mathbf{w}_1 = \nu \mathbf{w}_1 \end{array} \tag{1.100}$$

Les cohérences optimales sont égales à la racine carrée des valeurs propres et la phase interférométrique correspondante est celle de l'interférogramme formé par les vecteurs propres $\mathbf{w}_{opt1_k}$ et $\mathbf{w}_{opt2_k}$ [Papathanassiou 03a] :

$$\gamma_{opt_k} = \sqrt{\nu_k} e^{jArg(\mathbf{w}_{opt1_k}{}^\dagger [\Omega_{12}] \mathbf{w}_{opt2_k})} \tag{1.101}$$

La maximisation du Lagrangien assure de fortes valeurs aux trois cohérences optimales γ_{opt_k}, dans l'intervalle des cohérences calculées pour des états de polarisation similaires aux deux extrémités de la ligne de base ($|\gamma_{\mathbf{w}_1 \mathbf{w}_2}|$ pour $\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_2$).

1.6 La calibration de données PolInSAR

1.6.1 Description du système RAMSES

Le Département d'ElectroMagnétisme et Radar (DEMR) de l'ONERA a travaillé durant ces dernières années à l'amélioration permanente d'un système d'acquisition SAR expérimental : le système RAMSES (RAdar Multi-Spectral pour l'Étude des Signatures) [Boutry 01], [Dubois-Fernandez 04]. L'ONERA teste continuellement des nouvelles technologies sur ce système d'acquisition radar

Fig. 1.13 – Système RAMSES visible dans l'ouverture de la porte sur le flanc du Transall (à gauche) et baies numériques permettant la gestion et le contrôle de l'acquisition durant le vol (à droite).

très flexible et en constante évolution. La plate-forme transportant le système RAMSES est un Transall C160, comme le montre figure 1.13, fourni par le Centre d'Essais en Vol. Pour chaque campagne d'acquisition, il est possible d'installer les systèmes radar correspondant à trois fréquences différentes parmi les huit disponibles, énumérées dans le tableau 1.2, et d'en émettre deux simultanément au cours d'un même vol. Il est possible également d'émettre et de

Bande	Fréquence centrale (GHz)	Bande passante (MHz)	Polarisations	Mode
P	0.43	75	toutes	
L	1.3	200	toutes	
S	3.2	300	toutes	
C	5.3	300	toutes	
X	9.5	1200	toutes	PolInSAR, IF MB
Ku	14.3	1200	toutes	PolInSAR, IF MB
Ka	35	1200		
W	95	500		

Tab. 1.2 – Tableau récapitulatif des caractéristiques du système RAMSES. "PolInSAR" indique la capacité de recevoir toutes les polarisations simultanément par deux antennes lors du même vol et "IF MB" indique que les antennes peuvent être utilisées dans une configuration de plusieurs lignes de base.

recevoir dans les polarisations linéaires horizontales et verticales quelle que soit la fréquence, à l'exception des bandes Ka et W. Les bandes passantes et formes d'onde sont adaptables aux besoins des thématiques de chaque campagne réalisant le meilleur compromis entre la largeur

de fauchée et la résolution en distance. Enfin, l'angle d'incidence peut être fixé de 30° à 85°.

Une singularité du système RAMSES est sa possibilité de produire des données de très haute résolution spatiale (THR), nécessitant de larges bandes passantes (bien supérieures à 200 MHz), c'est pourquoi le mode de "démodulation en réception" est utilisée lors de l'acquisition des signaux des différents canaux polarimétriques et interférométriques.

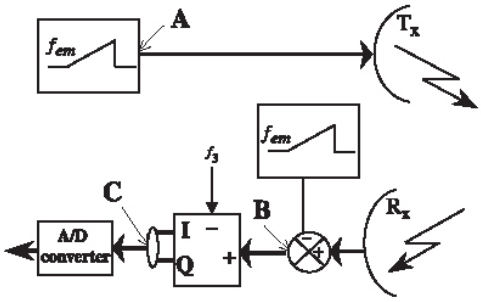

FIG. 1.14 – Diagramme synoptique du système RAMSES. (Figure issue de [Dubois-Fernandez 05].)

Le diagramme synoptique du système RAMSES est représenté sur la figure 1.14. Au point A, un signal de type "chirp" s_1 est généré et émis par l'antenne T_x :

$$s_1(t) = e^{2\pi j(f_{em}t + \frac{p}{2}t^2)} \tag{1.102}$$

p étant la pente du chirp et f_{em} étant sa fréquence centrale. Le signal est ensuite reçu par l'antenne R_x et mélangé avec une réplique :

$$\begin{aligned} s_2(t) &= e^{2\pi j(f_{em}t + \frac{p}{2}t^2)} \\ &= s_1(t - \tau_{em}){s_1}^*(t - t_p) \\ &= e^{2\pi j\left[f_{em}(t-\tau_{em}) + \frac{p}{2}(t-\tau_{em})^2\right]} \times e^{-2\pi j\left[f_{em}(t-t_p) + \frac{p}{2}(t-t_p)^2\right]} \qquad (1.103) \\ \tau_{em} &= \tau_{t_1} + \tau_p + \tau_{r_1} \qquad (1.104) \end{aligned}$$

où τ_{t_1} est le retard électronique induit par le canal d'émission, τ_p est le temps de propagation (aller-retour) lié au parcours de l'onde jusqu'à un rétrodiffuseur situé à une distance $R = \tau_p c/2$ et τ_{r_1} est le retard électronique généré par le canal de réception jusqu'au point B. La démodulation du signal s_2 est effectuée entre le point B et le point C. Il est alors mélangé à un signal de fréquence f_3 de la manière suivante :

$$s_3(t) = s_2(t - \tau_2)e^{-2\pi f_3 t} \tag{1.105}$$

τ_2 étant le retard électronique entre les points B et C. Au point C, le signal s_3 s'écrit :

$$s_3(t) = e^{2\pi j[-f_3 - p(t_{em} - t_p)t]} \times e^{2\pi j\left[(f_{em} - p\tau_2)(t_p - \tau_{em}) - \frac{p}{2}({t_p}^2 - {\tau_{em}}^2)\right]} \tag{1.106}$$

La fréquence de ce signal est variable en fonction de la distance :

$$f = -f_3 - p(\tau_{em} - t_p) \tag{1.107}$$

En pratique, f_3 est sélectionnée de telle sorte que l'intervalle des fréquences associées à la largeur de fauchée corresponde au filtre passe-bas utilisé avant la numérisation du signal s_3 (effectuée après le point C). Pour une certaine case distance, cette fréquence va être légèrement décalée du fait que les retards électroniques n'ont pas été complètement compensés. Ceux-ci étant variables d'un canal à l'autre, la conséquence va être un léger décalage relatif des images en distance. Après la compression en distance, la phase du signal va conserver une composante variable en distance (second terme de 1.106). En polarimétrie, la différence de phase entre les canaux est un paramètre déterminant. Celle-ci, aussi variable en fonction de la distance, s'exprime ainsi :

$$\Delta\phi = 2\pi p(\Delta\tau_{em} - \Delta\tau_2)\tau_{em} + 2\pi p\Delta\tau_2 t_p - 2\pi(f_{em} + p\tau_2)\Delta\tau_{em} \tag{1.108}$$

où $\Delta\tau_{em}$ et $\Delta\tau_2$ sont les retards électroniques différentiels. Le terme devant τ_{em} génère une pente fonction de la distance.
Enfin, les filtres utilisés aux points B et C sont susceptibles d'introduire une variation de phase non-linéaire en fréquence provoquant une variation non-linéaire de phase en distance.

1.6.2 Principe de la méthode de calibration [Dubois-Fernandez 05]

Le jeu de données PolInSAR a préalablement fait l'objet d'une calibration polarimétrique et d'une calibration interférométrique indépendantes. Le détail de ces techniques de calibration couramment utilisées sur des données SAR aéroportées est plus amplement décrit dans [Dubois-Fernandez 05]. Initialement, une calibration interférométrique du canal HH a été effectuée, suivie de la calibration polarimétrique des jeux de données reçus par les deux antennes interférométriques comme il est schématiquement représenté sur la figure 1.15. La calibration interférométrique entre les autres canaux polarimétriques n'apparaissant pas satisfaisante, une méthodologie prenant en compte tous les termes de distorsion de manière globale a dû être élaborée.

Soient $Z_{m_{XY}}$ et $Z_{e_{XY}}$ les signaux reçus respectivement par les antennes interférométriques maître m et esclave e, dont X représente la polarisation émise et Y, la polarisation reçue. Une correction du décalage en distance de ces deux signaux est effectuée préalablement et les diagrammes d'antenne ont été compensés. Les coefficients de rétrodiffusion théoriquement obtenus par les deux antennes interférométriques dans l'hypothèse où il n'y a aucune perturbation du signal sont notés $S_{m_{XY}}$ et $S_{e_{XY}}$. Les canaux d'émission relatifs aux polarisations H et V introduisent respectivement une variation de phase en distance φ_{t_H} et φ_{t_V}. De même, les canaux de réception sont à l'origine des mêmes types de perturbation, que l'on nommera φ_{m_Y} et φ_{e_Y}, pour $Y \in \{H, V\}$. Le gain associé à ces différents canaux sera noté A_{i_P}, pour $i \in \{t, m, e\}$ (t : antenne d'émission, m : antenne de réception maître et e : antenne de réception esclave), et pour la polarisation $P \in \{X, Y\}$. Le modèle de distorsion utilisé pour la calibration est le suivant :

$$Z_{m_{XY}} = A_{t_X} A_{m_Y} e^{j(\varphi_{t_X} + \varphi_{m_Y})} S_{m_{XY}} \tag{1.109}$$

$$Z_{e_{XY}} = A_{t_X} A_{e_Y} e^{j(\varphi_{t_X} + \varphi_{e_Y})} S_{e_{XY}} \tag{1.110}$$

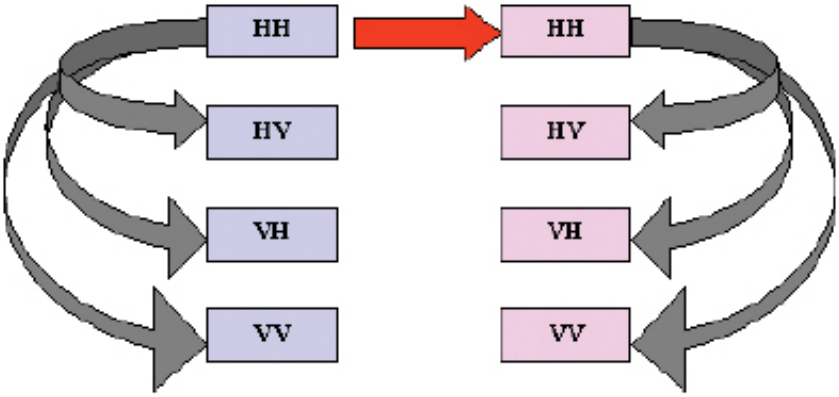

FIG. 1.15 – Stratégie initiale de calibration d'un jeu de données PolInSAR. Le couple interférométrique correspondant au canal HH est d'abord calibré, puis une calibration polarimétrique est effectuée sur les deux jeux polarimétriques. (Figure issue de [Dubois-Fernandez 05].)

Le système d'équations présente douze inconnues : six phases et six amplitudes supposées constantes sur la fauchée. La détermination des termes d'amplitude est effectuée par l'algorithme utilisé lors de la calibration polarimétrique. Les termes de phase peuvent être estimées sur la base des relations suivantes.

– équations polarimétriques pour chaque jeu interférométrique i :

Deux équations sont déduites du principe de réciprocité entre HV et VH,

$$Arg(S_{i_{HV}} S_{i_{VH}}{}^*) = 0 \tag{1.111}$$

et deux équations proviennent des propriétés des trièdres :

$$Arg(S_{i_{HH}} S_{i_{VV}}{}^*) = 0 \tag{1.112}$$

– équations interférométriques :

Sur des points brillants,

$$MNE_{HH_A} = MNE_{HV_A} = MNE_{VV_A} \tag{1.113}$$

A est un point brillant et MNE_{XY_A} représente la hauteur du centre de phase associé à ce canal polarimétrique XY (Modèle Numérique d'Élévation).

– équations PolInSAR :

Sur les surfaces nues ou les champs contenant de la végétation basse, dont la hauteur limite est déterminée par la hauteur d'ambiguïté,

$$MNE_{HH} = MNE_{VV} \tag{1.114}$$

N'importe où sur l'image,

$$MNE_{HV} = MNE_{VH} \tag{1.115}$$

En pratique, les variations non-linéaires de la phase en fonction de la distance obligent la généralisation de l'hypothèse associée aux propriétés du trièdre ($Arg(S_{i_{HH}} S_{i_{VV}}{}^*) = 0$) aux surfaces nues.

La précision de cette méthode de calibration PolInSAR est estimée à 3° sur la différence de phase interférométrique entre les canaux polarimétriques.

1.7 Exemple des structures urbaines en Bande X

1.7.1 Les données RITAS

1.7.1.1 Présentation

Les données RITAS (Radar Imagerie pour les Thématiques Agricoles et de Sol) représentées sur la figure 1.16 ont été acquises en Mars 2002 dans le cadre d'un projet du PNTS dans la région d'Avignon, par le système RAMSES [Dubois-Fernandez 04] de l'ONERA, qui a déjà été présenté dans la section 1.6, en coopération avec l'INRA, le BRGM, le CETP et le CEMAGREF.

Bande	X
Mode	PolInSAR
Hauteur d'ambiguïté	$\simeq$ 250 m (mono-passe)
Angle d'incidence	30°
Résolution	0,80 m x 0,94 m

Tab. 1.3 – Paramètres système de l'acquisition des données RITAS.

Il s'agit de données PolInSAR en bande X dont la résolution est supérieure au mètre et dont l'angle d'incidence est faible, comparable au cas spatial (tableau 1.3). Comme l'acquisition des données s'est effectuée de manière simultanée par les antennes maître et esclave (acquisition mono-passe), les données interférométriques ne sont affectées par aucune décorrélation temporelle. L'objectif de cette campagne était de générer des données PolInSAR couvrant différents types de surfaces naturelles (sols nus, surfaces agricoles et forêts de pins) ainsi que des zones urbaines (bâtiments épars et une partie de la ville de Montfavet).

Les données RITAS ont été acquises selon un axe Nord-Sud. La partie gauche de la figure 1.16 représente la carte de σ_0 polarimétrique normalisé codé en RGB correspondant aux polarisations de la base de Pauli. Les intensités relatives $\sigma_{0_{HH+VV}}$, $\sigma_{0_{HV}}$ et $\sigma_{0_{HH-VV}}$ sont respectivement représentées en rouge, vert et bleu. Ainsi les surfaces nues apparaissent en rouge, la végétation en vert et les structures urbaines, caractérisées par la présence du mécanisme de double rebond,

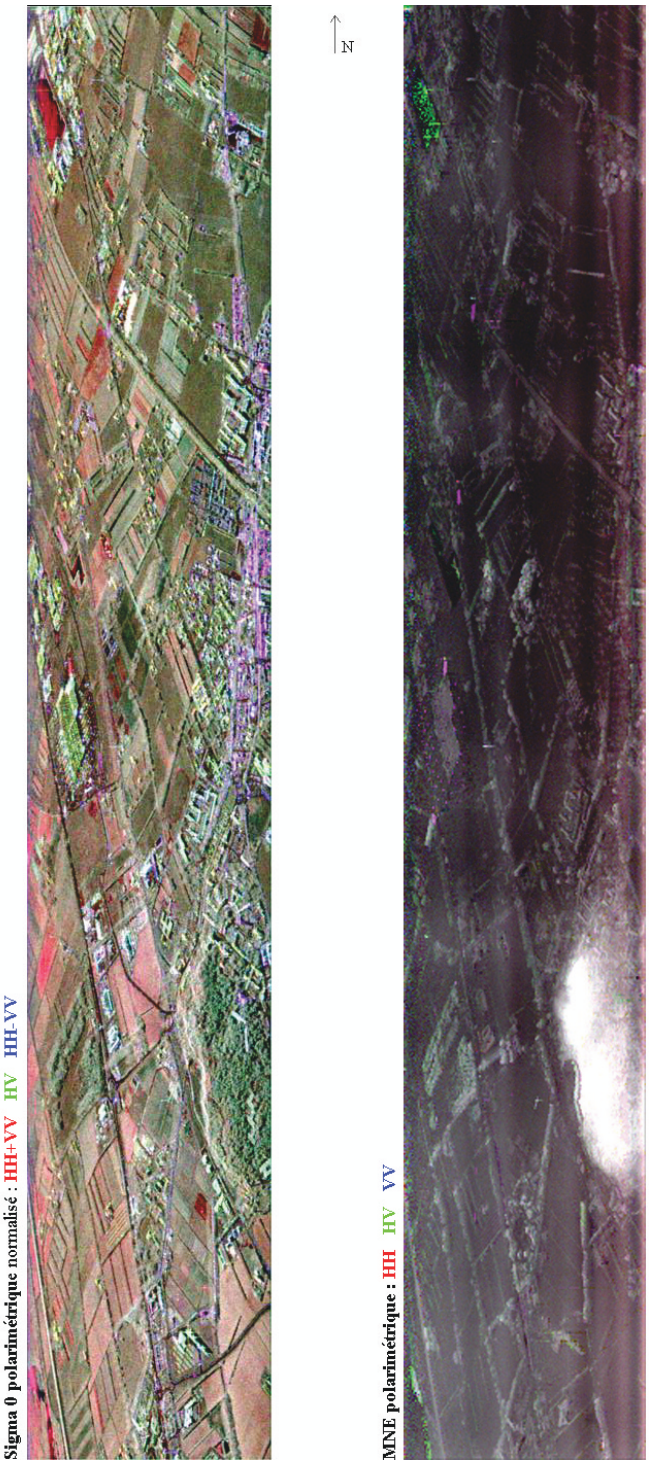

FIG. 1.16 – Données PolInSAR bande X RITAS acquise selon une trajectoire Nord-Sud. A gauche est représenté le σ_0 polarimétrique normalisé de la base de Pauli en RGB. A droite figure un MNE polarimétrique dont la hauteur est codée en RGB dans la base lexicographique.

FIG. 1.17 – Carte de répartition des différents types de végétation sur les données RITAS.

en bleu. Sur la partie droite de la figure 1.16 est représenté un MNE polarimétrique des données. La hauteur des centres de phase polarimétriques est codée en RGB dans la base lexicographique : l'intensité de la couleur rouge est proportionnelle à la hauteur du centre de phase associé à la

polarisation HH, le vert est associé au canal HV et le bleu au canal VV. Comme l'intensité de la couleur croît avec la hauteur, les reliefs induisant une augmentation de la hauteur dans les trois canaux polarimétriques apparaissent en clair (constructions urbaines et végétation haute : haies de platanes, de cyprès et forêts de pin). La colline de Monfavet, seul relief d'ordre géologique, correspond à la zone blanche.
La première partie des mesures au sol a été effectuée lors de l'acquisition des données sur le site de l'INRA d'Avignon par le personnel des organismes impliqués dans la campagne RITAS et la seconde, constituant une partie du travail effectuée dans cette thèse, concerne l'ensemble des données et s'est déroulée dans l'année qui a suivi l'acquisition. La figure 1.17 illustre la couverture spatiale de cette campagne de mesures au sol. Les espèces végétales ont été répertoriées et leurs dimensions spatiales ont été mesurées, de même que celles de certains bâtiments.

1.7.1.2 Limitation des données

L'acquisition des données RITAS a été effectuée par deux antennes interférométriques transportées à bord du transall et séparées par une courte ligne de base (63 cm).

La première conséquence est une forte altitude d'ambiguïté qui varie de 230 à 270 m sur toute la fauchée. La précision de la différence de phase entre les canaux polarimétriques associée à la calibration PolInSAR, qui est de l'ordre de 3°, se traduit par une précision de 2 m en hauteur. C'est pourquoi seules les différences de hauteur entre les centres de phase polarimétriques des zones urbaines et de la forêt de pins seront exploitées, la végétation agricole étant généralement de hauteur inférieure à cette précision.

FIG. 1.18 – Cartes de cohérence interférométrique (comprise entre 0 et 1) correspondant respectivement aux canaux polarimétriques HH, HV, VH et VV.

La seconde conséquence est une cohérence très élevée quel que soit le canal polarimétrique, comme le montre la figure 1.18, grâce à une faible décorrélation géométrique. La cohérence atteint 0.98 sur les surfaces nues pour les canaux HH, HV et VV.

FIG. 1.19 – Couples de cartes de cohérence polarimétrique (comprise entre 0 et 1) correspondant aux deux antennes interférométriques entre les canaux HH et VV (à gauche) et entre les canaux HV et VH (à droite).

Cependant, une forte décorrélation sur toute l'image est observable dans le cas du canal VH. De même, une légère décorrélation du signal VV est présente (la cohérence interférométrique de ce canal est globalement inférieure à celle du canal HV). L'émission avec le système RAMSES [Dubois-Fernandez 04] est effectuée avec une seule antenne dans les polarisations linéaires horizontales et verticales successivement. Les cohérences polarimétriques entre les canaux HH et VV ($|\rho_{HHVV}|$) pour chacune des deux antennes interférométriques sont représentées sur la moitié gauche de la figure 1.19 et celles des canaux HV et VH ($|\rho_{HVVH}|$) sur la moitié droite. Notons que les surfaces de sol apparaissent toutes en blanc, où la cohérence polarimétrique $|\rho_{HHVV}|$ est la plus élevée, quelle que soit leur rugosité. En revanche, la partie droite de la figure 1.19 révèle que la réciprocité entre les coefficients de rétrodiffusion $S_{HV} = S_{VH}$ n'est pas vérifiée, et que par conséquent la cohérence polarimétrique $|\rho_{HVVH}| \neq 1$. De plus, aucune de ces deux cohérences polarimétriques ne diffère d'une antenne interférométrique à l'autre. Le bruit étant à l'origine des pertes de cohérence dans les canaux VH et VV, observées sur la figure 1.18, est alors attribué à l'émission en polarisation verticale et peut être relié au dysfonctionnement du commutateur de polarisations constaté lors de l'acquisition. Le canal VH est alors inutilisable. En ce qui concerne le canal VV, même si la calibration polarimétrique se révèle satisfaisante,

l'information interférométrique demeure quant à elle biaisée. La valeur de la cohérence relative à ce canal polarimétrique ne pourra être utilisée que de manière qualitative. La conséquence sur la phase de la cohérence interférométrique n'est qu'une très légère augmentation de son écart-type, mais sa valeur moyenne est conservée.

1.7.2 Inversion de la hauteur des constructions urbaines

1.7.2.1 Caractérisation polarimétrique

Les zones urbaines ne constituent généralement pas un milieu aussi dépolarisant que la végétation. Une réponse en polarisation croisée (reçue dans le canal HV) est plus généralement la signature d'une structure particulière possédant une géométrie de type "dièdre orienté à 45°", comme l'indique le tableau 1.1. Les contributions présentes dans les canaux co-polaires, liées aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion tels que le mécanisme de double rebond et de rétrodiffusion de surface, apparaissent bien plus étroitement liées à la géométrie spatiale des constructions urbaines (les zones urbaines apparaissent en bleu sur carte du σ_0 polarimétrique normalisé de la figure 1.16 en raison d'une forte contribution du mécanisme de double rebond).

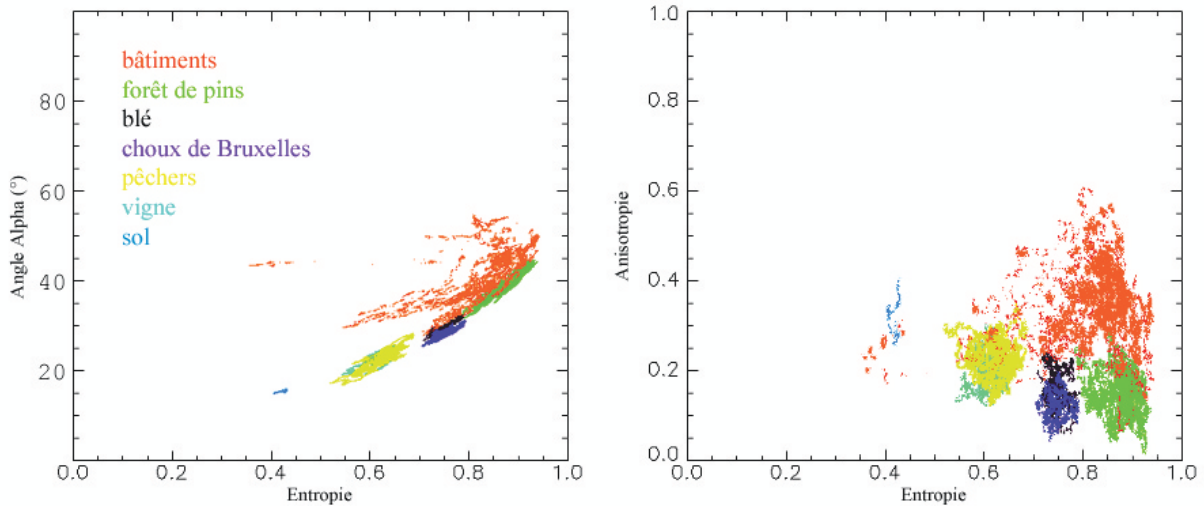

FIG. 1.20 – Analyse en entropie/alpha (à gauche) et en entropie/anisotropie (à droite) de différents types de surfaces naturelles et d'une zone urbaine.

Le diagramme de gauche de la figure 1.20 présente une analyse classique en entropie/alpha de différentes surfaces naturelles et d'une zone urbaine, que nous considérerons seulement dans cette partie. Chacun des deux paramètres polarimétriques estimés sur les surfaces naturelles (sols nus, surfaces agricoles, forêts) se répartit entre deux valeurs extrêmes calculées sur une surface nue et une forêt de pins. Le diagramme de droite de la figure 1.20 montre une analyse complémentaire en entropie/anisotropie qui révèle une corrélation inverse sur ce type de surfaces. Il apparaît globalement qu'à mesure que la taille des végétaux augmente, le milieu induit davantage de dépolarisation. La répartition du signal rétrodiffusé dans les trois canaux polarimétriques, typique de la rétrodiffusion de volume, a pour effet d'augmenter l'entropie, de diminuer l'anisotropie et de faire tendre l'angle alpha vers 45°. Les mécanismes de rétrodiffusion de surface et de double rebond étant les plus représentés en milieu urbain, la fenêtre utilisée pour

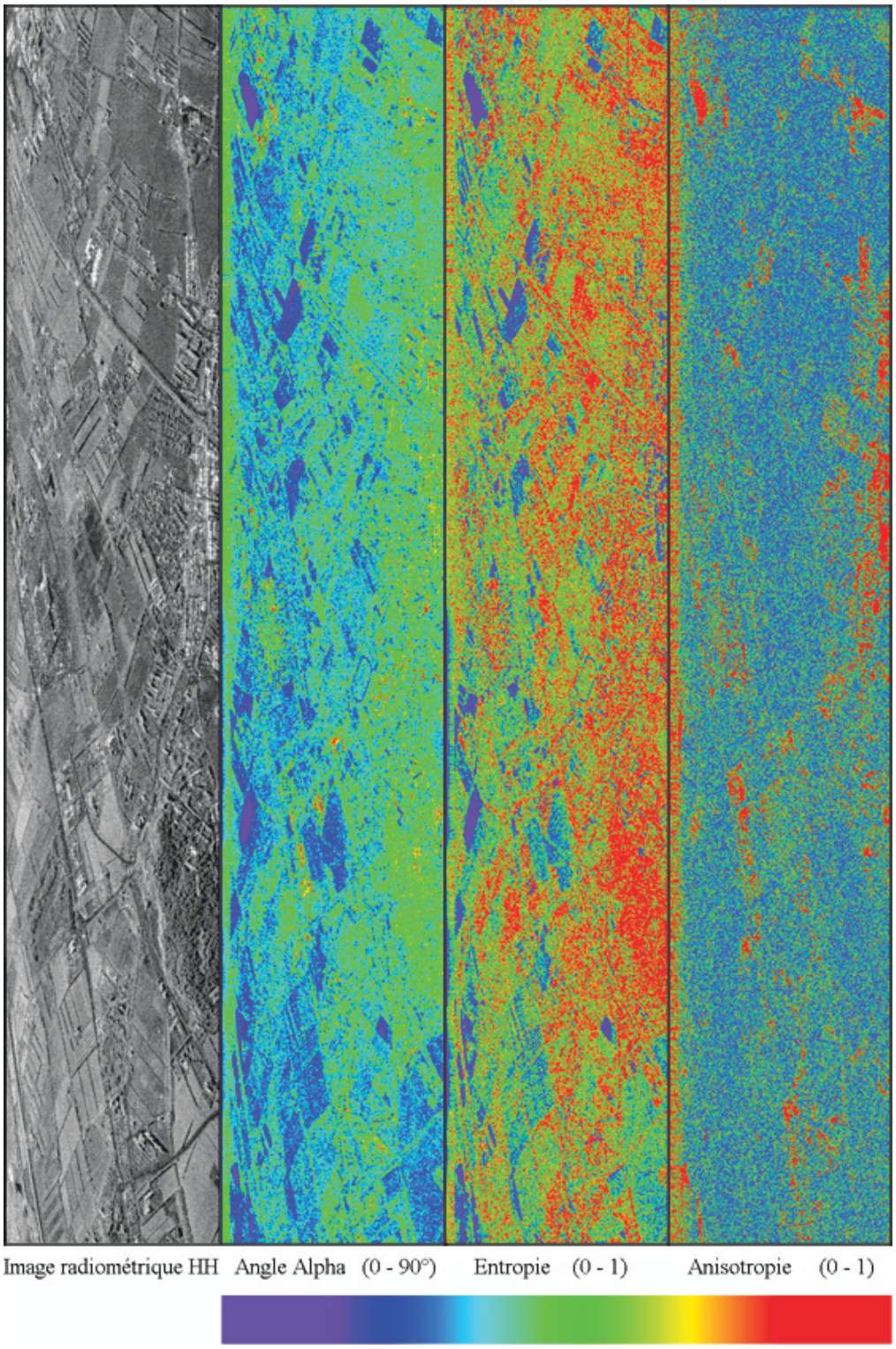

FIG. 1.21 – Image radiométrique du canal HH et cartes d'angle alpha, entropie et anisotropie calculées sur les données RITAS.

calculer la matrice de cohérence induit un moyennage de ces deux contributions prédominantes, ce qui justifie la valeur intermédiaire de l'angle alpha estimé, comparable à celui observé sur la végétation, de même que sa forte variabilité. Les deux premières valeurs propres de la matrice de cohérence qui dépendent de la puissance de ces contributions sont dans ce cas prépondérantes par rapport à la troisième (schéma (c) de la figure 1.10). Il en résulte une entropie légèrement inférieure et une anisotropie supérieure au cas de la rétrodiffusion de volume (schéma (d) de la figure 1.10), c'est pourquoi certains pixels des zones urbaines se trouvent inclus dans la zone d'"entropie moyenne", selon [Lee J.-S. 99]. C'est l'analyse en entropie/anisotropie qui permet donc d'identifier le plus précisément ce type de surfaces et de les dissocier des surfaces naturelles.

La figure 1.21 est une représentation sur l'ensemble des données de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie. Cette figure montre que les propriétés polarimétriques des zones urbaines sont observables sur l'ensemble des données. Les zones urbaines et les bâtiments isolés, qui apparaissent en blanc sur l'image radiométrique, sont caractérisés par un angle alpha de l'ordre de 45° et qui tend vers 90° lorsque la géométrie du milieu induit le mécanisme de double rebond (couleur rouge sur la carte de l'angle alpha). L'entropie apparaît très variable sur ce type de surfaces et décroît à l'emplacement des bâtiments (couleur bleue sur la carte d'entropie). Comme il vient d'être évoqué dans l'analyse précédente, l'anisotropie présente également des valeurs extrêmes sur les zones urbaines et les bâtiments isolés permettant de les localiser précisément (couleur rouge sur la carte d'anisotropie).

1.7.2.2 Étude de la phase interférométrique

La relation 1.42, développée par [Seymour 94] et présentée dans la section 1.3 permet de calculer la précision associée à l'estimation de la phase interférométrique. Une limite inférieure de cette précision peut être déterminée en considérant la décorrélation du signal interférométrique uniquement due aux fluctuations de la phase interférométrique (relation 1.28) et à l'estimation de la cohérence interférométrique (relation 1.41) sur une fenêtre de taille N [Garestier 05c]. Cette précision va être quantifiée en fonction de la taille de la fenêtre à partir de simulations numériques de la cohérence interférométrique.

Pour ce faire, un interférogramme est simulé pour plusieurs écart-types de la phase interférométrique. L'hypothèse que les deux signaux s_1 et s_2, reçus par les deux antennes interférométriques sont unitaires est faite pour plus de simplicité : $|s_1| = |s_2| = 1$. L'expression de l'interférogramme complexe formé est alors :

$$x_k = s_1 {s_2}^* = e^{j\varphi_k} \tag{1.116}$$

La phase interférométrique étant gaussienne, un grand nombre de vecteurs x_k est donc généré avec une phase φ_k distribuée selon une loi normale avec un écart-type donné $\sqrt{<{\varphi_k}^2>}$. Cette loi normale est supposée centrée sans perte de généralité ($<\varphi_k>= 0$). La cohérence interférométrique est équivalente à l'expression suivante :

$$\gamma_{s_1 s_2} =< e^{j\varphi_k} > \tag{1.117}$$

Supposant M ensembles de N vecteurs complexes unitaires $\{z_{m,n}\}_{m=1,M,n=1,N} = e^{j\varphi_{mn}}$, la cohérence interférométrique estimée sur la fenêtre M constituée de N looks indépendants s'exprime ainsi :

$$\{\gamma_m\}_{m=1,M} = \left\{ < e^{j\varphi_{mn}} >_{n=1,N} \right\}_{m=1,M} = \left\{ |\gamma_m| e^{j\phi_m} \right\}_{m=1,M} \tag{1.118}$$

Afin de mesurer la précision associée à l'estimation de la phase de la cohérence interférométrique sur une fenêtre contenant N looks indépendants, plusieurs interférogrammes sont générés, chacun correspondant à un écart-type de la phase interférométrique φ_k différent. Les valeurs prises par l'écart-type de la distribution gaussienne de la phase interférométrique vont de 0 à l'écart-type d'une distribution uniforme :

$$0 < \sqrt{< \varphi_k{}^2 >} < \frac{\pi}{\sqrt{3}} \tag{1.119}$$

Comme l'indiquent les relations 1.117 et 1.118, la cohérence interférométrique est estimée en effectuant le moyennage de l'interférogramme sur une fenêtre de taille N. L'écart-type de la phase de la cohérence interférométrique calculée sur les M fenêtres est mesuré, de même que sa norme moyenne.

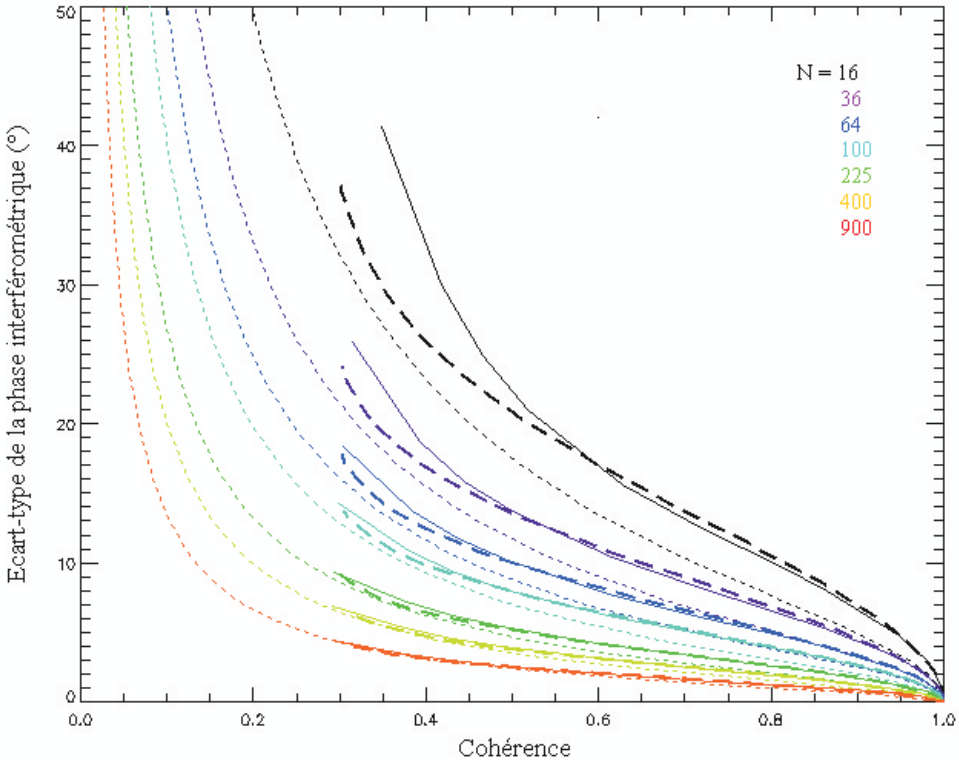

FIG. 1.22 – Écart-type de la phase de la cohérence interférométrique en fonction de la cohérence pour plusieurs tailles de fenêtre, estimé à partir de simulations numériques (traits pleins). Un ajustement valide pour des valeurs de cohérence supérieures à 0.5 est superposé (tirets gras). Les courbes en pointillés sont obtenues à l'aide de la relation 1.42, représentées également sur la figure 1.6

La figure 1.22 représente en traits pleins les valeurs de l'écart-type de la phase de la cohérence interférométrique mesurée à partir des simulations en fonction de la cohérence, pour plusieurs tailles de fenêtre d'estimation. De même que sur la figure 1.6, on observe sur la figure 1.22

que quelle que soit la taille de la fenêtre utilisée, la précision de l'estimation de la phase de la cohérence interférométrique est d'autant meilleure que la cohérence est élevée. Également, plus la taille de la fenêtre augmente et plus la phase de la cohérence interférométrique estimée est précise.

Une relation empirique est directement déduite de ces simulations, symbolisée avec des tirets gras sur la figure 1.22 :

$$\sigma_\phi = \left[\frac{2}{N}\ln\left(\frac{0.72}{|\gamma| - 0.28}\right)\right]^{0.529} \tag{1.120}$$

Les courbes en petits pointillés de la figure 1.22 représentent à titre de comparaison les valeurs de l'écart-type de la phase de la cohérence interférométrique calculée aux bornes de Cramer-Rao (relation 1.42 issue de [Seymour 94]). En comparant les courbes représentant les relations 1.120 et 1.42, on observe que la différence de précision de l'estimation de la phase de la cohérence interférométrique décroît à mesure que la taille de la fenêtre d'estimation N augmente, et devient nulle pour de très grandes fenêtres (N=900 looks indépendants).

La relation 1.120 produit des valeurs plus réalistes que la relation 1.42 lorsque la valeur de la cohérence est seulement dépendante des variations de la phase interférométrique estimée sur une fenêtre de taille N et permet donc de ne pas sous estimer le bruit de phase dans ce cas. Cette relation sera utilisée comme facteur discriminant de la différence de phase interférométrique mesurée entre deux canaux polarimétriques afin de ne pas donner de signification phénoménologique à un simple bruit de phase. Ceci est d'autant plus important dans le contexte des données RITAS que la hauteur d'ambiguïté est très élevée (égale à 250 m en moyenne) et que par conséquent les différences de phase qui vont être utilisées pour l'inversion de l'information PolInSAR sont faibles.

1.7.2.3 Analyse PolInSAR

Comme vient de le montrer l'analyse polarimétrique des données RITAS, les mécanismes élémentaires de rétrodiffusion de surface et de double rebond sont prédominants en milieu urbain. C'est pourquoi les positions verticales de leurs centres de phase respectifs peuvent être utilisées dans le but d'accéder à une information structurale des bâtiments et des structures urbaines [Garestier 05c].

La figure 1.23 représente la cohérence interférométrique γ_w (équation 1.95) calculée pour tous les états de polarisation $\mathbf{w}$ similaires aux deux extrémités de la ligne de base ($\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_2$) dans le plan complexe, sur différents types de surfaces. Chaque couleur est associée à un type de surface et l'ensemble des points qui forment la région de cohérence correspond aux différents états de polarisation. La position angulaire de la cohérence interférométrique correspondant à un état de polarisation donné est reliée à la hauteur du centre de phase polarimétrique. La position radiale indique le degré de cohérence et par conséquent la précision de la phase de la cohérence interférométrique.

La région de cohérence correspondant au blé représentée sur la figure 1.23, qui mesure 40 cm de hauteur, devrait présenter une extension angulaire inférieure à 0.5° en l'absence des 3° correspondant à la précision de la calibration PolInSAR appliquée au système RAMSES [Dubois-Fernandez 05]. Sur la figure 1.23, seules la forêt de pins et les structures urbaines

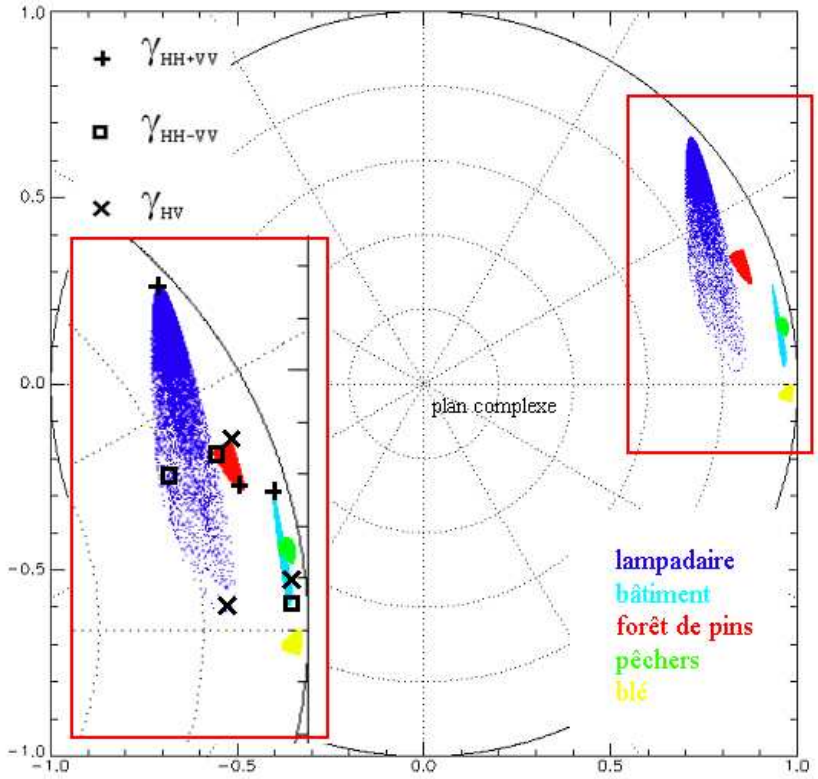

FIG. 1.23 – Représentation de la cohérence interférométrique calculée pour des états de polarisation similaires aux deux extrémités de la ligne de base (baseline co-polar) dans le plan complexe pour plusieurs types de surfaces.

présentent une séparation verticale significative des centres de phase polarimétriques et les plus grandes dispersions verticales sont toujours observées dans le cas des structures urbaines, où l'écart angulaire relatif aux polarisations de la base de Pauli est généralement représentatif de l'écart angulaire maximal de la région de cohérence.

En bande L, [Guillaso 03] a montré que l'estimation de la hauteur des bâtiments avec des données PolInSAR n'est possible qu'en utilisant l'algorithme ESPRIT car la dispersion verticale maximale des centres de phase polarimétriques est inférieure à la taille du bâtiment.
Dans le contexte de cette acquisition en bande X à faible angle d'incidence (égal à 30°), une méthodologie simple est suffisante pour estimer la hauteur des bâtiments : le centre de phase associé au mécanisme de double rebond est généralement localisé au niveau du dièdre formé par l'intersection du mur et du sol , où se produit la focalisation des ondes, alors que la rétrodiffusion de surface est largement prédominante sur le toit, comme l'illustre la figure 1.24. En effet, le sol qui entoure tous les bâtiments étudiés, localisés par des carrés bleus et verts sur la figure 1.17, est une surface lisse goudronnée caractérisée par une faible rétrodiffusion. Dans le cas des habitations domestiques, l'inclinaison du toit est de l'ordre de l'angle d'incidence. Elle provoque une augmentation de l'intensité rétrodiffusée au niveau du toit par rapport au sol dans une même case distance (couleurs bleue et verte de la figure 1.24) lorsque l'orientation du bâtiment tend à être perpendiculaire à l'axe de visée du radar. La rétrodiffusion peut devenir spéculaire lorsque

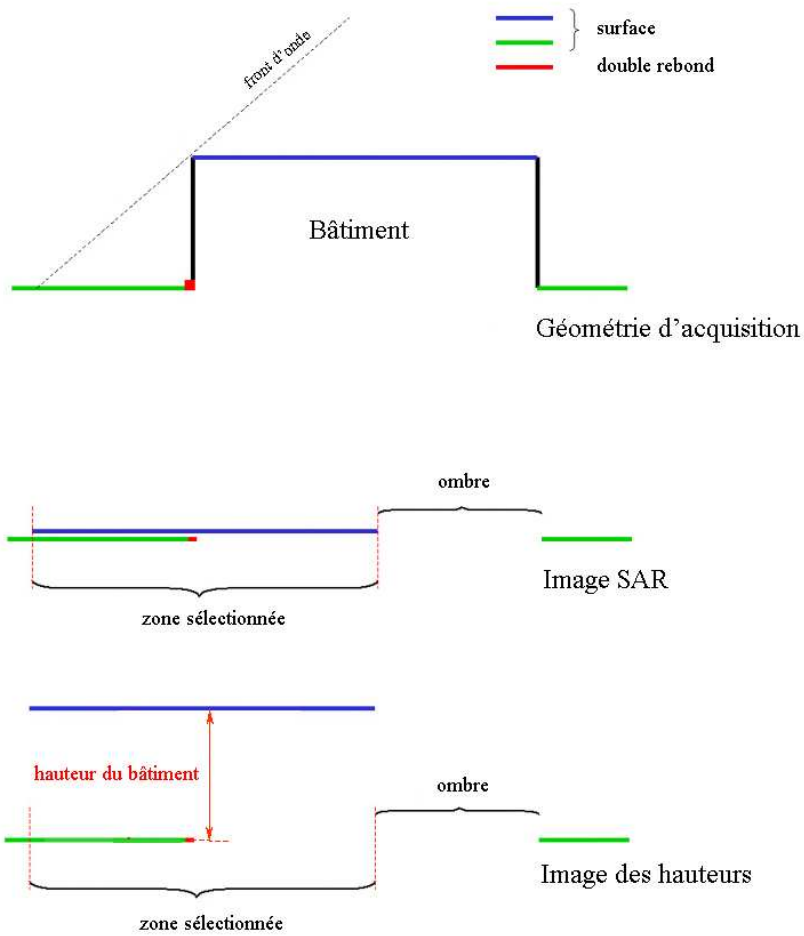

FIG. 1.24 – Localisation des centres de phase correspondant aux mécanismes de rétrodiffusion de surface et de double rebond sur un bâtiment, de leur position dans l'image SAR et de leur hauteur.

la surface du toit est parfaitement normale à la direction de visée du radar.
En ce qui concerne les bâtiments industriels dont le toit est plat, la présence de graviers augmente la rugosité par rapport à celle du sol et ainsi l'énergie rétrodiffusée. Comme le centre de phase associé à la rétrodiffusion de surface est situé très proche du niveau du toit dans ces deux cas, la hauteur h des bâtiments peut être estimée avec la relation suivante, H_a étant la hauteur d'ambiguïté définie par la relation 1.38 :

$$h = \frac{H_a}{2\pi}(\phi_{HH+VV} - \phi_{HH-VV}) \tag{1.121}$$

Neuf bâtiments localisés sur la figure 1.17 ont été mesurés avec un mètre de précision. Le tableau 1.4 montre que cette méthode est très efficace pour 7 bâtiments (inclus dans les zones marquées par des carrés de couleur verte sur la figure 1.17) car l'erreur d'estimation de la hauteur

	Hauteurs (m)	
	Mesure	Estimation
1	9.5	9.0
2	9.6	9.3
3	7.3	6.9
4	7.0	6.5
5	7.0	6.5
6	8.0	7.2
7	3.8	3.4
8	6.0	-1.8
9	6.5	0.1

TAB. 1.4 – Hauteur des bâtiments mesurée et estimée avec la différence de hauteur des centres de phase correspondant aux polarisations HH+VV et HH-VV.

est toujours inférieure à la précision altimétrique (de l'ordre de 2 m). Par contre, la méthode s'avère inefficace pour deux d'entre eux (localisés par la couleur bleue sur la figure 1.17) en raison de la présence de structures génératrices du mécanisme de double rebond sur le toit, dont l'effet est d'élever la position du centre de phase correspondant. Comme l'illustre le cas de ces deux derniers bâtiments, l'accès à l'information de la structure d'une construction urbaine en utilisant toute l'information polarimétrique n'est possible que lorsqu'un centre de phase polarimétrique est exclusivement relié à un élément structural précis. Dans les scènes urbaines plus complexes, des contributions cohérentes d'un même mécanisme de rétrodiffusion peuvent provenir de hauteurs différentes. La hauteur du centre de phase estimée sur une fenêtre contenant ces différentes contributions est alors intermédiaire. L'exemple suivant va montrer que dans ce cas, une analyse spatiale des variations de la hauteur des centres de phase polarimétriques constitue un moyen d'obtenir des informations structurales de l'objet.

Sur la figure 1.23, la région de cohérence du lampadaire présente la plus grande extension angulaire, correspondant à 28 m, alors que le lampadaire ne mesure que 15 m. Celui-ci est situé sur le parking d'un centre commercial où sont présents différents objets (voitures, structures en béton). Le MNE de la figure 1.25 montre que les centres de phases associés aux canaux copolaires HH et VV se trouvent proches du sommet des lampadaires, c'est pourquoi ces derniers apparaissent en violet. Les diagrammes du dessous sont une représentation spatiale du σ_0 normalisé, de la cohérence et de la hauteur des centres de phase polarimétriques de la base de Pauli en fonction de la position en distance. Les flèches pleine et en pointillés indiquent respectivement l'emplacement en distance du sommet et du pied du lampadaire. Comme le montrent les profils de σ_0, le mécanisme de double rebond est localisé au pied du lampadaire et la rétrodiffusion de surface est prédominante en son sommet. Pour chacune de ces contributions, de fortes valeurs de cohérence sont observées, sécurisant ainsi l'estimation de la phase interférométrique. La différence de phase entre les contributions du sommet et du pied, localisées à des cases distance différentes, est égale à la hauteur du lampadaire à 3 m près. Les précisions altimétriques calculées au sommet et au pied du lampadaires avec la relation 1.120 sont du même ordre, respectivement 2,5 m et 1,5 m. Cet exemple montre que la représentation spatiale des centres de phase permet de séparer les rétrodiffuseurs afin d'accéder à une information structurale des objets tout en s'affranchissant des réflexions multiples induites par la complexité du milieu.

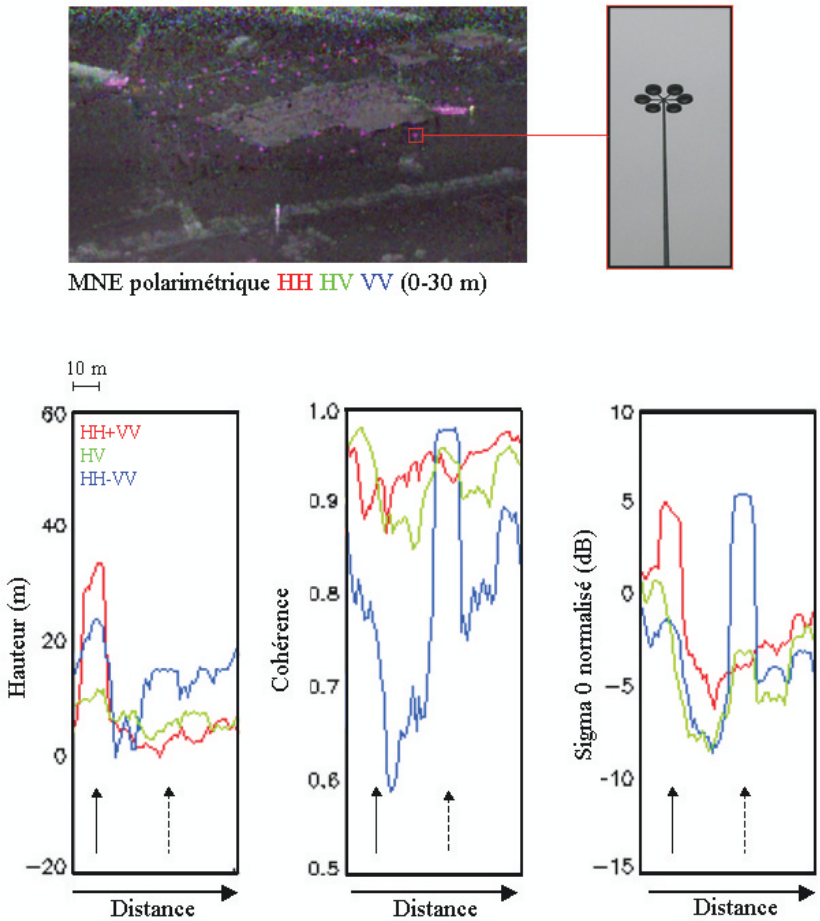

FIG. 1.25 – MNE polarimétrique d'une zone urbaine codé en RVB dans la base lexicographique (rouge : HH, vert : HV et bleu : VV). Profils spatiaux de hauteur, cohérence et σ_0 normalisé correspondant aux polarisations de la base de Pauli codée en RGB (rouge :HH+VV, vert :HV et bleu : HH-VV) effectués en distance sur une zone contenant un lampadaire.

1.7.2.4 Apport de l'analyse temps-fréquence

Nous avons vu dans la partie 1.2.2 que l'angle d'observation θ_{Az} avec lequel la cible est vue durant l'intégration azimutale était relié à une fréquence Doppler f_D qui dépend de la vitesse de rapprochement entre la plate-forme et la cible. Le filtrage du spectre Doppler permet donc de sélectionner les contributions correspondant à un angle d'observation particulier. La bande passante du filtre détermine l'intervalle de variation de l'angle sous lequel la cible est vue, de même que la résolution de l'image filtrée. La résolution et l'intervalle d'angle de visée en azimut sont liés par la relation suivante :

$$\delta_{Az} = \frac{\lambda}{2\,\theta_{Az_{max}}} \tag{1.122}$$

Trois exemples de filtrage du spectre Doppler centrés sur des fréquences différentes sont représentés schématiquement de différentes couleurs sur le diagramme de gauche de la figure 1.26. Le schéma

de droite illustre l'influence du filtrage du spectre sur la valeur de l'angle de visée moyen et son intervalle de variation. Les directions de provenance sélectionnées sont indiquées par des flèches en fonction du filtrage du spectre en azimut et l'exemple d'une fréquence Doppler est représenté en pointillés. L'intervalle de variation de l'angle de visée est constant dans le cas des trois exemples considérés car la bande passante des filtres est fixe. La bande passante conservée est la moitié de la bande passante initiale, l'intervalle de variation de l'angle de visée est alors réduit d'un facteur 2 comparé à celui qui correspond à la pleine résolution (représenté en grisé).

L'apodisation des données acquises par le système RAMSES est rectangulaire, c'est pourquoi aucune déconvolution du spectre fréquentiel n'est nécessaire avant de procéder au filtrage des données avec une fenêtre de Hamming. La décomposition en sous-looks d'un jeu de données polarimétriques a permis de mettre en évidence le comportement non stationnaire de certaines surfaces anisotropes ou artificielles durant l'intégration azimutale [Dubois-Fernandez 92a], [Ferro-famil 03b], [Ferro-famil 05]. Notons que le phénomène de résonance de Bragg induit par les surfaces caractérisées par une périodicité spatiale, qui sont généralement des champs labourés ou des surfaces agricoles recouvertes par peu de végétation, a aussi été clairement observé sur ce jeu de données en bande X acquis avec un angle d'incidence très plongeant.

La décomposition en sous-looks d'un jeu de données PolInSAR permet de sélectionner les contributions par direction de provenance et d'observer les variations de la hauteur des centres de phase. Néanmoins, il est important de s'assurer au préalable qu'une décomposition en sous-looks ne fasse apparaître aucun biais dans l'analyse des données. C'est pourquoi, afin de vérifier qu'aucune erreur n'est introduite dans la mesure des estimateurs polarimétriques et interférométriques

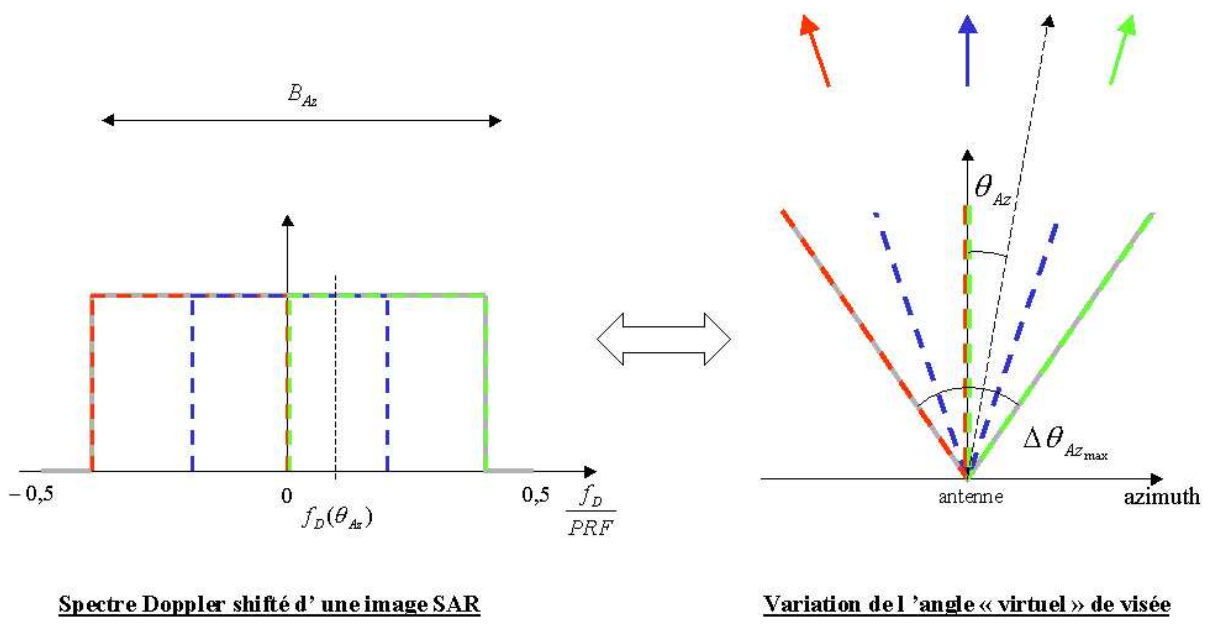

FIG. 1.26 – Représentation schématique de l'effet du filtrage du spectre Doppler de l'image SAR sur la valeur de l'angle virtuel de visée et de son intervalle de variation.

sur les différents sous-looks, la calibration polarimétrique est tout d'abord vérifiée à l'aide de trièdres de calibration. La stabilité de la cohérence et de la phase interférométrique des sous-looks est également contrôlée sur des trièdres et des surfaces nues pour toutes les polarisations.

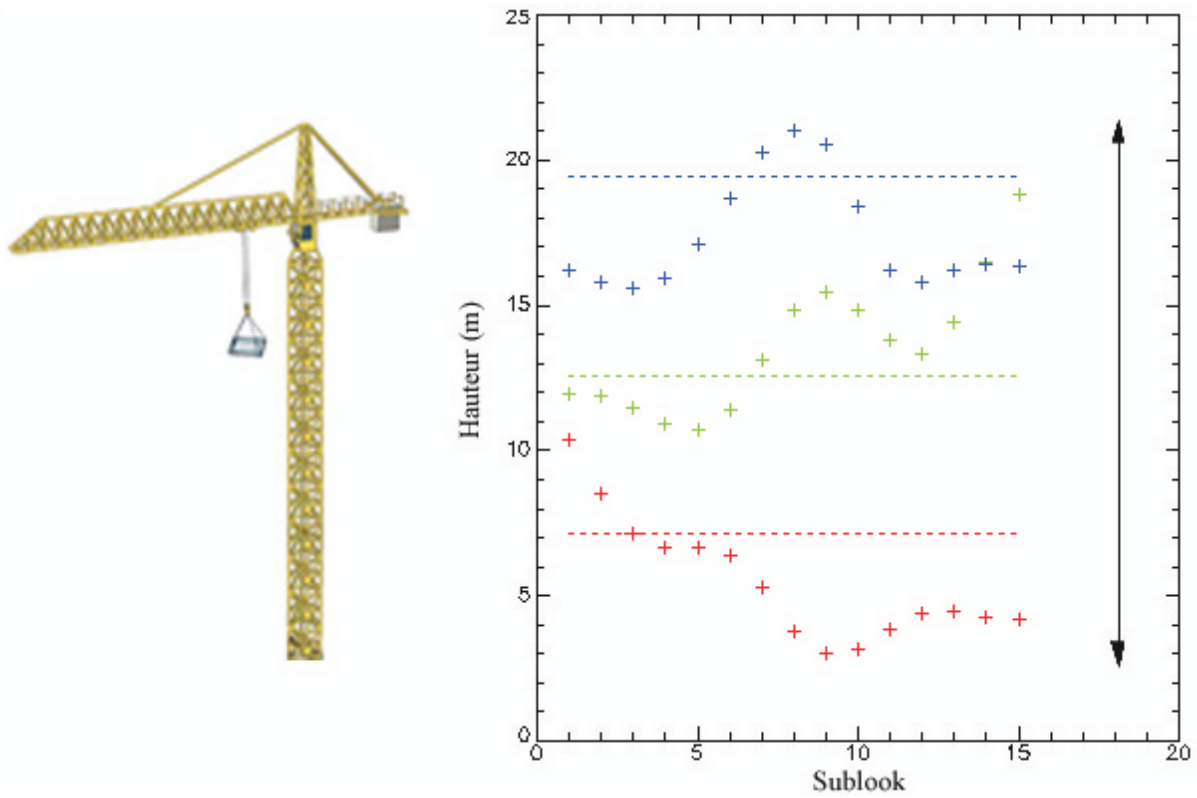

FIG. 1.27 – Hauteurs des centres de phase polarimétriques de la base de Pauli correspondant à différents angles d'observation dans le contexte d'une grue. La couleur rouge correspond à la polarisation HH+VV, le vert à HV, et le bleu à HH-VV.

De manière générale en bande X, l'angle sous lequel la cible est vue durant l'intégration azimutale varie peu. Comme celle-ci est de l'ordre de 1° pour ce jeu de données acquis à haute résolution, les variations de l'information PolInSAR sur les zones urbaines ne sont observables de manière significative que sur les structures complexes, dont la géométrie est fortement variable avec l'angle de visée. L'exemple d'une grue est utilisé pour illustrer les possibilités qu'offre la formation d'interférogrammes à partir de sous-looks. La figure 1.27 représente la hauteur des centres de phase relatifs aux polarisations de la base de Pauli pour 15 sous-looks formés (croix rouges, vertes et bleues : hauteurs des centres de phase des polarisation respectives HH+VV, HV et HH-VV). La bande passante du filtre utilisé est égale au tiers de celle de l'image et la fréquence centrale de ce filtre est décalée régulièrement afin de faire varier continuellement de manière virtuelle l'angle de visée en azimut. La pleine résolution est quant à elle conservée en distance. Les valeurs de hauteur des centres de phase polarimétriques calculées à pleine résolution sont représentées par une ligne en pointillés pour chacune des polarisations de la base de Pauli. On observe que le mécanisme de double rebond provient majoritairement du haut de la grue et que le mécanisme de rétrodiffusion de surface est situé proche du sol. La hauteur de la flèche

de la grue étant mesurée à 20 m, il apparaît qu'à pleine résolution, la différence de hauteur entre les centres de phase associés aux polarisations HH-VV et HH+VV sous-estime la hauteur de la flèche. En revanche, la décomposition en sous-looks permet de faire varier le rapport des contributions provenant de différentes hauteurs. La différence de hauteur maximale des centres de phase du mécanisme de double rebond et du mécanisme de rétrodiffusion de surface, représentée par la double flèche sur la figure 1.27, est égale à la hauteur de la flèche de la grue à 1 m près. L'analyse temps-fréquence de données PolInSAR s'avère efficace pour l'étude des structures urbaines car il est possible de séparer des contributions. Les plus basses fréquences semblent également adaptées à l'analyse des milieux urbains car l'intervalle de variation de l'angle sous lequel la cible est vue est plus grand.

1.8 Conclusion

Ce premier chapitre constitue un rappel des techniques et du formalisme utilisés dans ce travail de thèse et se termine par un exemple d'analyse de données PolInSAR dans le but d'extraire les paramètres physiques du milieu.

L'exemple des zones urbaines a été choisi pour évaluer de manière préliminaire les capacités de la technique PolInSAR car l'extraction de la hauteur des structures est beaucoup plus simple que dans le cas de milieux caractérisés par une géométrie plus complexe, comme la végétation, dont l'étude va être abordée dans le chapitre suivant. Les mécanismes de rétrodiffusion de surface et de double rebond sont globalement prédominants sur les zones urbaines, c'est pourquoi ce type de surfaces possède une signature polarimétrique particulière qui permet de les différencier des surfaces naturelles. La technique PolInSAR s'est révélée très efficace pour estimer la hauteur de la plupart des bâtiments et de certaines structures urbaines avec une précision satisfaisante en utilisant simplement la hauteur des centres de phase associés aux mécanismes de rétrodiffusion de surface et de double rebond, dans le contexte de ce jeu de données acquises en bande X avec un angle d'incidence plongeant.

Lorsque la complexité du milieu augmente, des méthodologies plus élaborées, comme l'analyse spatiale des variations de la hauteur des centres de phase polarimétriques ou la décomposition en sous-looks des images SAR, sont nécessaires pour accéder à une information de la structure des constructions urbaines. Ce type de méthodes permet d'isoler les contributions associées aux principaux éléments structuraux de l'objet étudié et par conséquent d'effectuer une estimation non biaisée de leur hauteur.

Le chapitre suivant traite de l'étude de la végétation à partir de données PolInSAR acquises par le système RAMSES à différentes fréquences. La structure de ce milieu étant plus complexe que celle des zones urbaines, aucun centre de phase polarimétrique ne peut être exclusivement associé à un élément structural de la forêt car un même mécanisme de rétrodiffusion est généré à différentes hauteurs. L'utilisation d'un modèle à la fois réaliste et suffisamment simple est indispensable pour extraire les paramètres physiques de la végétation. De même que dans le cas de cette étude des constructions urbaines, l'analyse temps-fréquence sera utilisée pour séparer verticalement des mécanismes de rétrodiffusion et accroître le potentiel de l'inversion des paramètres physiques de la végétation.

Chapitre 2

Analyse PolInSAR multi-fréquentielle de la végétation

2.1 Introduction

La compréhension des changements climatiques est une problématique située aux frontières de différentes disciplines qui concernent l'ensemble de la communauté scientifique. La modélisation et la prédiction du climat nécessitent la quantification des transferts impliqués dans le cycle du carbone car cet élément est une composante du principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement de la planète, le CO_2. Le réservoir le plus dynamique, et par conséquent le plus difficilement quantifiable, est constitué par l'ensemble des forêts de la surface terrestre. L'équilibre entre l'absorption et la libération de dioxyde de carbone, qui dépend du rapport de la photosynthèse et des différentes formes de respiration (autotrophe et hétérotrophe), est variable avec le stade de maturité et le type de forêt. La biomasse aérienne est représentative de la majeure partie de la quantité de carbone de ce réservoir et peut être reliée à la hauteur de la forêt par une relation allométrique [Le Toan 92], [Mette 03], [Mette 05].

A la différence des structures urbaines, l'estimation de la hauteur d'un milieu possédant une structure complexe comme la forêt nécessite un modèle adapté car, comme des contributions associées à un même mécanisme de rétrodiffusion peuvent provenir de différentes hauteurs, les centres de phase polarimétriques correspondants sont situés à des hauteurs intermédiaires et ne peuvent pas simplement être utilisées pour estimer celle du milieu. L'extraction de paramètres à partir de la modélisation de la forêt par un volume de particules orientées aléatoirement reposant sur une surface de sol (modèle "Random Volume over Ground" [Treuhaft 96], [Treuhaft 00]) a été validée sur différents jeux de données PolInSAR acquis en bande L sur des zones forestières par le système ESAR du DLR (centre spatial allemand) [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 03a].

Ce second chapitre présente une évaluation du potentiel de deux fréquences situées à chaque extrémité du spectre généralement utilisées, la bande X et la bande P, pour l'extraction des paramètres physiques de la végétation dans le but d'estimer la biomasse avec des données PolInSAR. La profondeur de pénétration des ondes radar dans le couvert végétal est proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement émis et l'interaction s'effectue avec les éléments structuraux de la forêt dont la taille est de l'ordre de la longueur l'onde [Curlander 91]. Schématiquement, la rétrodiffusion du signal radar est effectuée de manière prédominante par le feuillage en bande X, les branches en bande L et l'ensemble de la forêt en bande P, chacun de ces éléments structuraux

étant à l'origine du mécanisme de rétrodiffusion de volume. La modélisation de la forêt ainsi que la méthodologie utilisée pour effectuer une extraction de paramètres non biaisée doivent donc prendre en compte ces différents types d'interactions et leur influence sur le signal interférométrique reçu dans les différents canaux polarimétriques à chaque fréquence.

Ce chapitre est décomposé en trois parties où l'analyse de la forêt est abordée séparément à chaque fréquence. La première partie est consacrée à la bande L car c'est la fréquence la plus exploitée en PolInSAR. Les hypothèses du modèle RVoG sont présentées et la procédure d'inversion des paramètres physiques de la forêt est détaillée. Les performances de ce modèle sont ensuite illustrées sur des données simulées en bande L [Williams 99], [Williams 00]. Les deux parties suivantes concernent l'évaluation de fréquences qui ont été moins étudiées jusqu'à présent, la bande X et la bande P, pour l'estimation de la hauteur de la forêt à partir de données PolInSAR acquises par le système RAMSES sur des forêts de pins. La modélisation de la forêt ainsi qu'une méthodologie pour procéder à l'extraction de paramètres basée sur l'optimisation temps-fréquence sont adaptées à chacune de ces deux fréquences.

Chacune de ces trois parties débute par une illustration des caractéristiques de la végétation. Dans les première et troisième parties, la sensibilité de l'information radiométrique et polarimétrique à la biomasse est étudiée de manière préliminaire sur des données acquises en bande L et en bande P par le système RAMSES sur une forêt de pins (forêt de Nezer). De même, dans la seconde partie, la discrimination de la végétation avec des données polarimétriques en bande X et la signature PolInSAR particulière de certaines surfaces agricoles sont présentés dans le but de caractériser les rétrodiffuseurs à cette fréquence.

2.2 Bande L

2.2.1 Présentation des données

2.2.1.1 La forêt de Nezer

La forêt de Nezer est une forêt entretenue située près d'Arcachon en Gironde (latitude : N 44°34'07", longitude : W 01°01'01"), dont le développement est suivi de manière continue par l'INRA. Ce site a été le siège de différentes campagnes dédiées à l'évaluation du potentiel de l'information radiométrique et polarimétrique des images SAR acquises à différentes fréquences pour l'estimation de la biomasse (AirSAR en 1989 et en 1992, et RAMSES en 2001 et en 2004). Cette forêt est constituée de parcelles de pins maritimes de différents âges et repose sur une

Fig. 2.1 – Parcelles de pins de la forêt de Nezer dont les âges sont, de gauche à droite, égaux à 3, 6, 10 et 29 ans.

surface qui ne présente aucune topographie. En guise d'illustration de la diversité des âges des peuplements qui constituent la forêt, les photographies de parcelles correspondant à quatre stades de maturité différents sont juxtaposées sur la figure 2.1. Dans la littérature, différentes relations allométriques sont établies entre plusieurs paramètres structuraux de la forêt et la biomasse aérienne. L'objectif de telles relations est de pouvoir accéder à une estimation fiable et suffisamment précise de la biomasse par la mesure d'un paramètre observable : DBH (diamètre du tronc à 1,3 m du sol), âge, hauteur, densité d'arbres... [Le Toan 92], [Mette 03], [Mette 05], [Porté 02].

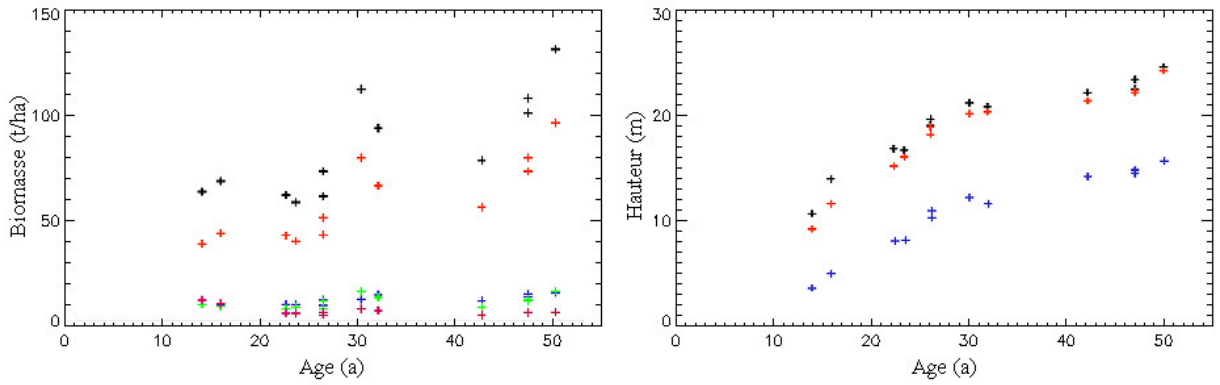

FIG. 2.2 – A gauche : variation de la biomasse aérienne (noir), du bois des troncs (rouge), de l'écorce des troncs (bleu), du bois des branches (vert) et du feuillage (violet) en fonction de l'âge des parcelles de la forêt de Nezer. A droite : variation de la hauteur moyenne (rouge), de la hauteur maximale (noir) et de la hauteur mesurée à la première branche (bleu) en fonction de l'âge des parcelles de la forêt de Nezer. Figures issues de [Guyon 04].

Les caractéristiques structurales des peuplements dépendent essentiellement de leur stade de maturité et évoluent par conséquent avec leur croissance. Elles sont très homogènes au sein d'une même parcelle car tous les pins ont été plantés à la même période. La biomasse aérienne, celle du bois et de l'écorce des troncs, celle du bois des branches et du feuillage ont été mesurées sur différentes parcelles de cette forêt et sont représentées sur la figure 2.2 en fonction de l'âge des parcelles de la forêt de Nezer [Guyon 04].

Comme le paramètre structural qu'il est possible de mesurer avec la technique PolInSAR est la hauteur de la forêt [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 03a], une relation allométrique liant ce paramètre à l'âge des parcelles est nécessaire pour confronter les résultats de l'estimation de la hauteur des parcelles aux mesures de terrain. Une relation spécifique à la forêt de Nezer mettant en correspondance l'âge et la hauteur moyenne des parcelles (en rouge), leur hauteur maximale (en noir) et la hauteur de la première branche (en bleu) est représentée sur la figure 2.2 [Guyon 04].

Deux relations simples, dont les domaines de validité disjoints couvrent l'ensemble de l'intervalle des âges des parcelles, sont obtenues par régression linéaire de ces mesures. La hauteur moyenne $\overline{h}$ (en m) peut être déduite de l'âge a (en années) des parcelles ainsi :

$$\overline{h} = 0.75a \text{ pour } a \leq 25$$

$$\overline{h} \quad = \quad 0.25a + 11.8 \text{ pour } 25 < a \leq 50 \tag{2.1}$$

La biomasse aérienne varie de 0 à 150 t/ha sur l'ensemble des parcelles et présente une corrélation évidente avec l'âge, et par conséquent avec la hauteur des pins par l'intermédiaire de la relation 2.1. Des travaux antérieurs [Mette 03] ont montré que pour une densité de peuplements constante, dans le cas de certaines forêts, la relation entre la hauteur h et la biomasse b était de la forme :

$$b = \alpha \overline{h}^{\beta} \tag{2.2}$$

les constantes α et β dépendant de l'espèce des arbres.

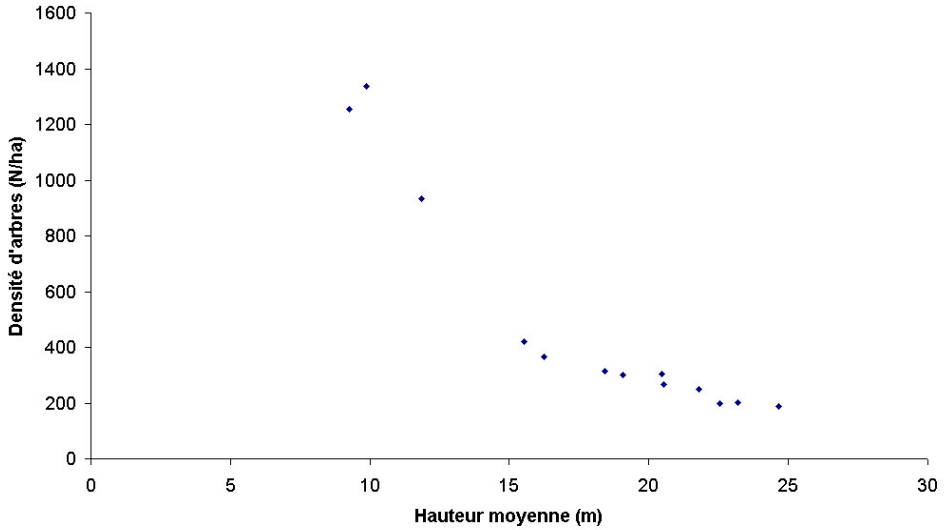

FIG. 2.3 – Densité d'arbres en fonction de la hauteur des parcelles.

Au cours de la croissance des pins, les parcelles de la forêt de Nezer sont régulièrement éclaircies dans le but d'améliorer la production de bois comme le montre la figure 2.3. La diminution de la densité d'arbres à mesure que la hauteur augmente perturbe la fonction puissance qui doit lier la biomasse à la hauteur, puisque le passage de l'âge à la hauteur s'effectue par une relation linéaire (figure 2.2).

2.2.1.2 Sensibilité radiométrique et polarimétrique à la biomasse

Comme l'indique le tableau 2.1, les données en bande L ont été acquises sur la forêt de Nezer en janvier 2004 avec le système RAMSES, durant la campagne "Pyla 2004" organisée par l'ONERA. Leur résolution est de 1,2 m x 1,6 m (projetée) et l'angle d'incidence varie de 38° à 54° sur toute la fauchée.

La figure 2.4 représente une carte de σ_0 polarimétrique normalisé exprimé dans la base lexicographique : la couleur rouge est proportionnelle à la puissance reçue dans le canal HH, le vert au canal HV et le bleu au canal VV. Sur l'ensemble de l'image, les surfaces de sol apparaissent en violet et les parcelles de forêt en vert. Notons qu'une surface de sol se distingue des autres par

FIG. 2.4 – Carte de σ_0 polarimétrique normalisé, associé à la base lexicographique, des données acquises en bande L sur la forêt de Nezer. La passe est effectuée dans la direction Est-Ouest.

Bande	L
Mode	PolInSAR
Hauteur d'ambiguïté	$\simeq$ 20 m (multi-passes)
Angle d'incidence	38° à 54°
Résolution	1,2 m x 1,6 m

TAB. 2.1 – Paramètres système de l'acquisition de données PolInSAR en bande L sur la forêt de Nezer lors de la campagne "Pyla 2004".

FIG. 2.5 – σ_0 (en dB) en fonction de l'âge des parcelles calculé pour les polarisations linéaires HH, HV et VV

une rétrodiffusion prédominante dans le canal HH car elle est creusée de sillons dont la direction est perpendiculaire à la visée du radar, qui sont à l'origine d'une composante de rétrodiffusion spéculaire dans ce canal. La dépendance de la valeur du σ_0 des trois canaux polarimétriques à la biomasse est étudiée sur 120 parcelles de pins ainsi que 9 surfaces nues de manière préliminaire et représentée sur la figure 2.5. Celle-ci montre que l'énergie rétrodiffusée sur l'ensemble des parcelles présente la plus grande dynamique dans le canal HV (de l'ordre de 15 dB). Parmi les canaux co-polaires, c'est dans le canal VV que la plus faible dynamique est observée. Cependant, dans tous les canaux polarimétriques, le σ_0 n'est pas sensible à tout l'intervalle de biomasse car il présente un comportement stationnaire sur les parcelles de biomasse supérieure à 80 t/ha, dont l'âge est supérieur à 20 ans.

Afin de prendre également en compte l'information polarimétrique, la forêt de Nezer a été analysée avec les outils polarimétriques présentés dans la partie 1.4 [Garestier 05b]. La figure 2.6 montre qu'aucun de ces paramètres polarimétriques (l'angle alpha, l'entropie et l'anisotropie) ne présente de variations significatives sur l'ensemble des parcelles et qu'un contraste est visible seulement sur les parcelles de sol et d'arbustes. La valeur moyenne de chaque paramètre sur les parcelles est calculée et représentée en fonction de leur hauteur sur la figure 2.7. L'angle alpha présente la plus rapide saturation, car sa valeur se stabilise aux environs de 50° sur toutes les parcelles supérieures à 4 m. L'entropie et l'anisotropie atteignent une valeur asymptotique sur des parcelles de hauteur supérieure à 6 m. Notons que c'est ce dernier paramètre qui est le plus sensible à la hauteur des pins. Au delà de cette hauteur, l'ensemble des parcelles présente la signature polarimétrique de la rétrodiffusion de volume. Cette analyse polarimétrique préliminaire a montré que la profondeur de pénétration de la bande L est le facteur limitant pour la distinction des parcelles de différentes biomasses. Au regard des cartes d'angle alpha, d'entropie et d'anisotropie, la signature polarimétrique d'une contribution du sol n'est pas observable sur les

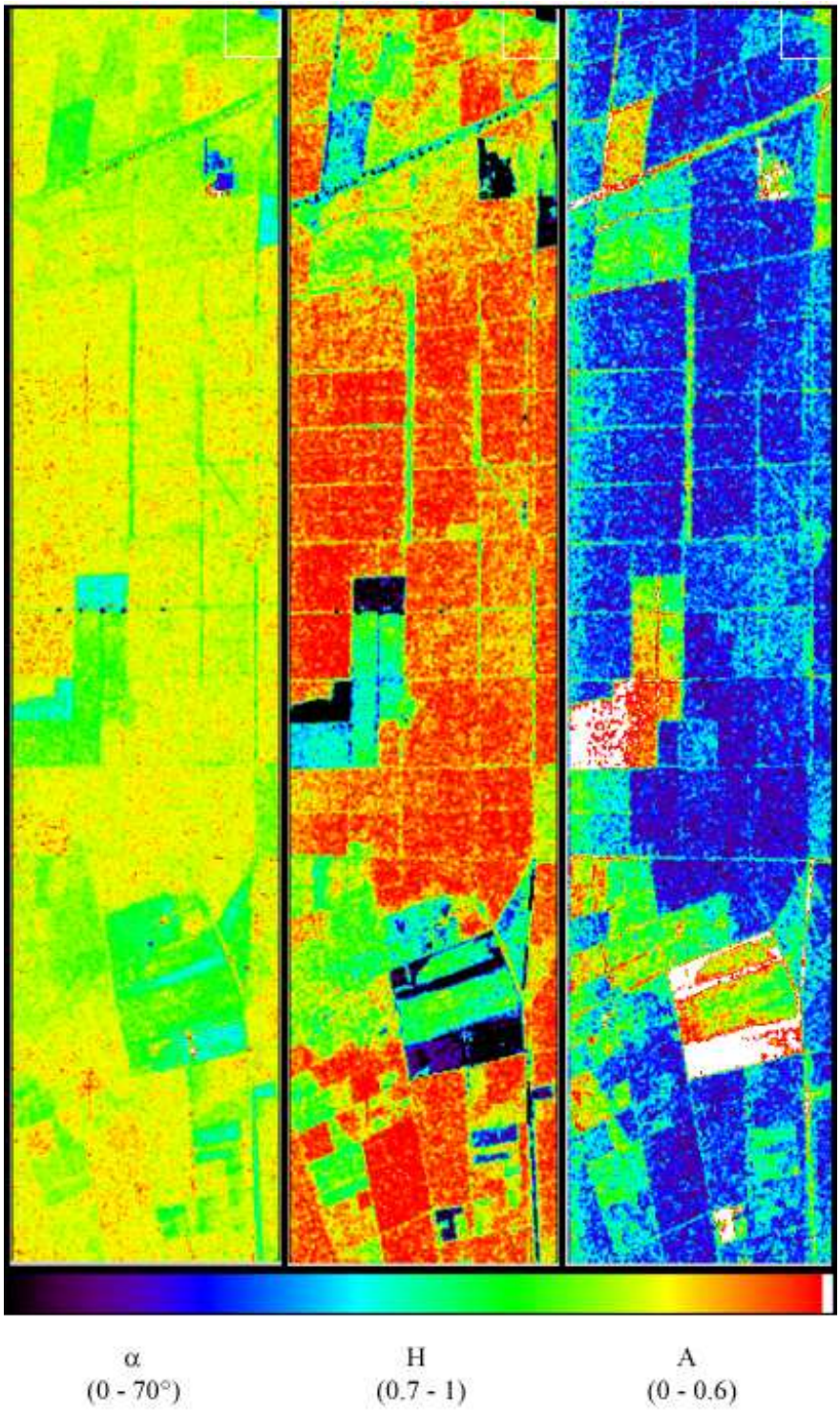

FIG. 2.6 – Représentation spatiale de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie calculés sur une fenêtre 25x25.

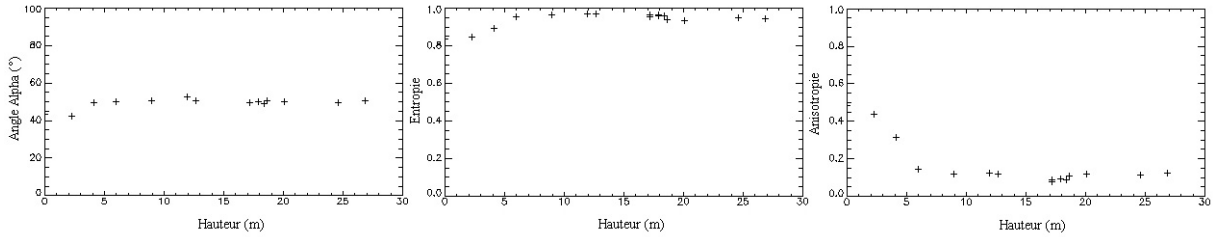

FIG. 2.7 – Moyenne de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie sur toute la parcelle en fonction de la hauteur de celle-ci.

parcelles de plus de 6 m de hauteur, dont la biomasse est supérieure à 50 t/ha.

Il apparaît à l'issue de cette analyse des propriétés radiométriques et polarimétriques de la forêt de Nezer en bande L que ce sont le σ_0 mesuré dans le canal HV et l'anisotropie polarimétrique qui sont les paramètres les plus efficaces pour estimer la biomasse à partir d'un jeu de données polarimétrique lorsque celle-ci est inférieure à 80 t/ha.

2.2.2 Inversion de paramètres à partir de données PolInSAR : le modèle RVoG

2.2.2.1 Description du modèle RVoG

Une procédure d'inversion des paramètres physiques de la forêt à partir de données PolInSAR a été mise au point par [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 03a] en utilisant le modèle RVoG ("Random Volume over Ground") [Treuhaft 96], [Askne 97]. La forêt est assimilée à un volume de diffuseurs orientés aléatoirement, que nous appellerons "canopée" pour plus de simplicité, qui repose sur une surface de sol impénétrable comme le schématise la figure 2.8. Le volume, dont la base coïncide avec le sol, est complètement décrit par deux paramètres : une hauteur h_v et un coefficient d'extinction moyen σ (en dB/m) des ondes dans ce milieu. Par définition, l'extinction des ondes dans un volume de particules orientées aléatoirement est indépendante de la polarisation $\mathbf{w}$. La matrice de cohérence polarimétrique du volume est du type [Treuhaft 00] :

$$[T_v] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{bmatrix} \text{ avec } 0 \leq \epsilon \leq 0,5 \tag{2.3}$$

et celle du sol :

$$[T_g] = \begin{bmatrix} 1 & t_{12} & 0 \\ {t_{12}}^* & t_{22} & 0 \\ 0 & 0 & t_{33} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

L'inversion des paramètres physiques du volume est basée sur la prédiction du comportement de la cohérence interférométrique lorsque le rapport des intensités des contributions de ces deux couches varie. Tout d'abord, l'approximation que l'information polarimétrique ne diffère pas d'une antenne interférométrique à l'autre est faite, ce qui implique que les matrices de cohérences polarimétriques des deux antennes sont égales : $[T_{11}] = [T_{22}]$. L'expression générale

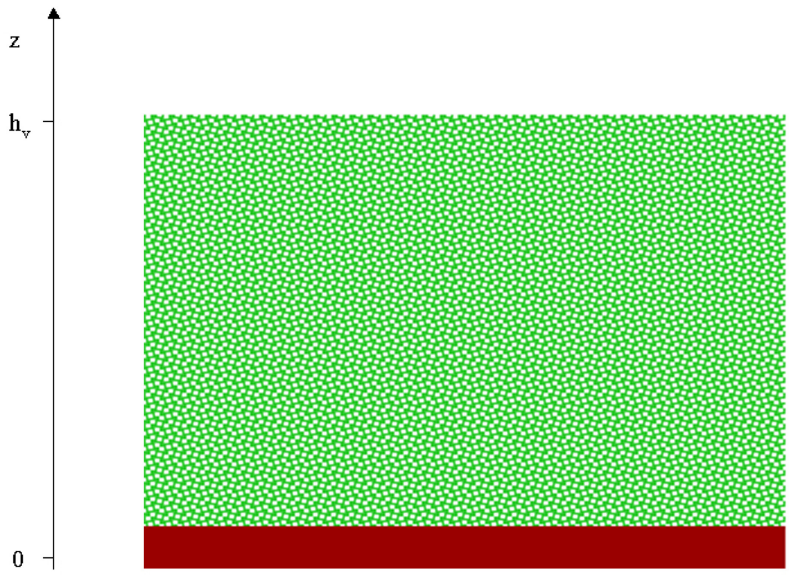

FIG. 2.8 – Volume de particules orientées aléatoirement sur une surface de sol.

de la cohérence interférométrique (relation 1.95), calculée pour des états de polarisation $\mathbf{w}$ similaires aux deux extrémités de la ligne de base, peut alors s'exprimer plus simplement ainsi :

$$\gamma(\mathbf{w}) = \frac{< \mathbf{w}^{\dagger}[\Omega_{12}]\mathbf{w} >}{< \mathbf{w}^{\dagger}[T_{11}]\mathbf{w} >} \tag{2.5}$$

De manière générale, la cohérence interférométrique d'un signal résultant de la sommation cohérente de deux contributions s_A et s_B, reçues par les deux antennes interférométriques r et i, s'écrit :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{< (s_{A_r} + s_{B_r})(s_{A_i} + s_{B_i})^* >}{|s_A|^2 + |s_B|^2} \\ &= \frac{< s_{A_r} {s_{A_i}}^* >< s_{B_r} {s_{B_i}}^* >}{|s_A|^2 + |s_B|^2} \end{aligned} \tag{2.6}$$

sous l'hypothèse que les contributions s_A et s_B ne sont pas corrélées :

$$< s_{A_k} s^*_{B_l} >= 0 \quad \text{avec} \quad k \neq l \tag{2.7}$$

Le rapport des puissances de ces deux contributions est défini comme suit :

$$m = \frac{|s_A|^2}{|s_B|^2} \tag{2.8}$$

La cohérence interférométrique de la somme des deux contributions peut alors s'exprimer en fonction des cohérences interférométriques de ces contributions pures γ_A et γ_B :

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{m\gamma_A + \gamma_B}{1+m} \\ \gamma &= \gamma_B + \frac{m}{1+m}(\gamma_A - \gamma_B) \quad \text{avec} \quad 0 \leq m < +\infty \end{aligned} \tag{2.9}$$

La cohérence interférométrique γ est localisée sur le segment joignant γ_A et γ_B dans le plan complexe, et sa position varie sur ce segment avec la valeur de m.

Dans le cas du modèle RVoG, les deux contributions s_A et s_B considérées sont celles du sol et de la canopée. La cohérence du sol est supposée égale à 1 après conservation de la partie commune du spectre fréquentiel des images interférométriques, quelle que soit la polarisation. Ainsi, la cohérence interférométrique, calculée pour des états de polarisation similaires sur les deux antennes, peut s'écrire en fonction du rapport des puissances de rétrodiffusion du sol et du volume $\mu(\mathbf{w})$, de la cohérence interférométrique de la contribution de la canopée γ_v et de celle de la contribution du sol, qui est égale à $e^{j\phi_0}$, où ϕ_0 est la phase interférométrique du sol [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 03a].

$$\begin{aligned}\gamma(\mathbf{w}) &= \frac{\gamma_v + \mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})} e^{j\phi_0} \\ &= \left[\gamma_v + \frac{\mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})}(1-\gamma_v)\right] e^{j\phi_0} \\ &= \left[\gamma_v + L(\mathbf{w})(1-\gamma_v)\right] e^{j\phi_0} \quad \text{avec} \quad 0 \leq L(\mathbf{w}) < 1 \end{aligned} \tag{2.10}$$

La fonction $L(\mathbf{w})$ étant définie ainsi :

$$L(\mathbf{w}) = \frac{\mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})} \tag{2.11}$$

La quantité d'énergie rétrodiffusée par le sol étant dépendante de la polarisation, le rapport des puissances de rétrodiffusion du sol et du volume μ varie donc également avec la polarisation $\mathbf{w}$. L'expression du rapport $\mu(\mathbf{w})$ prend en compte l'extinction σ des ondes se propageant dans une direction d'incidence θ dans le volume de hauteur h_v :

$$\mu(\mathbf{w}) = \frac{2\sigma}{\cos\theta(e^{\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta}} - 1)} \frac{\mathbf{w}^\dagger[T_g]\mathbf{w}}{\mathbf{w}^\dagger[T_v]\mathbf{w}} \tag{2.12}$$

De nombreux travaux ont porté sur la modélisation de la forêt, la décrivant comme un milieu formé de couches horizontales homogènes [Floury 97], [Castel 00]. L'amélioration de ce types de modèles s'est faite par une description des couches plus détaillées [Martinez 00] et par la prise en compte de diffusions d'ordre supérieur [Picard 04]. Néanmoins, l'extraction de paramètres à partir de données PolInSAR nécessite une modélisation bien plus simple de la forêt, c'est pourquoi nous allons considérer à présent la cohérence interférométrique d'un volume de particules orientées aléatoirement [Askne 97], [Treuhaft 96]. Celui-ci peut être modélisé par différentes couches identiques superposées dont les contributions sont indépendantes et associées à une phase interférométrique qui dépend de leur position verticale. L'atténuation de ces contributions, de la forme $e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}}$, est déterminée par la valeur du coefficient d'extinction moyen σ et augmente avec

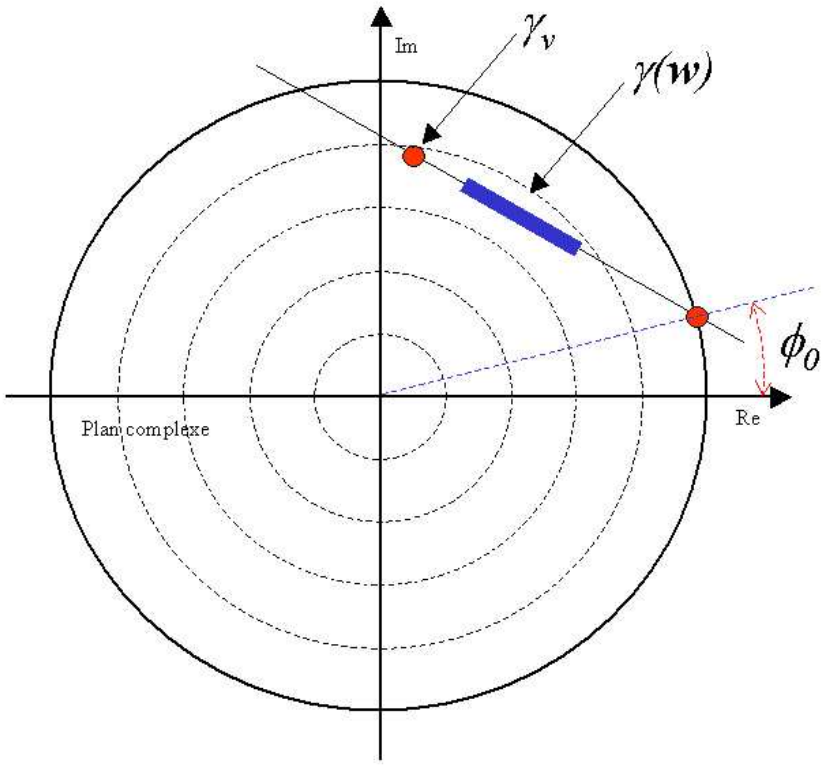

FIG. 2.9 – Représentation schématique des cohérences interférométriques $\gamma(\mathbf{w})$ observables et des cohérences interférométriques "théoriques" de la contribution du volume de particules orientées aléatoirement γ_v et du sol $e^{j\phi_0}$.

la distance que parcours l'onde dans le volume. Le signal rétrodiffusé résulte de la sommation de ces différentes contributions et c'est la diversité des phases interférométriques qui est responsable de la décorrélation de volume. Comme le coefficient d'extinction moyen d'un volume de particules orientées aléatoirement ne varie pas avec la polarisation, la cohérence interférométrique du volume est elle aussi indépendante de la polarisation :

$$\begin{aligned} \gamma_v &= \frac{\mathbf{w}^\dagger \int_0^{h_v} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}} e^{jk_z z}[T_v]dz\mathbf{w}}{\mathbf{w}^\dagger \int_0^{h_v} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}}[T_v]dz\mathbf{w}} \\ &= \frac{\int_0^{h_v} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}} e^{jk_z z}dz}{\int_0^{h_v} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}}dz} \end{aligned} \tag{2.13}$$

Avec le nombre d'onde vertical du système interférométrique :

$$k_z = \frac{4\pi}{\lambda \sin\theta}\delta\theta \tag{2.14}$$

Comme le montre la relation 2.13, la puissance rétrodiffusée par un volume de particules, qui dépend de plusieurs paramètres (polarisation, fréquence, angle d'incidence...), n'intervient pas dans l'expression de la cohérence interférométrique d'un volume de particules orientées

aléatoirement.
La décorrélation de volume croît avec la différence d'angle d'incidence des deux antennes $\delta\theta$, et, pour une configuration interférométrique donnée, elle est proportionnelle à la hauteur du volume h_v. Cette décorrélation est d'autant plus importante que le coefficient d'extinction moyen des ondes dans la canopée σ est faible et donc que profondeur de pénétration des ondes est élevée.

Le schéma de la figure 2.9 représente en bleu la position dans le plan complexe de la cohérence interférométrique $\gamma(\mathbf{w})$ d'un signal composé de deux contributions non nulles du sol et de la canopée, observée lorsque les états de polarisation des antennes maître et esclave varient de concert. Les deux points rouges localisent respectivement les cohérences interférométriques du sol ($\gamma_{sol} = e^{j\phi_0}$) et de la canopée ($\gamma_v$). Comme elles ne dépendent pas de la polarisation, la cohérence interférométrique $\gamma(\mathbf{w})$ est localisée sur le segment de droite qui relie ces deux extrêmes lorsque le rapport des puissances de rétrodiffusion du sol et du volume $\mu(\mathbf{w})$ varie. La figure 2.9 illustre le cas le plus général où les signaux reçus par le système interférométrique sont un mélange des contributions du sol ($\mu(\mathbf{w}) = \infty$) et de la canopée ($\mu(\mathbf{w}) = 0$), qui ne sont donc présentes à l'état pur dans aucun des canaux polarimétriques. La méthode d'inversion de la hauteur de la forêt h_v et de son coefficient d'extinction moyen σ à partir des cohérences interférométriques mesurées dans les différents canaux polarimétriques est décrite dans la partie suivante.

2.2.2.2 La procédure d'inversion

L'extraction de paramètres avec le modèle RVoG s'effectue suivant une procédure qui se décompose en trois étapes :

– **régression linéaire de $\gamma(\mathbf{w})$ dans le plan complexe**

Comme la cohérence interférométrique est supposée se répartir sur une droite d'après les hypothèses du modèle RVoG (relation 2.10), une régression linéaire par moindres carrés des cohérences interférométriques $\gamma(\mathbf{w})$ mesurées dans les différents canaux polarimétriques est tout d'abord effectuée dans le plan complexe.

– **détermination de la phase du sol ϕ_0**

L'énergie rétrodiffusée par les surfaces nues est majoritairement présente dans les canaux copolaires et le canal HV contient essentiellement la contribution de la canopée. La cohérence interférométrique du sol, qui est supposée égale à 1 ($\gamma_{sol} = e^{j\phi_0}$), est alors localisée par l'intersection de la droite de régression et du cercle trigonométrique la plus éloignée de la cohérence interférométrique associée au canal HV dans le plan complexe, car ce canal est caractérisé par le rapport μ le plus faible parmi tous les canaux polarimétriques.

– **estimation de γ_v**

On fait l'hypothèse que la contribution pure de la canopée est mesurée pour au moins un état de polarisation. La cohérence interférométrique supposée être celle de la canopée $\hat{\gamma}_v$ sera alors logiquement celle dont le centre de phase sera le plus élevé par rapport au niveau du sol, et qui satisfera donc la condition : $\max({}_Arg(\gamma(\mathbf{w})) - \phi_0)$. De la valeur complexe de γ_v peuvent être déduits conjointement la hauteur h_v et le coefficient d'extinction moyen σ des ondes dans la canopée par la relation 2.13.

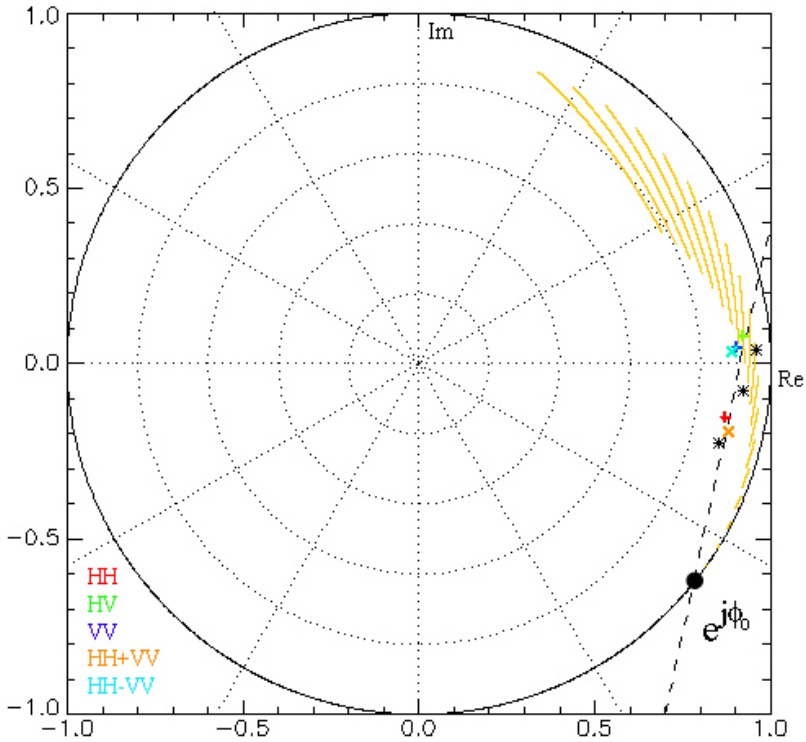

FIG. 2.10 – Illustration de la procédure d'inversion avec le modèle RVoG sur des données simulées d'une forêt de pins (fournies par Mark Williams du DSTL, Malvern, GB). Les cohérences interférométriques correspondant aux bases de Pauli et lexicographique sont représentées en couleur et les cohérences optimales en noir. γ_v est calculé pour des hauteurs allant de 0 à 20 m et un coefficient d'extinction moyen variant de 0,3 à 0,8 dB/m (représenté en jaune).

La figure 2.10 est une illustration de la procédure d'inversion sur des données simulées d'une forêt de pins de 10 m de hauteur en bande L (fournies par Mark Williams de DSTL, Malvern, GB) [Williams 99], [Williams 00]. La résolution projetée est égale à 0,69 m en azimut et à 1,38 m en distance. L'acquisition est simulée dans des conditions similaires à celles du système ESAR appartenant au centre spatial allemand (DLR), c'est-à-dire avec un angle d'incidence de 45° par une plate-forme située à 3 km d'altitude et avec une ligne de base de 10 m. Le sol est assimilé à une surface de Bragg et concernant la canopée, plusieurs interactions entre les rétrodiffuseurs (tronc-sol et sol-canopée) ont été prises en compte.

En pratique, pour des raisons de temps de calcul, l'inversion est effectuée à partir des cohérences interférométriques de la base de Pauli et de la base lexicographique seulement. Afin d'améliorer la qualité de la régression linéaire, [Papathanassiou 03a] préconise l'utilisation supplémentaire des cohérences optimales (relation 1.101) représentées avec des étoiles noires dans la figure 2.10. Ensuite, sur chaque zone associée à un nombre d'onde vertical k_z local, la cohérence interférométrique d'un volume aléatoire γ_v est calculée pour un large intervalle de hauteurs et de coefficients d'extinction moyens. Le critère de sélection du γ_v généré de manière discrète, qui va permettre d'estimer le couple de hauteur h_v et de coefficient d'extinction moyen

σ, est la distance minimale dans le plan complexe qui la sépare de la cohérence interférométrique mesurée $\gamma(\mathbf{w})$ la plus éloignée de celle du sol $e^{j\phi_0}$.
Sur la figure 2.10, la cohérence interférométrique d'un volume aléatoire γ_v, représentée en jaune, est calculée pour plusieurs hauteurs h_v, allant de 0 à 20 m, et pour un intervalle de coefficients d'extinction moyens compris entre 0,3 et 0,8 dB/m. Chaque segment est associé à une valeur de hauteur et à toutes les valeurs de coefficient d'extinction moyen (plus le coefficient d'extinction moyen augmente, plus la cohérence interférométrique du volume γ_v se rapproche du cercle trigonométrique). Dans ce cas précis, l'extraction de paramètres est donc effectuée à partir de la valeur du γ_v le plus proche de la cohérence interférométrique du canal HV que l'on suppose être celle du volume ($\hat{\gamma}_v = \gamma_{HV}$). Notons cependant que le danger de cette méthode numérique est de fournir des résultats même si la cohérence interférométrique mesurée $\hat{\gamma}_v$ se trouve disjointe de l'ensemble des valeurs de la cohérence théorique d'un volume de particules orientées aléatoirement $\gamma_v(h_v, \sigma)$ dans le plan complexe (en jaune sur la figure 2.10), signifiant qu'il n'existe pas de solution mathématique et donc que l'hypothèse de la décorrélation de volume n'est pas suffisante pour expliquer la valeur de la cohérence interférométrique supposée être celle de la contribution de la canopée. La validité de cette inversion doit par conséquent être vérifiée sur chaque fenêtre utilisée pour l'estimation de la cohérence interférométrique des différents canaux polarimétriques.

Nous avons vu avec la relation 2.14 que la sensibilité d'un système interférométrique à la décorrélation de volume était liée à son nombre d'onde vertical k_z, c'est-à-dire à l'écart entre les angles de visée des deux antennes interférométriques. Pour une configuration interférométrique donnée, il apparaît clairement sur la figure 2.10 que la décorrélation de volume et la hauteur du centre de phase de la canopée varient très peu en fonction du coefficient d'extinction moyen pour les faibles hauteurs, et deviennent d'autant plus sensibles à la valeur de ce paramètre que la hauteur de la canopée augmente. La valeur de la cohérence interférométrique du volume est également peu sensible au coefficient d'extinction moyen lorsque celui-ci est élevé, quelle que soit la hauteur du volume. La mesure de ce paramètre apparaît donc peu robuste et ne peut par conséquent pas être utilisé pour l'estimation de la biomasse.

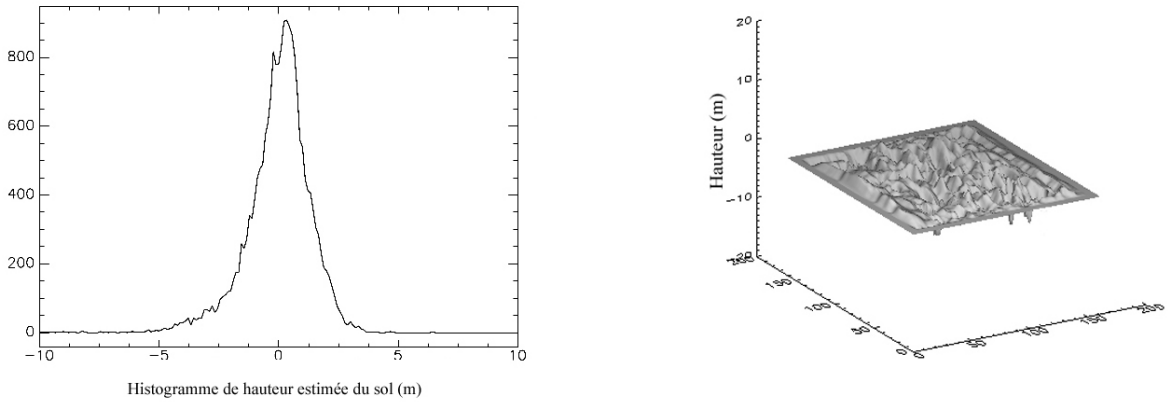

FIG. 2.11 – Estimation du niveau du sol sur les données simulées en bande L.

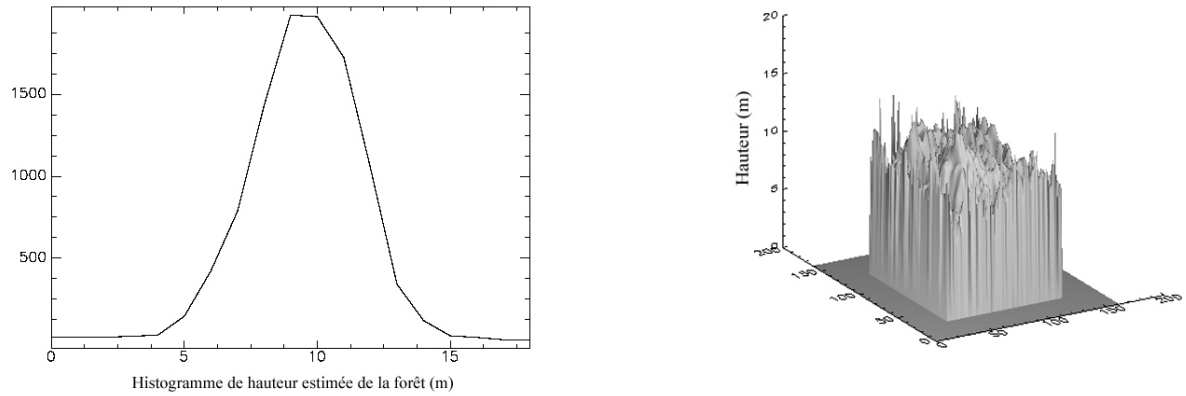

FIG. 2.12 – Estimation de la hauteur de la forêt h_v sur les données simulées en bande L.

Les figures 2.11 et 2.12 présentent les résultats de l'inversion des paramètres physiques de la forêt avec le modèle RVoG. La hauteur du sol, qui est supposé plat, est estimée sur l'ensemble des données avec un écart-type de 1,6 m. La précision de l'inversion de la hauteur de la forêt est quand à elle de 2,5 m. L'inversion avec le modèle RVoG suppose que les différents facteurs

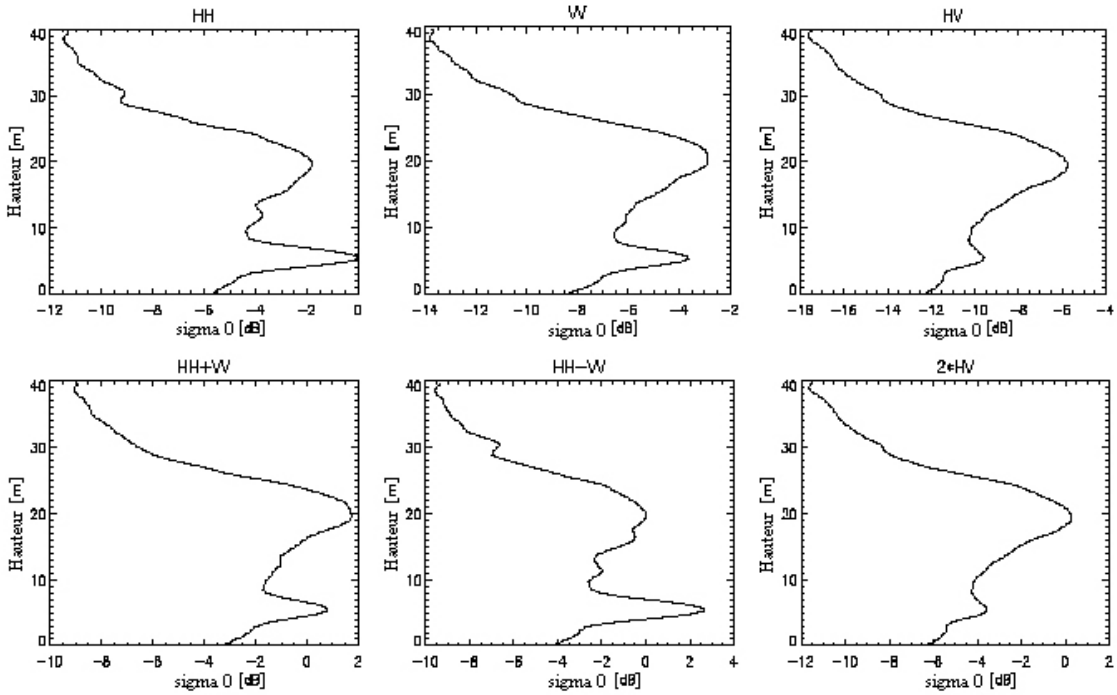

FIG. 2.13 – Profils verticaux de puissance rétrodiffusée dans une forêt de sapins (15 - 20 m de hauteur) obtenus par tomographie polarimétrique [Reigber 00] sur des données multi ligne de base en bande L correspondant aux canaux polarimétriques de la base de Pauli et de la base lexicographique (figure issue de [Reigber 01]).

de décorrélation cités dans la partie 1.3 sont négligeables. En effet, même si la décorrélation géométrique est annulée par le filtrage en distance de la partie commune des spectres d'une paire d'images interférométriques, l'effet du SNR et de la décorrélation temporelle sur la qualité de l'inversion ne sont ici absolument pas pris en compte.

La validité des hypothèses d'un volume de particules orientées aléatoirement a été vérifiée en bande L à l'aide de profils verticaux de puissance rétrodiffusée obtenus par tomographie polarimétrique [Reigber 01], [Reigber 00], représentés sur la figure 2.13, où la surface de sol est identifiée par une forte rétrodiffusion dans tous les canaux polarimétriques sauf dans celui qui correspond à la polarisation croisée. Les profils correspondant aux différentes polarisations possèdent en revanche la même allure au niveau de la canopée, ce qui constitue la signature d'un volume de particules orientées aléatoirement.

L'inversion des paramètres physiques de la végétation avec le modèle RVoG a été testée avec succès sur différents jeux de données PolInSAR acquis à cette fréquence par le système radar ESAR sur différentes forêts. Comme la hauteur des arbres est liée à la biomasse par des relations allométriques, le modèle RVoG, qui représente un bon compromis entre la complexité de la réalité et les besoins de la modélisation, s'avère prometteur pour l'estimation de la biomasse. Nous allons voire à présent comment adapter ce types de procédures à haute, puis à basse fréquences.

2.3 Bande X

2.3.1 Les surfaces agricoles

La caractérisation des surfaces agricoles à l'aide de techniques spatiales présente un intérêt majeur pour la gestion des ressources alimentaires dans le monde. Le potentiel de l'imagerie radar est lié avant tout à la fréquence du rayonnement émis dont dépend la profondeur de pénétration des ondes dans le couvert végétal. Mais quelle que soit la fréquence, la végétation agricole est bien moins haute que les forêts et une plus forte contribution du sol est présente dans le signal rétrodiffusé. C'est pourquoi les fréquences élevées, comme la bande X, apparaissent particulièrement adaptées aux thématiques agricoles car la faible pénétration des ondes assure une réponse suffisante du couvert végétal pour permettre de caractériser ce type de végétation, et car la longueur d'onde est de l'ordre de la taille des éléments diffusants.

2.3.1.1 Discrimination polarimétrique de la végétation

Il a été observé dans la partie 1.7 que les zones urbaines possédaient une signature polarimétrique particulière et qu'une analyse en angle alpha/entropie/anisotropie permettait de les différencier des surfaces naturelles.
La figure 2.14 représente l'analyse en entropie/alpha de différentes surfaces naturelles et urbaine. En ne considérant ici que les surfaces naturelles, quatre catégories peuvent être distinguées avec la confrontation de ces deux paramètres. Les valeurs les plus faibles sont attribuées aux surfaces nues et les plus fortes, témoignant d'une rétrodiffusion de volume, correspondent à une forêt de pins. Entre ces deux extrêmes, la figure 2.14 révèle différentes valeurs d'angle alpha et d'entropie entre, d'un côté, les vergers et les vignes, et de l'autre, les cultures maraîchères et le blé, ces deux derniers types de surfaces agricoles étant le siège d'une rétrodiffusion plus diffuse. Les surfaces sélectionnées pour illustrer ces différentes signatures polarimétriques sont représentatives des catégories de surfaces agricoles auxquelles elles appartiennent. Les mesures

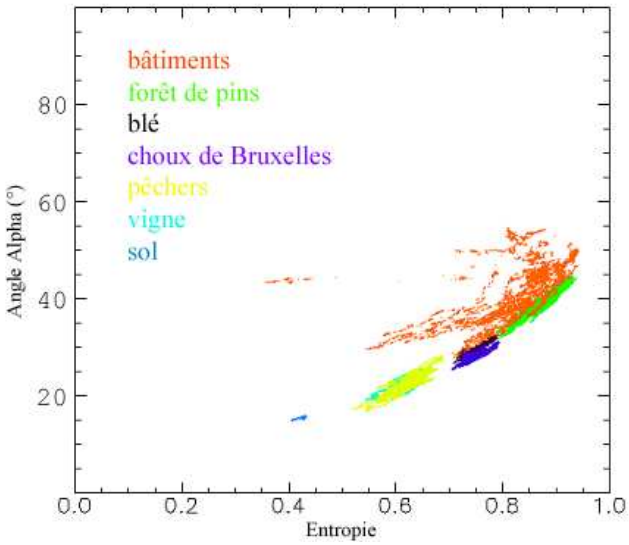

FIG. 2.14 – Analyse en entropie/alpha de différents types de surfaces naturelles et d'une zone urbaine sur les données RITAS.

au sol révèlent qu'à la période où les données RITAS ont été acquises, en mars 2002, la hauteur du blé avait déjà atteint 40 cm et que des feuilles de petite taille commençaient seulement à faire leur apparition sur les arbres, expliquant un comportement polarimétrique plus déterministe, lié à une composante de rétrodiffusion de volume plus faible. Une étude polarimétrique des vergers de l'INRA [Baghdadi 04], menée sur le même jeu de données, conduit à des conclusions similaires sur le potentiel de la bande X pour la distinction des différents types de végétation. Comme l'illustrent d'autres travaux effectués à cette fréquence [Mougin 93], la bande X interagit essentiellement avec les objets dont la dimension est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde (λ=3 cm), rendant ainsi les propriétés polarimétriques du signal reçu dépendantes de la densité du feuillage. La polarimétrie en bande X semble alors constituer un outil prometteur pour le suivi et la caractérisation des changements de stade de maturité des cultures agricoles.

2.3.1.2 Signature PolInSAR du blé

La technique PolInSAR s'est avérée très efficace pour l'extraction des paramètres physiques de la forêt en bande L en supposant une propagation isotrope des ondes radar dans le couvert végétal (modèle RVoG [Papathanassiou 01], [Papathanassiou 03a]). Des mesures effectuées à la même fréquence par le même système (ESAR) ont montré que la structure verticale de certains types de végétation agricole, tels que le blé et le maïs, était responsable d'une organisation verticale des centres de phase associés aux différentes polarisations [Hajnsek 04a], [Hajnsek 04b]. Ce type de végétation présente les propriétés d'un volume de particules orientées verticalement [Treuhaft 99], représenté schématiquement sur la figure 2.15, qui se traduisent par une atténuation des ondes dans le couvert végétal fonction de la polarisation. La cohérence interférométrique associée au volume diffère donc d'une polarisation à l'autre :

$$\gamma_v(\mathbf{w}) = \frac{2\sigma(\mathbf{w})}{\cos\theta(e^{\frac{2\sigma(\mathbf{w})h_v}{cos\theta}} - 1)} \int_0^{h_v} e^{jk_z z} e^{\frac{2\sigma(\mathbf{w})z}{\cos\theta}} dz \tag{2.15}$$

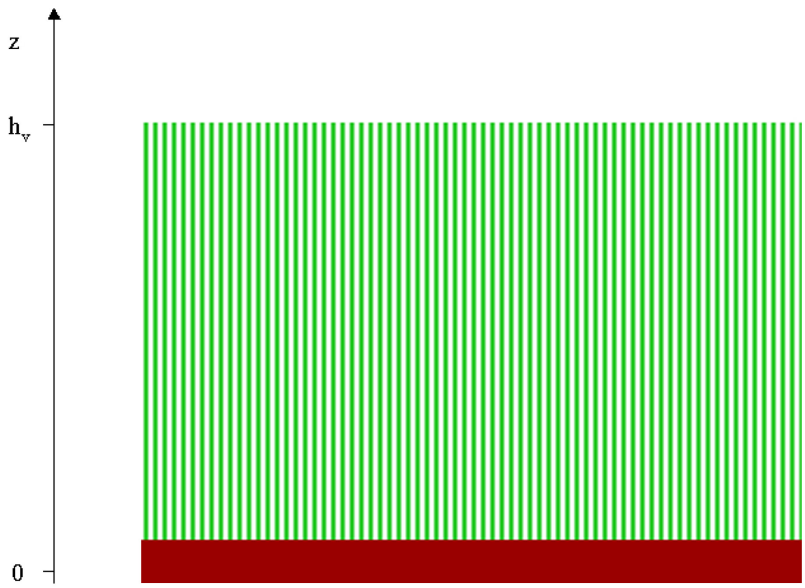

FIG. 2.15 – Représentation schématique d'un volume de particules verticalement orientées reposant sur une surface de sol impénétrable.

Comme la structure des végétaux est globalement verticale, on peut supposer que les polarisations optimales, c'est-à-dire les polarisations pour lesquelles le coefficient d'extinction moyen σ prend des valeurs extrêmes [Treuhaft 99], sont définies par les axes principaux de la base orthonormale $\{H, V\}$, telles que :

$$\sigma_{VV} \geq \sigma_{HV} \geq \sigma_{HH} \quad \text{et} \quad \sigma_{HV} = \frac{\sigma_{HH} + \sigma_{VV}}{2} \tag{2.16}$$

Comme il est expliqué dans la partie 2.2.2.1, une importante extinction des ondes dans le couvert végétal a pour effet de réduire la décorrélation de volume et d'élever la position du centre de phase. Les cohérences et les phases interférométriques du volume verticalement orienté sont donc classées dans l'ordre suivant pour les états de polarisation linéaires :

$$|\gamma_{v_{VV}}| \geq |\gamma_{v_{HV}}| \geq |\gamma_{v_{HH}}| \quad \text{et} \quad Arg(\gamma_{v_{VV}}) \geq Arg(\gamma_{v_{HV}}) \geq Arg(\gamma_{v_{HH}}) \tag{2.17}$$

Dans le cas d'un volume orienté posé sur une surface plane (modèle OVoG), cette hiérarchie peut être perturbée par l'ajout d'une contribution du sol dépendante de la polarisation $\mathbf{w}$. A la différence de la relation 2.13, la cohérence interférométrique correspondant à une polarisation $\mathbf{w}$ s'exprime en fonction de la cohérence interférométrique du volume associée à cette polarisation $\gamma_v(\mathbf{w})$:

$$\gamma(\mathbf{w}) = \left[\gamma_v(\mathbf{w}) + \frac{\mu(\mathbf{w})}{1 + \mu(\mathbf{w})}(1 - \gamma_v(\mathbf{w}))\right] e^{j\phi_0} \tag{2.18}$$

Ainsi, pour chaque polarisation, la cohérence interférométrique $\gamma(\mathbf{w})$ se situe, dans le plan com-

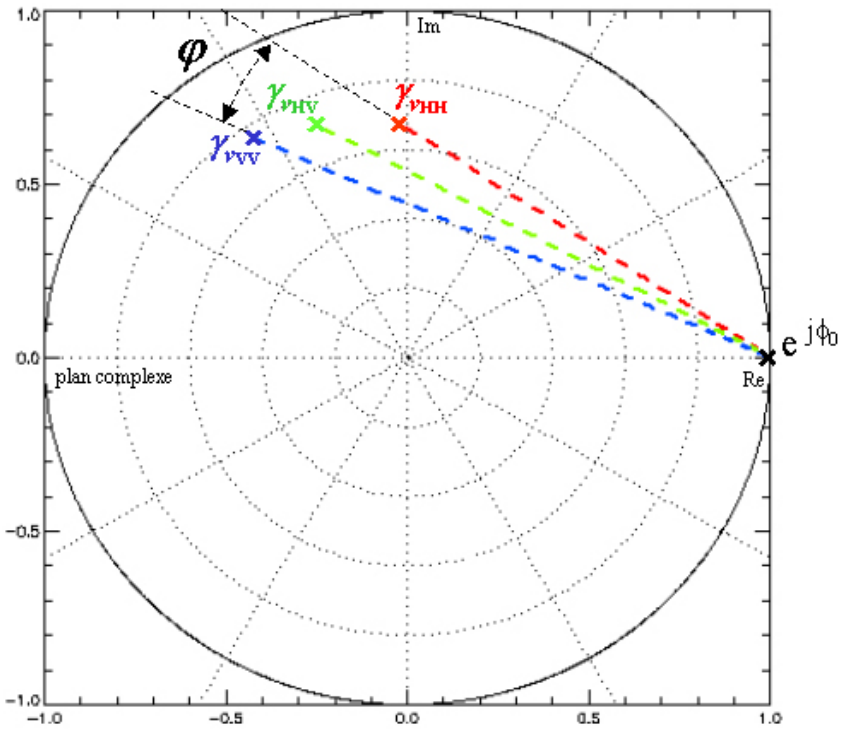

FIG. 2.16 – Positions possibles de la cohérence interférométrique dans le plan complexe correspondant aux trois polarisations de la base lexicographique prédites par le modèle OVoG. Les simulations sont effectuées pour les polarisation HH, HV et VV pour un nombre d'onde vertical k_z=1.5, une hauteur h_v=2 m et des coefficients d'extinction moyens σ_{HH}=0,5 dB/m et σ_{VV}=5 dB/m

plexe, sur la droite qui relie la cohérence du sol à celle du volume $\gamma_v(\mathbf{w})$, comme l'illustre la figure 2.16 dans le cas des trois polarisations de la base lexicographique. La position de $\gamma(\mathbf{w})$ sur la droite dépend du rapport des puissances des contributions du sol et du volume $\mu(\mathbf{w})$, chacun des deux extrêmes étant atteint respectivement pour $\mu(\mathbf{w}) = \infty$ et pour $\mu(\mathbf{w}) = 0$.

L'angle φ représenté sur la figure 2.16 constitue un moyen de mesurer cet effet d'orientation qui dépend du rapport des coefficients d'extinction moyens des polarisations HH et VV (en supposant que $\{H, V\}$ est la base de polarisations optimale [Treuhaft 99]) [Hajnsek 04b], [Hajnsek 05]. La cohérence interférométrique d'un volume de particules dépend du nombre d'onde vertical k_z (relation 2.13), le principal inconvénient de cet estimateur est que son utilisation est limitée à un nombre d'onde vertical constant ou peu variable. En effet, pour des coefficients d'extinction moyens associés aux polarisations HH et VV donnés, la valeur de l'angle φ dépend du nombre d'onde vertical qui n'est pas constant dans une image.

L'analyse des surfaces agricoles en bande L menée dans [Hajnsek 04b] a révélé un effet d'orientation variable suivant les différents types de surfaces. Celui-ci apparaît supérieur dans le cas du maïs par rapport au blé et très faible en revanche pour les pommes de terre. Cette étude a montré que la mesure de l'extinction différentielle constituait un moyen de distinguer ces trois

types de culture.

La bande X étant caractérisée par une plus faible pénétration des ondes dans le couvert végétal que la bande L, il en résulte un rapport $\mu(\mathbf{w})$ également plus faible dans tous les canaux polarimétriques. Les cohérences interférométriques seront donc plus éloignées de celle du sol et fourniront ainsi la possibilité de mesurer un effet d'orientation sur de la végétation basse. Par contre, les données RITAS ne permettent pas une analyse aussi précise des surfaces agricoles que celle qui vient d'être évoquée en raison de la courte ligne de base, qui empêche la distinction verticale de deux centres de phase séparés par moins de 2 m, comme il a été évoqué dans la partie 1.7.1.2. L'observation des cohérences associées à la base lexicographique permet toutefois d'identifier la signature d'un volume orienté sur les champs de blé, de foin en herbe et d'herbe haute, ces derniers étant situés dans des zones pré-industrielles. Notons qu'au début du printemps, ces trois types de végétation agricole possèdent une structure verticale similaire et différente des autres types de cultures.

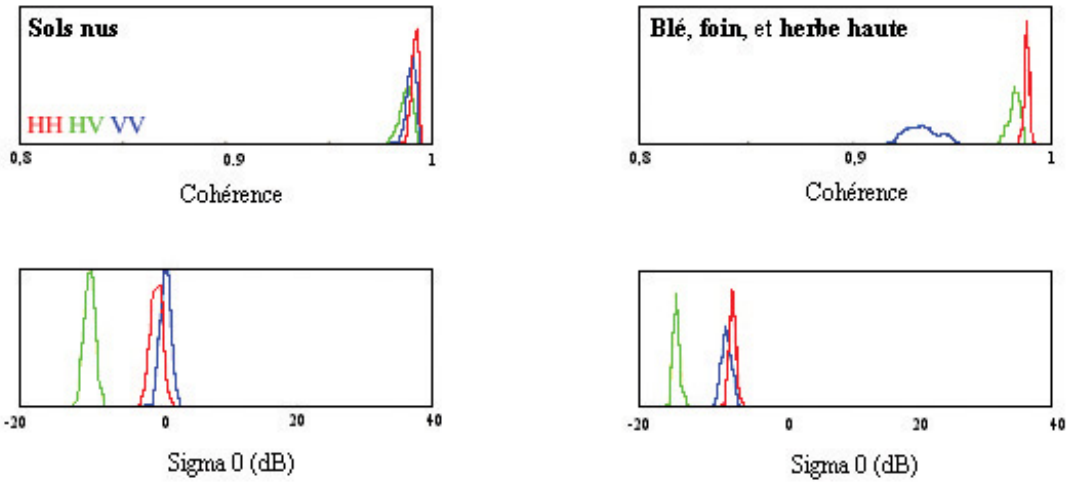

FIG. 2.17 – Représentation de la valeur du σ_0 et de la cohérence interférométrique des canaux polarimétriques associés à la base lexicographique calculés sur une surface nue (à gauche) et de la végétation de type blé (à droite).

La figure 2.17 présente une comparaison des valeurs de σ_0 et de cohérence mesurées dans les trois canaux polarimétriques de la base lexicographique entre des surfaces nues et de la végétation de type "blé". Un coefficient de rétrodiffusion plus important en HH qu'en VV est caractéristique du blé, de même que la perte de cohérence dans le canal VV. Comme il est indiqué dans la partie 1.7.1.2, un bruit est présent dans le canal VV sur toute l'image. Cependant, une analyse plus approfondie a révélé qu'il n'est pas simplement modélisable par un bruit thermique, et donc que la forte perte de cohérence observée dans le canal VV ne peut pas être simplement expliquée par une diminution du σ_0. De plus, comme il a été mis en évidence dans la partie 1.7.1.2, il n'affecte que l'émission dans la polarisation linéaire V, alors qu'une perte de cohérence en HV, même si elle est moindre, est aussi exclusivement observée sur ce type de végétation.

La profondeur de pénétration de la bande X dans les conifères a été mesurée de l'ordre du mètre [Mougin 93]. Les surfaces de végétation de type "blé" sont toutes de hauteurs inférieures à 50 cm et leur cohérence mesurée dans le canal HH est très voisine des valeurs typiques des surfaces nues comme le montre la figure 2.17. Ceci implique qu'une importante contribution du sol est présente dans ce canal polarimétrique. La rétrodiffusion sur les surfaces nues étant habituellement plus forte dans le canal VV, la cohérence de ce canal devrait être supérieure à celle du canal HH dans le cas d'un volume aléatoire posé sur une surface de sol. L'ordre suivant lequel les cohérences mesurées sur les surfaces agricoles sont classées ($|\gamma_{HH}| \geq |\gamma_{HV}| \geq |\gamma_{VV}|$) indique donc la présence d'un volume orienté verticalement reposant sur une surface de sol.

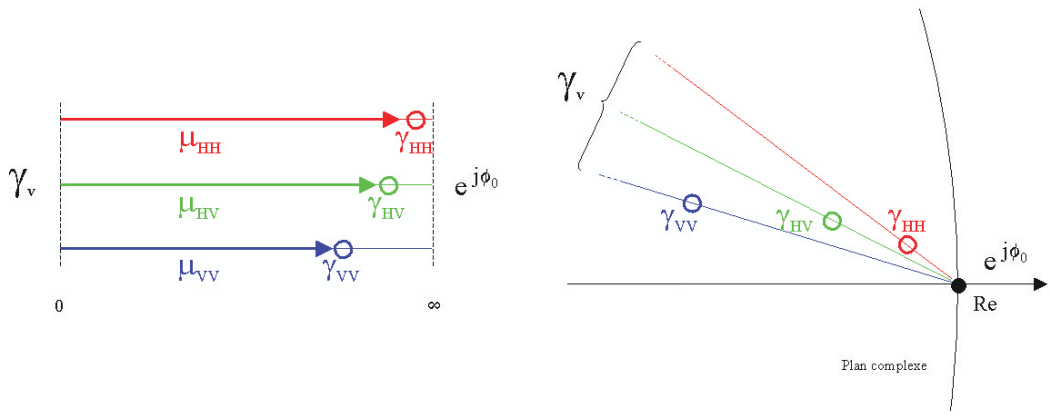

FIG. 2.18 – Représentation des rapports de puissances du sol et du volume et des positions dans le plan complexe des cohérences interférométriques associés aux trois polarisations linéaires, dans l'hypothèse d'un volume de particules orientées verticalement reposant sur une surface de sol (modèle OVoG).

La position de la cohérence interférométrique associée aux polarisations HH, HV et VV a été localisée dans le plan complexe sur la figure 2.16, dans l'hypothèse du volume de particules verticalement orientées posé sur une surface de sol (segments reliant les cohérences interférométriques du sol et du volume correspondant à ces trois polarisations). L'extinction des ondes dans la canopée est maximale pour les polarisations verticales ($|\sigma_{VV}| > |\sigma_{HH}|$), donc une plus forte contribution du volume est présente dans le canal VV que dans le canal HH ($\mu_{VV} < \mu_{HH}$), comme l'illustre la figure 2.18. La cohérence interférométrique du canal HH, située sur le segment de couleur rouge, est par conséquent plus proche de celle du sol ($\gamma_{sol} = e^{j\phi_0}$) que la cohérence interférométrique associée au canal VV positionnée sur le segment bleu. Il apparaît que la cohérence du canal VV est dans ce cas effectivement inférieure à celle du canal HH, contrairement aux prédictions du modèle RVoG. Le même raisonnement permet d'expliquer la valeur intermédiaire de la cohérence du canal HV par le classement des coefficients d'extinction moyens associés aux canaux polarimétriques (relation 2.16).

La sensibilité de la bande X à la structure verticale des surfaces agricoles de type "blé" à ce stade de maturité se traduit tout d'abord par une diminution du σ_0 dans le canal VV. De plus,

cette analyse a montré qu'au regard des cohérences associées aux polarisations linéaires, ce type de végétation possède la signature d'un volume de particules orientées verticalement reposant sur une surface de sol.

2.3.2 Inversion de la hauteur d'une forêt de pins

La forte hauteur d'ambiguïté des données RITAS limite l'utilisation de l'information PolInSAR complète aux structures les plus hautes. La figure 1.23 de la partie 1.7 montre que les régions de cohérence présentant les plus grandes extensions angulaires, et par conséquent la plus grande dispersion verticale des centres de phase polarimétriques, sont celles qui correspondent aux structures urbaines et à une forêt de pins qui va faire l'objet de l'analyse présentée dans cette partie [Garestier 04b], [Garestier 05a]. Dans un premier temps, une méthodologie utilisant les hypothèses du modèle RVoG est adaptée à la bande X et au jeu de données RITAS afin de procéder à l'inversion des paramètres physiques de la forêt et de mesurer leur sensibilité. Dans un second temps, une analyse temps-fréquence est effectuée pour extraire ces paramètres de manière non biaisée et pour augmenter la précision de l'inversion.

2.3.2.1 Méthodologie adaptée

La figure 1.17 indique la présence de deux forêts de pins sur l'ensemble des données, mais seule celle qui repose sur un sol plat et qui ne contient pas de constructions urbaines va être considérée. La partie gauche de la figure 2.19 permet de localiser la forêt étudiée sur les cartes de σ_0 et de MNE polarimétriques déjà présentées dans la figure 1.16. La partie droite contient une photographie IGN datant de 2001, soit un an avant l'acquisition des données RITAS. Le contour rouge délimite la partie de la forêt qui ne présente aucune structure en béton au niveau du sol et donc sur laquelle l'étude va porter. Même si la photographie IGN n'est pas contemporaine de l'acquisition des données, elle permet d'observer une différence de densité d'arbres sur l'ensemble de la forêt. Il s'agit d'une forêt artificielle ne présentant aucun sous-bois (voir photos de la figure 2.20) et dont la hauteur des arbres, qui est homogène, est mesurée en moyenne à 18 ± 1 m.

Comme il a été présenté dans la partie 2.2.2.1, l'inversion des paramètres physiques de la végétation avec le modèle RVoG requiert l'information PolInSAR complète contrairement à l'analyse des structures urbaines, présentée dans la partie 1.7, pour laquelle la hauteur des centres de phase était suffisante. Comme la perte de cohérence observée en VV sur les données RITAS est susceptible d'introduire un biais dans une telle procédure, seuls les canaux correspondant aux deux autres polarisations de la base lexicographique seront utilisés (mode dual-pol).

Les histogrammes des hauteurs des centres de phase relatifs aux polarisations HH et HV, calculées sur la partie de la forêt délimitée en rouge sur la figure 2.19, sont représentés sur la figure 2.21. De même qu'il a été observé en bande L sur la forêt (figure 2.13), le centre de phase de la polarisation HV est le plus élevé car il contient la plus forte contribution de la canopée, celle du sol étant alors plus présente dans le canal HH, dont le centre de phase est plus bas. La figure 2.21 permet de mesurer une distance verticale moyenne de 6 m entre ces deux centres de phase qui témoigne d'une pénétration des ondes associées à la polarisation HH dans la forêt. Cette séparation représente un tiers de la hauteur totale de la forêt, ce qui montre que les mécanismes de rétrodiffusion associés à ces deux polarisations sont très différents. La variabilité de la hauteur des centres de phase sur l'ensemble de la forêt est due en partie au bruit de

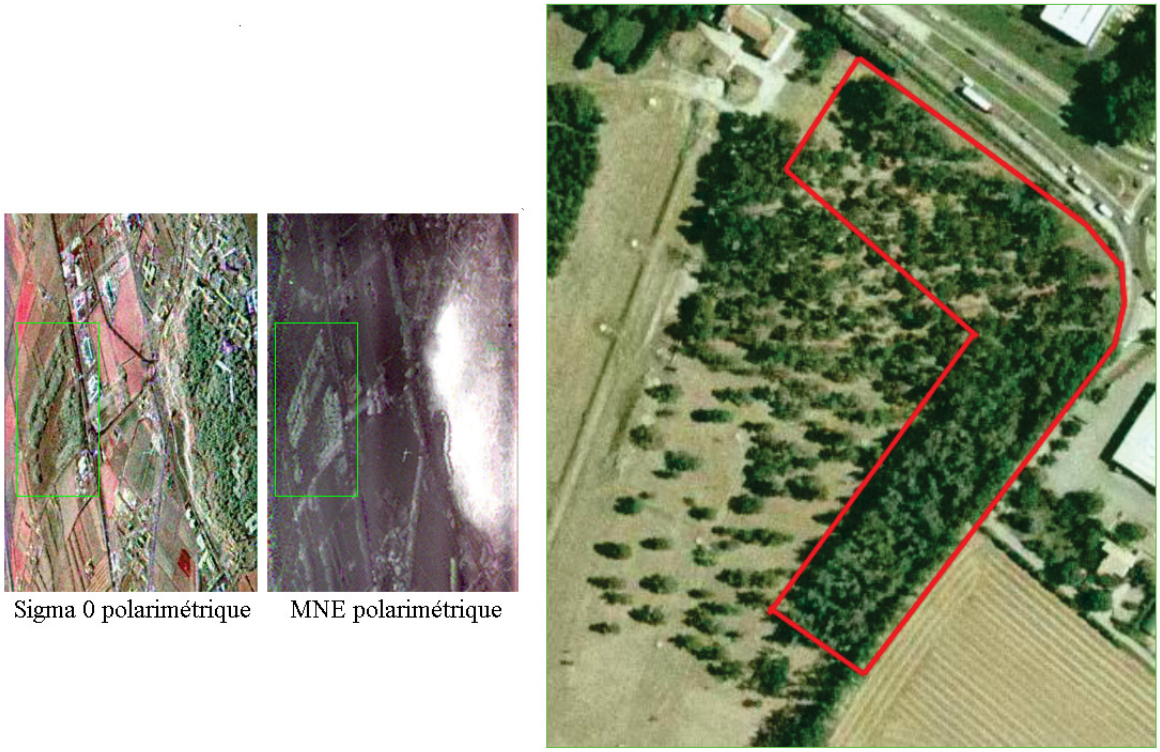

FIG. 2.19 – Représentation et localisation de la forêt de pins sur les cartes de σ_0 polarimétrique et de MNE polarimétrique représentés en entier sur la figure 1.16.

phase généré d'une part par la calibration PolInSAR, et d'autre part par l'estimation elle-même de la cohérence interférométrique sur une fenêtre, amplifiée par la valeur élevée de la hauteur d'ambiguïté. Cependant, comme la distribution de la hauteur mesurée n'est pas gaussienne, la position verticale des centres de phase est aussi nécessairement liée à la structure de la forêt. La figure 2.21 montre une distribution fortement dissymétrique dans le cas de la polarisation HH dont des profils ont révélé que les centres de phase se situent à la même hauteur que ceux de la

FIG. 2.20 – Photographies de la forêt de pins étudiée (prises en mars 2005).

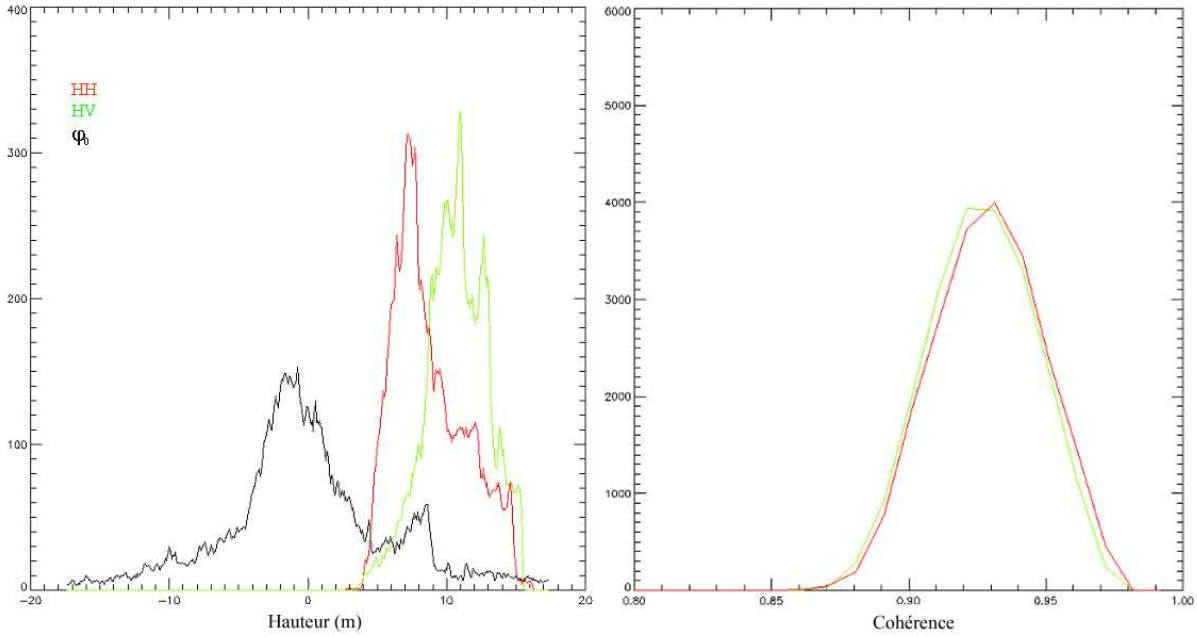

FIG. 2.21 – Histogrammes de hauteurs des centres de phase polarimétriques relatifs aux polarisations HH et HV, et de hauteurs du sol calculées à l'aide du modèle RVoG (à gauche). Histogrammes de cohérence associées aux canaux polarimétriques HH et HV (à droite).

polarisation HV sur les zones de forêt plus denses [Garestier 04a]. En conséquence, la pénétration des ondes associées à la polarisation HH est mise en relation avec les zones clairsemées de la canopée.
La mesure des cohérences associées aux deux canaux polarimétriques sur l'ensemble de la forêt présente des valeurs élevées en raison de la courte ligne de base, qui induit très peu de décorrélation géométrique ($\gamma_{geom} \simeq 0,99$), et parce qu'il y a peu de pénétration. Elles sont néanmoins inférieures aux valeurs mesurées sur les autres types de végétation (figure 1.23 de la partie 1.7).

Afin de procéder à l'inversion des paramètres physiques de la végétation, le modèle RVoG est utilisé avec ces deux polarisations uniquement. Une étude des performances de ce modèle en mode dual-pol, effectuée sur des données acquises en bande L par le système ESAR, a révélé une diminution de la précision de l'inversion comparé à une procédure utilisant toutes les polarisations [Papathanassiou 04]. Une condition nécessaire à l'inversion des paramètres de la forêt à l'aide du modèle RVoG en n'utilisant que deux polarisations est la présence obligatoire de la contribution de la canopée seule, caractérisée par un rapport des puissances du sol et du volume nul, dans l'un des deux canaux polarimétriques. Cette contrainte pouvant être d'autant plus satisfaite en bande X que la pénétration des ondes dans le feuillage est faible à cette fréquence [Mougin 93].

De manière générale, la cohérence interférométrique associée aux deux polarisations $\mathbf{w}_1$ et $\mathbf{w}_2$ est définie comme suit dans une configuration dual-pol d'après les hypothèses du modèle RVoG, avec $\mu(\mathbf{w}_1) = 0$:

$$\begin{aligned} \gamma(\mathbf{w}_1) &= e^{j\phi_0}\gamma_v \\ \gamma(\mathbf{w}_2) &= e^{j\phi_0}\left[\gamma_v + L(\mathbf{w}_2)(1-\gamma_v)\right] \\ \text{avec } L(\mathbf{w}) &= \frac{\mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})} \end{aligned} \tag{2.19}$$

Il a été démontré en bande L dans [Papathanassiou 04] que les polarisations HV et HH constituent le couple ($\mathbf{w}_1$, $\mathbf{w}_2$) idéal pour effectuer l'extraction de paramètres dans une configuration dual-pol. La figure 2.22 montre qu'il en est de même en bande X sur une forêt de pins car le centre de phase correspondant à la polarisation VV est situé 2 m au-dessus de celui qui correspond à la polarisation HH, ce qui diminue par conséquent la distance verticale maximale qui sépare les centres de phase et par conséquent la précision de l'inversion des paramètres de la forêt. Notons que l'élévation de 2 m des centres de phase de la polarisation VV par rapport à HH peut être due à un effet d'orientation (modèle OVoG) et à une plus forte contribution du sol dans le canal HH.

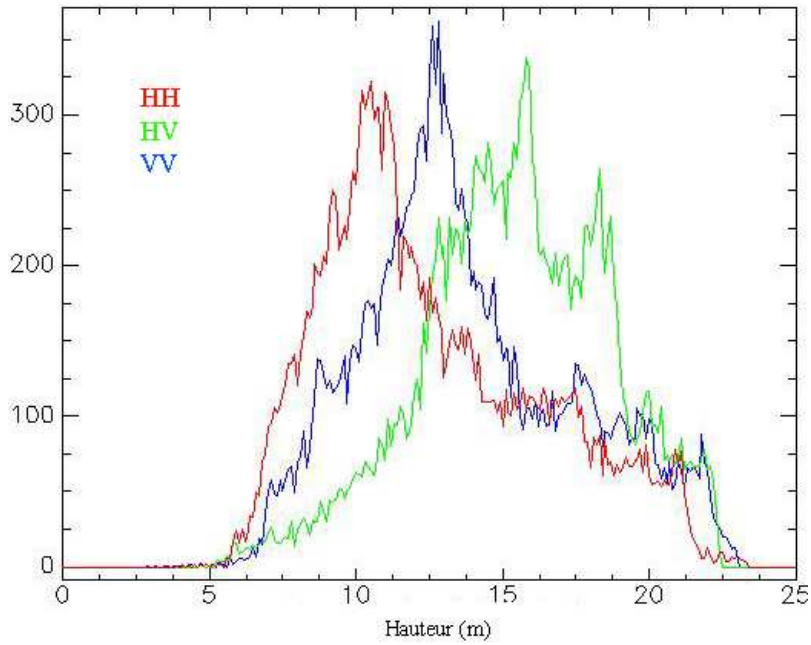

FIG. 2.22 – Histogrammes de hauteur des centres de phase polarimétriques relatifs aux polarisations HH, HV et VV.

La figure 2.21 montre que la différence de hauteur entre le centre de phase correspondant à la polarisation HV et le niveau estimé du sol permet de localiser ce centre de phase polarimétrique en moyenne 4 m au-dessous du sommet de la canopée (moins d'un quart de la hauteur de la forêt), ce qui confirme que seulement une très faible contribution du sol est présente dans

ce canal polarimétrique. De plus, comme la surface sur laquelle se trouve la forêt est plane, aucune topographie n'est à l'origine de la présence d'une contribution du sol dans ce canal polarimétrique. Les hypothèses requises pour l'inversion des paramètres physiques de la forêt à l'aide du modèle RVoG en mode dual-pol (système d'équations 2.19) apparaissent donc très réalistes dans le contexte de cette forêt en bande X. Notons que l'écart-type important de la hauteur du sol estimée sur l'ensemble de la forêt (de l'ordre de 4 m), dont l'histogramme est représenté en noir sur la figure 2.21, est lié à la variabilité de la hauteur des centres de phase polarimétriques, aux performances limitées d'une configuration dual-pol et à la courte ligne de base.

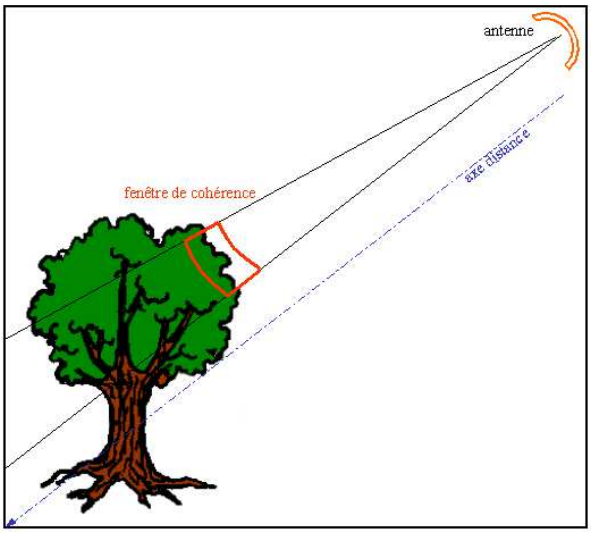

FIG. 2.23 – Variations de la hauteur de la canopée au sein d'une même fenêtre de cohérence en bande X.

Comme l'a illustré l'analyse polarimétrique de la partie 2.3.1.1, les ondes radar en bande X interagissent avec des objets dont la taille est de l'ordre de sa longueur d'onde, c'est pourquoi la "rugosité" de la canopée constitue une source de décorrélation à cette fréquence qui n'est pas prise en compte par le modèle RVoG (figure 2.23). La cohérence interférométrique du volume mesurée est alors égale à :

$$\hat{\gamma}_v = \gamma_v \gamma_{rug} \tag{2.20}$$

γ_{rug} étant réel et positif, et inférieur à 1.

La décorrélation γ_{rug}, générée par les variations de la hauteur de la canopée dans une fenêtre affectant la cohérence interférométrique du volume γ_v, est estimée en moyenne à 0,95. Cette décorrélation n'affectant que la contribution de la canopée, elle provoque les mêmes effets sur le signal interférométrique des différents canaux polarimétriques que la décorrélation temporelle de la canopée γ_{tv}, due aux mouvements des feuilles induits par le vent. L'impact de ce type de décorrélation sur l'inversion des paramètres physiques de la forêt avec le modèle RVoG a été évalué dans [Papathanassiou 03b]. La figure 2.24 montre l'effet de la décorrélation temporelle sur la position de la cohérence interférométrique dans le plan complexe. Plusieurs valeurs de décorrélation temporelle du volume sont symbolisées par les différentes couleurs. Pour chacune

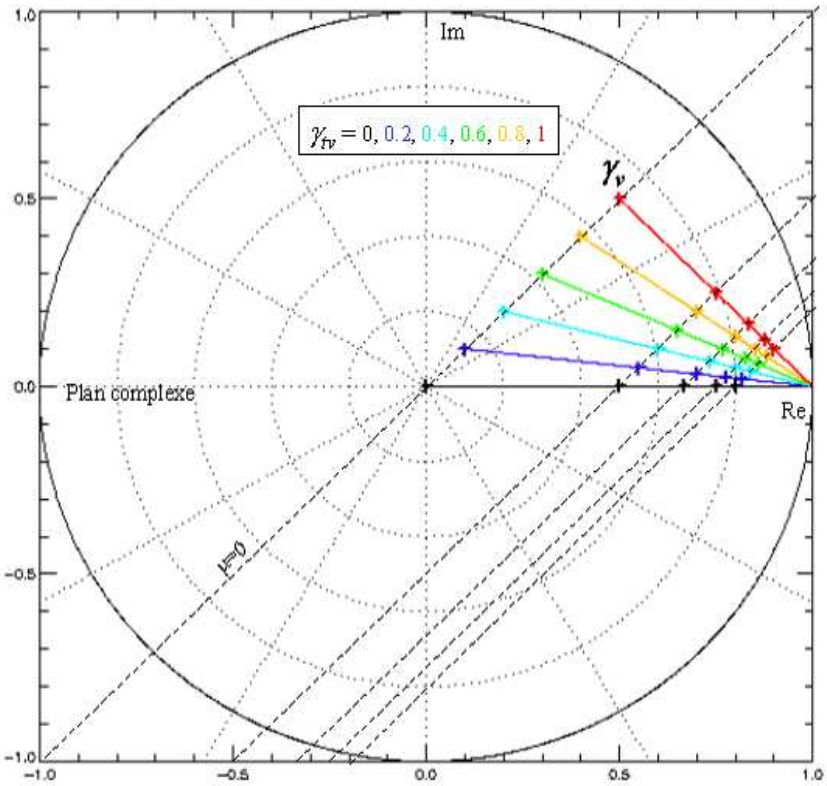

FIG. 2.24 – Migration de la cohérence interférométrique d'un volume aléatoire sur une surface de sol dans le plan complexe correspondant à plusieurs rapports sol/volume lorsque la décorrélation temporelle γ_t augmente.

d'entres elles, cinq croix localisent la cohérence interférométrique d'une contribution associée à un rapport des puissances du sol et du volume μ donné, la première indiquant la position de celle de la contribution de la canopée mesurée $\hat{\gamma}_v$ définie par $\mu = 0$. Quel que soit le rapport des puissances du sol et du volume, la cohérence interférométrique $\gamma(\mathbf{w})$ se déplace selon la direction de la droite passant par γ_v et l'origine du plan complexe (matérialisée par les lignes en pointillés sur la figure 2.24) à mesure que la décorrélation temporelle augmente. La phase du sol estimée par régression linéaire des cohérences interférométriques des différents canaux polarimétriques n'est alors pas biaisée par une décorrélation du signal interférométrique du volume.

En bande X, la perte de cohérence causée par la rugosité de la canopée doit par conséquent être compensée avant de procéder à l'inversion des paramètres physiques de la forêt. Cependant, une correction radiale de la cohérence interférométrique associée au canal HV ne permet plus l'extraction simultanée de la hauteur de la forêt h_v et du coefficient d'extinction moyen σ. La hauteur de la forêt est donc inversée en supposant plusieurs valeurs de coefficient d'extinction moyen. La figure 2.25 présente les histogrammes de hauteur de la forêt calculés sur l'ensemble de la forêt pour des coefficients d'extinction moyens variant de 0,4 à 2 dB/m.

Comme il est expliqué dans la partie 2.2.2.1, la précision de l'estimation de la hauteur de la

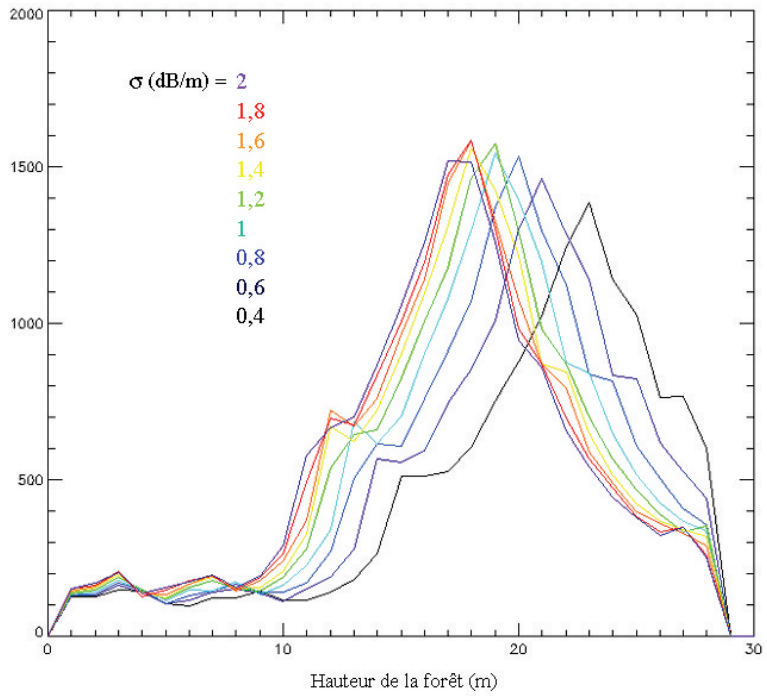

FIG. 2.25 – Histogrammes de hauteur de la forêt h_v, calculées pour plusieurs valeurs de coefficient d'extinction moyen allant de 0,4 à 2 dB/m.

forêt dépend de la qualité de la régression linéaire des cohérences interférométriques dans le plan complexe. C'est pourquoi l'écart-type de la hauteur de la forêt estimée est du même ordre que celui de la hauteur du sol quelle que soit la valeur du coefficient d'extinction moyen. La figure 2.25 montre que les hauteurs les plus élevées sont estimées pour les coefficients d'extinction moyens supposés les plus bas. En effet, pour que la position verticale du centre de phase d'un volume de particules orientées aléatoirement demeure constante lorsque l'extinction des ondes diminue (la profondeur de pénétration des ondes devient plus élevée), la hauteur du volume doit augmenter. La figure 2.26 montre que la hauteur moyenne de la forêt de pins (égale à 18 m) est retrouvée pour une valeur de coefficient d'extinction moyen $\sigma = 1{,}6$ dB/m.

Cette valeur élevée est en accord avec la faible pénétration de la bande X dans le couvert végétal. Les précisions associées au coefficient d'extinction moyen et à la hauteur sont représentées sur figure 2.26. Il apparaît qu'une erreur de 30% sur la valeur a priori du coefficient d'extinction moyen (0,5 dB/m) induit seulement une erreur de l'ordre de 5% (1 m) sur la hauteur. La faible sensibilité du coefficient d'extinction moyen lorsqu'il prend de hautes valeurs évoquée dans la partie 2.2.2.2 est également observable sur la figure 2.25 qui montre qu'un large intervalle de coefficients d'extinction moyens permet d'approcher la hauteur réelle de la forêt en utilisant le modèle RVoG.

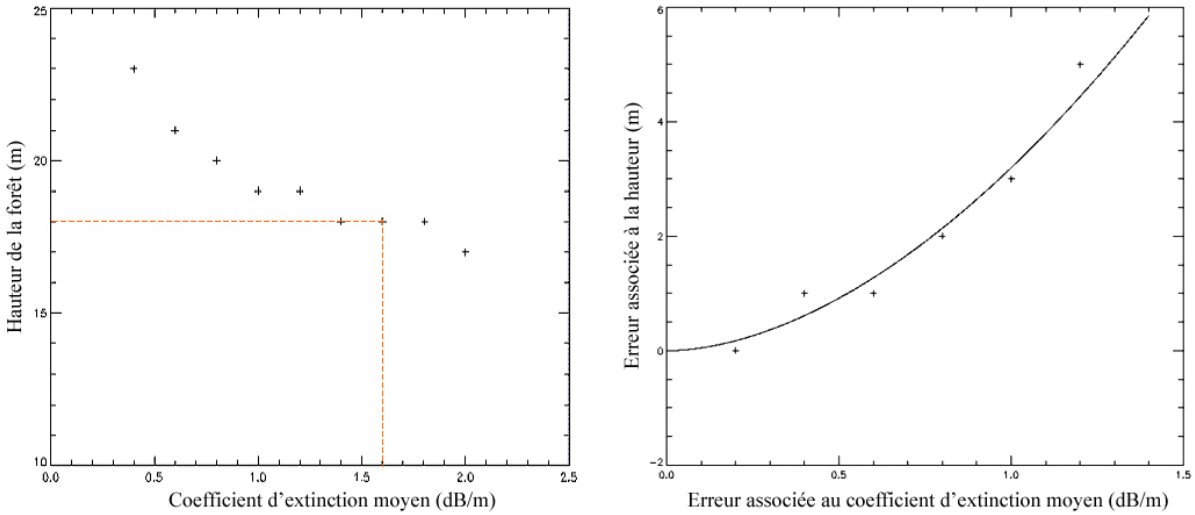

FIG. 2.26 – Valeurs moyennes des hauteurs de la forêt estimées pour plusieurs valeurs de coefficients d'extinction moyens (à gauche). Erreur de l'estimation de la hauteur en fonction de celle qui est associée au coefficient d'extinction moyen (à droite).

2.3.2.2 Analyse temps-fréquence

Comme il est exposé dans la partie 1.7.2.4 et représenté sur la figure 1.26, la décomposition d'une image SAR en sous-looks permet de sélectionner les contributions provenant de différents

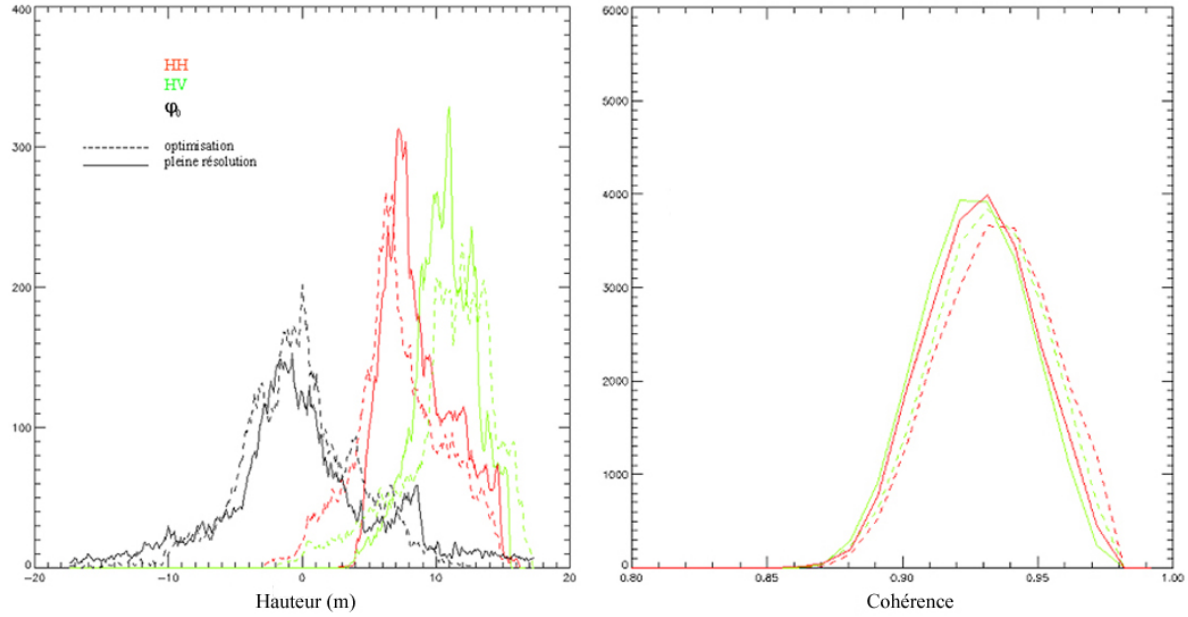

FIG. 2.27 – Histogrammes de hauteur des centres de phase polarimétriques et du sol (à gauche) et des cohérences (à droite), avant (trait plein) et après (pointillés) optimisation temps-fréquence.

angles de visée. Dans la partie précédente, l'hypothèse de la présence de la contribution de la canopée seule dans le canal polarimétrique HV est faite afin de procéder à l'inversion des paramètres physiques de la forêt avec le modèle RVoG. Même si la validité de cette hypothèse est particulièrement vérifiée en bande X, une composante des signaux caractérisés par cet état de polarisation peut en réalité être rétrodiffusée par la surface de sol, d'autant plus que celle-ci est recouverte d'herbe. L'analyse temps-fréquence constitue alors un moyen d'isoler la contribution de la canopée et donc d'effectuer une extraction de paramètres non-biaisée à l'aide du modèle RVoG. De même, la sélection d'une contribution ayant un rapport des puissances du sol et du volume μ plus élevé dans le canal HH permet d'augmenter la précision de la régression linéaire, de laquelle dépendent les performances du modèle RVoG.

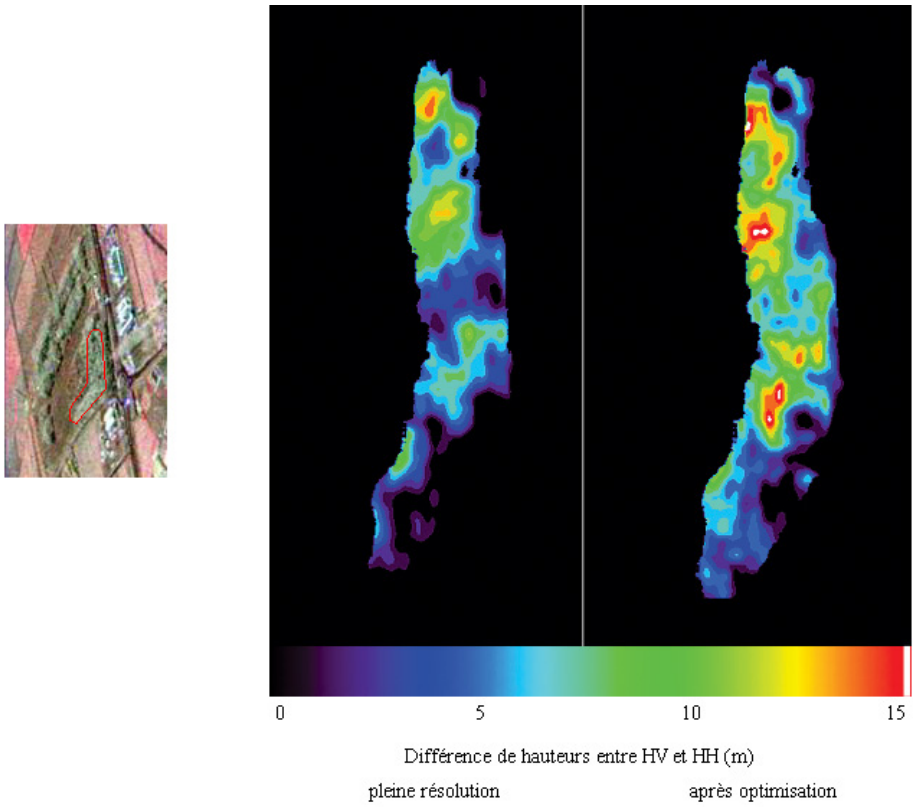

FIG. 2.28 – Représentation spatiale de la différence de hauteur entre les centres de phases associés aux polarisations HV et HH avant (à gauche) et après (à droite) l'optimisation temps-fréquence.

Cinq sous-looks sont formés sur chaque paire interférométrique. Le spectre fréquentiel est filtré seulement en azimut, la pleine résolution étant conservée en distance. Un tiers de la bande Doppler est conservée et trois des cinq sous-looks sont indépendants. La cohérence interférométrique est calculée sur les images interférométriques du même sous-look, c'est à dire correspondant au même angle de visée. La calibration polarimétrique et interférométrique est contrôlée sur chaque sous-look sur des trièdres et des surfaces nues. L'objectif étant à la fois d'augmenter la rétrodiffusion de la canopée dans le canal HV et celle du sol dans le canal HH, le critère de sélection du sous-look optimal est la maximisation de la distance verticale entre ces deux centres de phase polarimétriques.

La figure 2.27 présente les histogrammes de hauteur des centres de phase polarimétriques correspondant aux deux canaux utilisés (HH et HV) à pleine résolution et après la procédure d'optimisation de la distance verticale des centres de phase. L'augmentation de la distance verticale entre les centres de phase des canaux HH et HV obtenue après décomposition en sous-looks est évaluée à 3 m, ce qui correspond à la moitié de leur distance de séparation verticale moyenne initiale (à pleine résolution). Si les hauteurs des centres de phase du canal HV augmentent uniformément, certains centres de phase correspondant à la polarisation HH présentent quant à eux une forte diminution de la distance qui les sépare du sol. Notons que même si l'intervalle de variation de l'angle d'observation est étroit (de l'ordre de 1°), l'angle d'incidence plongeant favorise la réception de la contribution du sol lorsque l'angle d'observation varie.

La représentation spatiale de la différence de hauteur des centres de phase polarimétriques de la partie gauche de la figure 2.28 montre tout d'abord que celle-ci est plus importante à pleine résolution dans la partie la moins dense de la forêt de pins (photographie optique de l'IGN de la figure 2.19). La carte de droite montre que l'optimisation temps-fréquence conduit parfois à une séparation presque complète des centres de phase polarimétriques, donc des contributions du sol et de la canopée, car les zones blanches indiquent une distance verticale des centres de phase supérieure ou égale à 15 m.

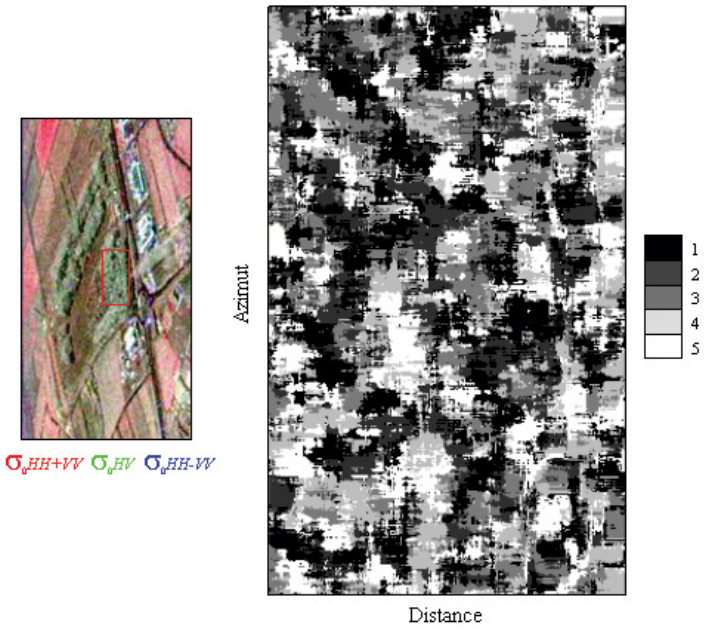

Fig. 2.29 – Identification du sous-look maximisant la distance verticale entre les centres de phase polarimétriques sur une partie de la forêt.

La carte de la figure 2.29 indique quel est le sous-look optimal parmi les cinq formés au total, sur la majeure partie de la forêt indiquée par un cadre rouge sur la carte de Sigma 0 polarimétrique juxtaposée. Chaque niveau de gris étant associé à un sous-look, la couleur correspondant à celui qui permet une meilleure séparation des centres de phase polarimétriques est

reportée pour chaque fenêtre d'estimation glissante de l'image. Les variations de couleur sont donc directement reliées aux variations d'angle de provenance des contributions sélectionnées, au sein d'un intervalle total de l'ordre de 1° pour ce jeu de données en bande X. La direction de provenance des contributions optimales apparaît aléatoire sur l'ensemble de la forêt, ce qui est en adéquation avec la distribution spatiale de la densité de pins.

Ceci permet de vérifier l'absence de biais provenant du système (gain variable de l'antenne, bruit coloré...) induit par la décomposition en sous-looks, qui ferait apparaître des comportements constants sur la figure 2.29. La figure 2.27 révèle une augmentation globale de la cohérence après optimisation. En effet, séparer verticalement les centres de phase polarimétriques revient à sélectionner des contributions provenant de sources plus localisées en hauteur. C'est la diminution de la dispersion verticale des sources de ces contributions qui a pour effet d'augmenter la cohérence du signal interférométrique.

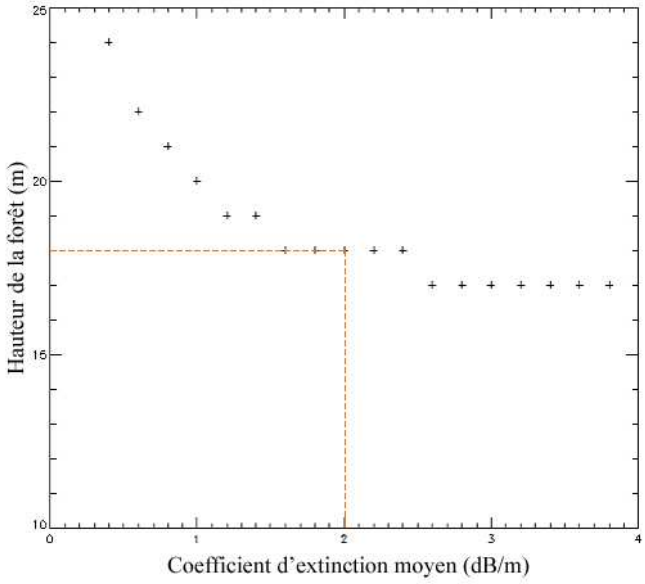

FIG. 2.30 – Valeurs moyennes des hauteurs de la forêt estimées pour plusieurs valeurs de coefficients d'extinction moyens après optimisation temps-fréquence.

Concernant la qualité de l'inversion des paramètres de la forêt avec le modèle RVoG après la procédure d'optimisation, la figure 2.27 montre que la précision de l'estimation de la phase interférométrique du sol est effectivement accrue car les valeurs sont moins dispersées qu'à pleine résolution. Les résultats de l'inversion non-biaisée avec le modèle RVoG sont représentés sur la figure 2.30. En utilisant la vérité terrain, une estimation plus juste du coefficient d'extinction moyen est possible : 2 dB/m. La moyenne des mesures de la différence de hauteurs entre le centre de phase polarimétrique correspondant à HV et le sol estimé avec le modèle RVoG permet de ne sous-estimer la hauteur de la forêt que de 2 m. Ceci donne une mesure de la profondeur de pénétration de la bande X de l'ordre de 2 m dans le feuillage, ce qui est légèrement supérieur à celle qui est estimée dans [Mougin 93] (environs 1 m).

2.4 Bande P

2.4.1 Sensibilité radiométrique et polarimétrique à la biomasse

Les données constituant le support de l'évaluation de la bande P pour l'estimation de la biomasse ont été acquises durant la campagne "Pyla 2004" sur la forêt de Nezer selon une passe effectuée dans la direction Est-Ouest, de même que dans le cas des données en bande L présentées dans la partie 2.2.1. Comme l'indique le tableau 2.2, la taille de la cellule de résolution est 2,5 m x 3,2 m (projetée) et l'angle d'incidence varie de 18° à 62° sur toute la fauchée. La figure 2.33

Bande	P
Mode	PolInSAR
Hauteur d'ambiguïté	$\simeq$ 45 m (multi-passes)
Angle d'incidence	18° à 62°
Résolution	2,5 m x 3,2 m

Tab. 2.2 – Paramètres système de l'acquisition de données PolInSAR en bande P sur la forêt de Nezer lors de la campagne "Pyla 2004".

représente une carte de σ_0 polarimétrique codée dans la base lexicographique où les surfaces nues et de végétation basse apparaissent en violet, et les parcelles de forêt en vert. Notons que le phénomène de rétrodiffusion spéculaire est observable sur des talus pour les polarisations co-polaires et est localisé sur l'image par des lignes de couleur violette de forte intensité. Le σ_0 est représenté sur la figure 2.31 en fonction de l'âge des parcelles. Une bonne corrélation entre la signature radiométrique et la biomasse est observée pour les trois canaux polarimétriques HH,

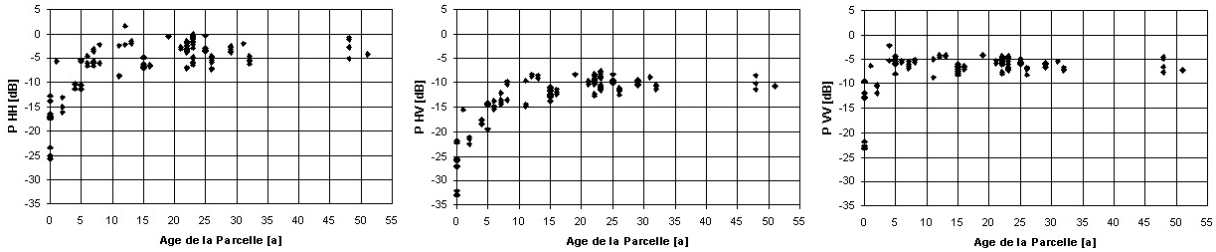

Fig. 2.31 – σ_0 (en dB) en fonction de l'âge des parcelles pour les polarisations HH, HV et VV

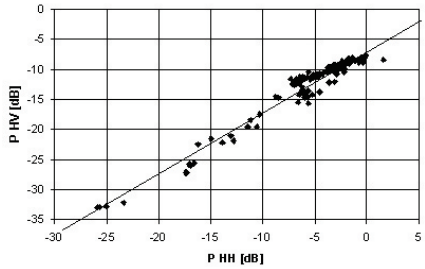

Fig. 2.32 – Corrélation entre les σ_0 des polarisations HH et HV.

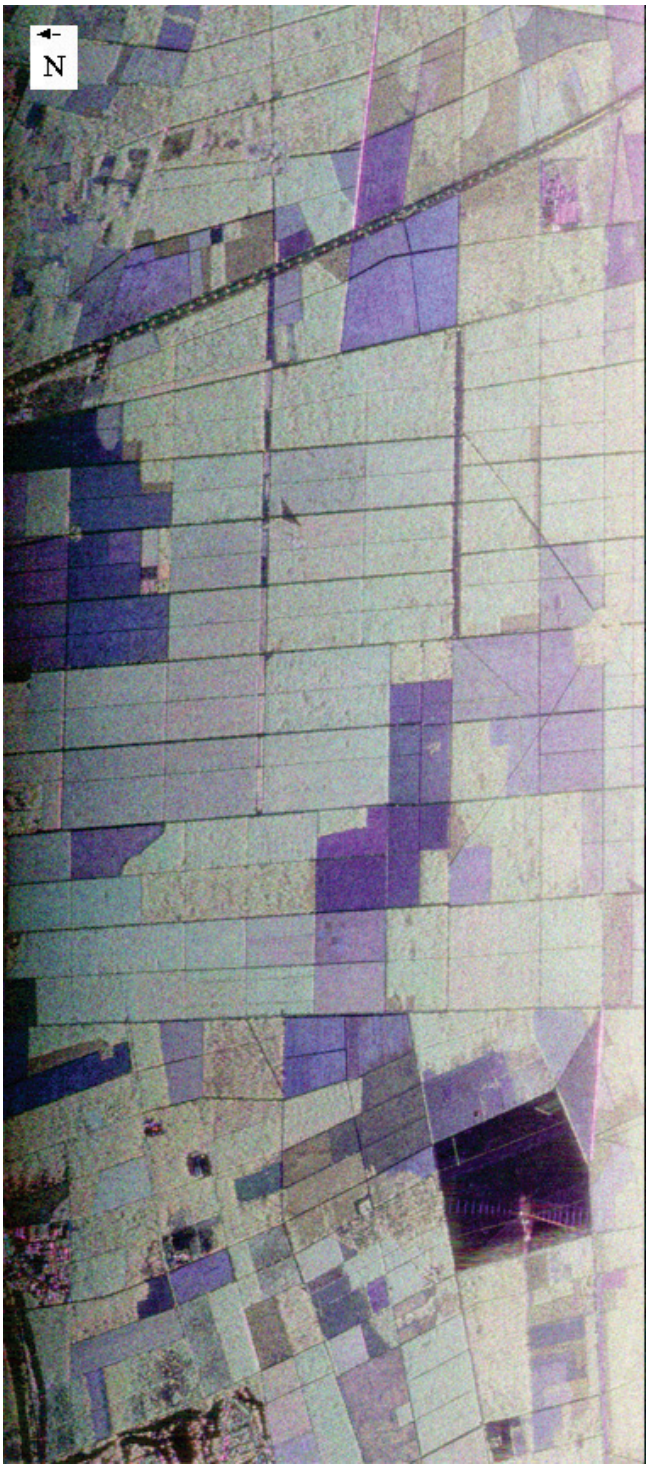

FIG. 2.33 – Données polarimétriques acquises en bande P sur la forêt de Nezer : carte de Sigma 0 polarimétrique normalisé associé à la base lexicographique. La passe est effectuée dans la direction Est-Ouest.

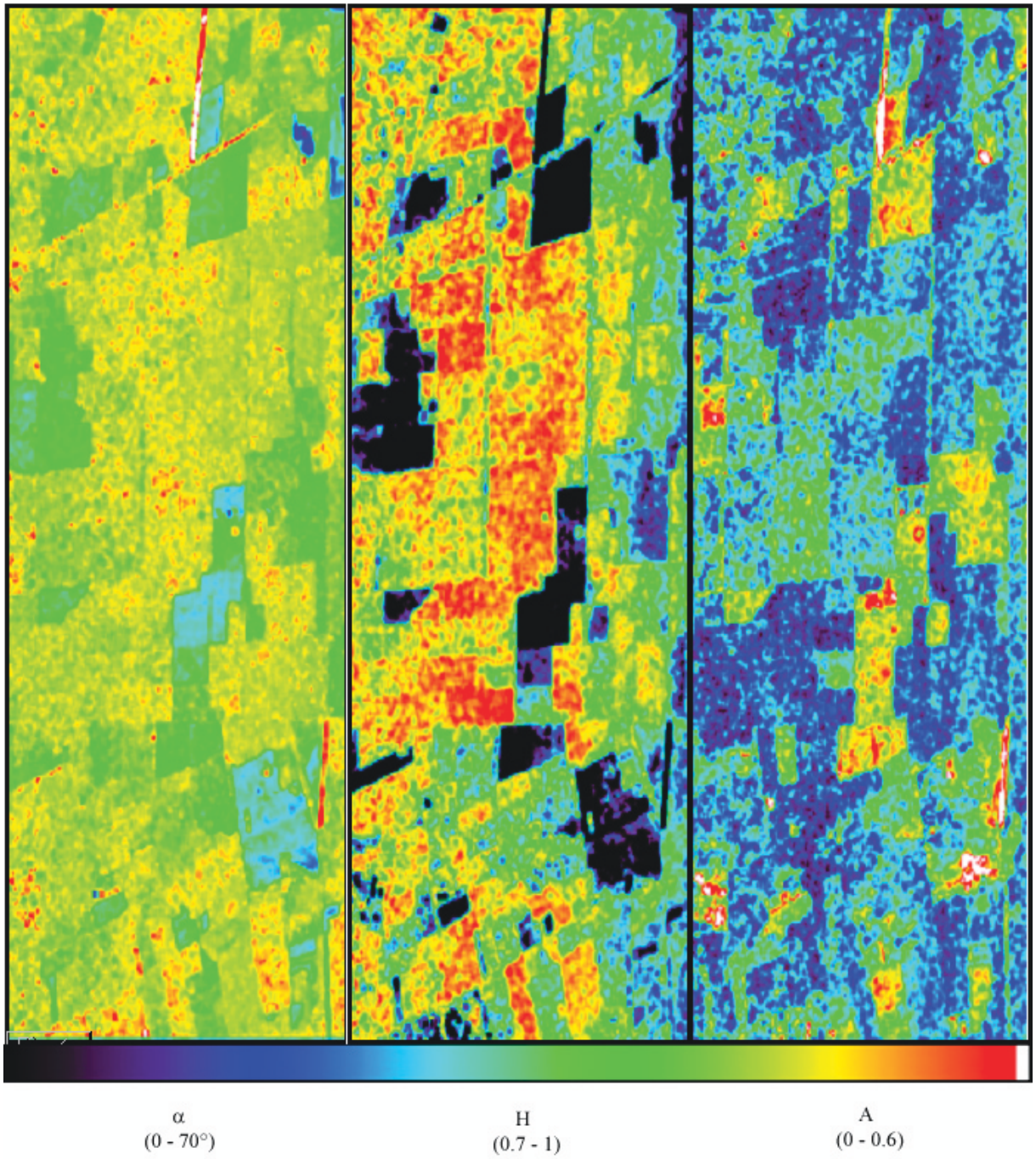

FIG. 2.34 – Représentation spatiale de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie calculés sur une fenêtre 25 x 25.

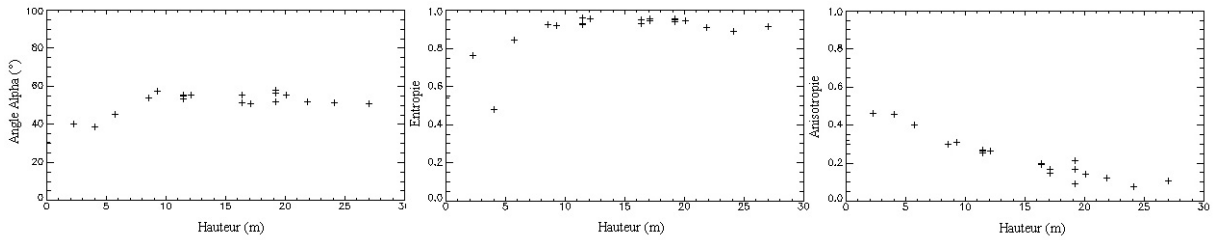

FIG. 2.35 – Moyenne de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie sur la parcelle en fonction de la hauteur moyenne.

HV et VV, comme il a été mis en évidence dans [Beaudoin 94], [Le Toan 92], [Mougin 99], la biomasse étant proportionnelle à l'âge des pins, comme l'a montré la figure 2.2. Plus précisément, ceci permet de vérifier que l'information radiométrique associée au canal HV, dans lequel le σ_0 présente une dynamique de 25 dB, est la plus étroitement liée à la biomasse, et que la polarisation VV est en revanche la moins sensible aux variations de ce paramètre, comme il est mentionné dans [Beaudoin 94]. Les courbes associées aux polarisations HH et HV montrent que le σ_0 correspondant est corrélé à la biomasse sur les parcelles les plus jeunes et que la sensibilité du σ_0 à la biomasse décroît sur les parcelles les plus vieilles. Notons que l'importante variation de l'angle d'incidence sur l'ensemble de la fauchée est susceptible d'avoir une forte influence sur la relation qui lie la hauteur à la biomasse. Les courbes de la figure 2.31 associées aux polarisations HH et HV possèdent la même allure et ne diffèrent que par leur dynamique, c'est pourquoi l'énergie rétrodiffusée dans ces deux canaux est très corrélée sur tout l'intervalle de biomasse, comme le montre la figure 2.32.

De même que dans le cas des données acquises en bande L sur la forêt de Nezer, une analyse en angle alpha/entropie/anisotropie est effectuée afin de compléter l'étude de la sensibilité polarimétrique de données acquises en bande P à la biomasse [Garestier 05b]. Une représentation spatiale de ces paramètres sur la figure 2.34 ne révèle pas de variations significatives de l'angle alpha et de l'entropie sur les différentes parcelles de pins, mais seulement une légère tendance en fonction de la position en distance et donc de l'angle d'incidence. La carte d'anisotropie apparaît quant à elle bien plus contrastée sur l'ensemble des données et la valeur du paramètre n'est pas homogène sur l'ensemble des parcelles de différentes hauteurs comme l'entropie et de l'angle alpha.

La valeur moyenne de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie sur chaque parcelle est représentée en fonction de leur hauteur moyenne sur la figure 2.35. Au delà de 9 m de hauteur, l'angle alpha et l'entropie atteignent des valeurs typiques de la rétrodiffusion de volume. Par contre, l'anisotropie A varie de manière linéaire en fonction de la hauteur $\overline{h}$ et la régression est donnée par l'équation de droite suivante :

$$A = -0,018\overline{h} + 0,5 \tag{2.21}$$

A cette fréquence, l'anisotropie polarimétrique ne présente aucune saturation conduisant à une valeur constante sur les parcelles les plus hautes, comme c'est le cas des autres paramètres polarimétriques et du σ_0 des différents canaux polarimétriques. De ce fait, ce paramètre est le

plus performant pour l'estimation de la biomasse.

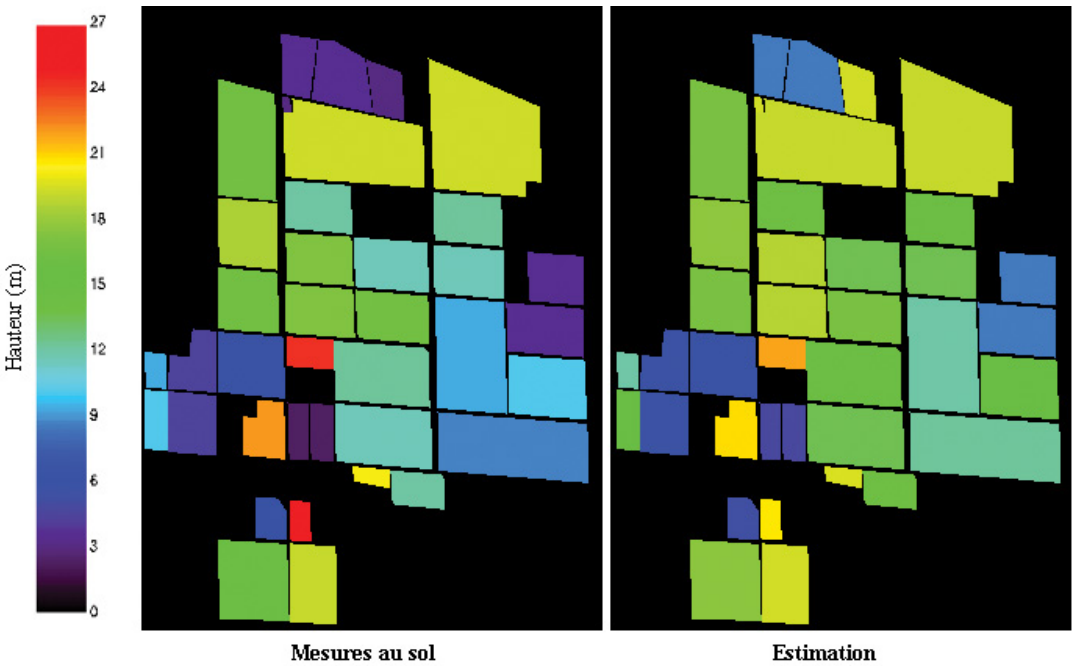

FIG. 2.36 – Inversion de la hauteur des parcelles à partir de l'anisotropie polarimétrique.

Dans le but d'illustrer le potentiel de l'information polarimétrique en bande P, la figure 2.36 présente une carte de la hauteur des parcelles inversée à partir de l'anisotropie. On constate que la hauteur des parcelles est retrouvée avec une précision moyenne inférieure à 2 m sur tout l'intervalle (0-30 m).

2.4.2 Analyse PolInSAR et extraction de paramètres

L'information PolInSAR va permettre dans un premier temps de localiser les rétrodiffuseurs correspondant aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion en comparant la hauteur des centres de phase polarimétriques et les différentes données structurales de la forêt de Nezer (hauteur, DBH, densité d'arbres, diamètres et orientation des branches primaires). La seconde partie concerne l'évaluation du modèle du volume de particules reposant sur une surface de sol puis le développement de méthodologies adaptées à la bande P combinant les hypothèses de la modélisation cohérente et l'optimisation temps-fréquence pour estimer la hauteur des pins et par conséquent la biomasse aérienne de la forêt.

2.4.2.1 Analyse structurale

La pénétration des ondes radar dans le couvert végétal étant importante en bande P, l'interaction s'effectue avec une grande partie de la canopée et la contribution du sol est généralement présente dans le signal rétrodiffusé. Le rapport des puissances des contribution du sol et du volume dépend étroitement de la polarisation et de la hauteur de la forêt, c'est pourquoi la cohérence du signal interférométrique et la hauteur des centres de phase polarimétriques est très

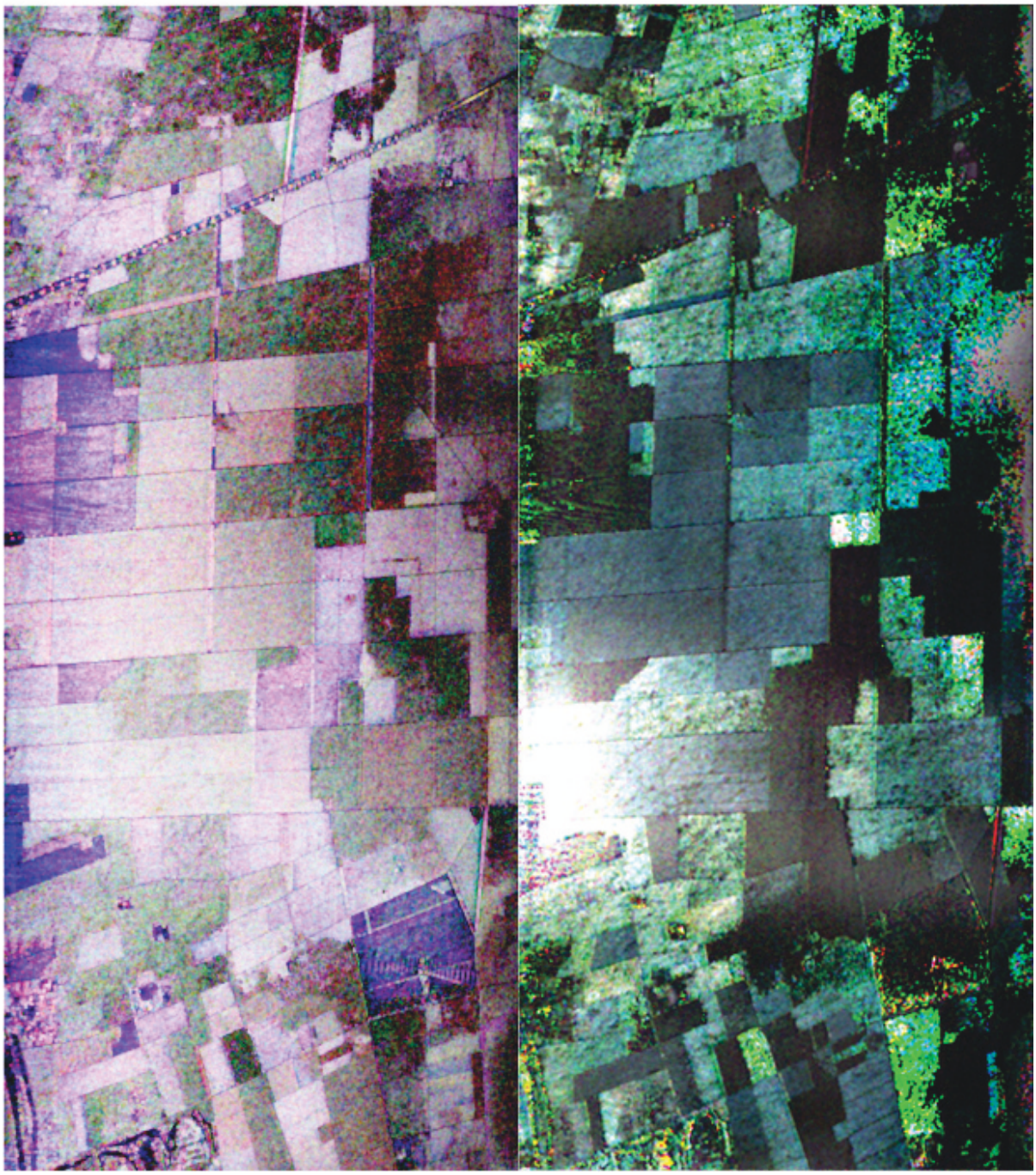

Fig. 2.37 – Représentation RGB de la carte des cohérences et du MNE polarimétriques calculés sur la forêt de Nezer correspondant à la base lexicographique (HH est associé à la couleur rouge, HV, au vert et VV au bleu). La hauteur des centres de phase est comprise entre 0 et 30 m et la cohérence est représentée entre 0 et 1.

variable sur l'ensemble des parcelles, comme le MNE polarimétrique et la carte des cohérences associés aux polarisations linéaires représentés sur la figure 2.37 en codage RGB.

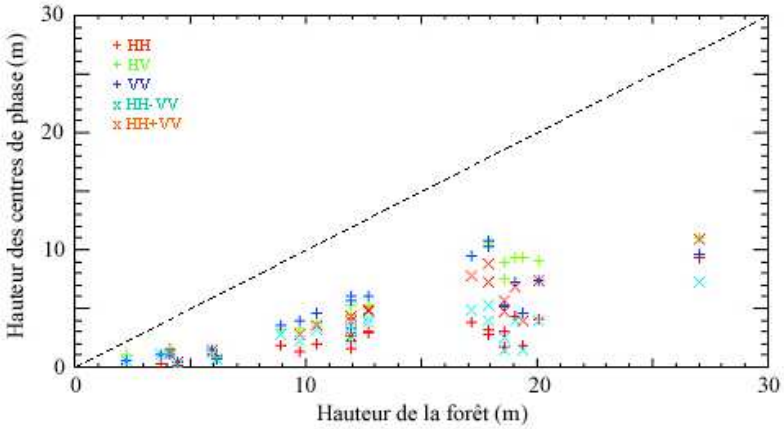

FIG. 2.38 – Représentation de la différence de hauteur des centres de phase polarimétriques et du niveau d'une surface de sol en fonction de la hauteur des parcelles.

Comme la région entourant la forêt de Nezer ne présente pas de topographie marquée et que la stabilité de la phase interférométrique des surfaces nues et des trièdres de calibration est vérifiée sur l'ensemble des données, la différence entre la hauteur des centres de phase polarimétriques calculée sur les différentes parcelles et d'une surface de sol permet d'obtenir une estimation de la hauteur absolue de ces centres de phase. La figure 2.38 met tout d'abord en évidence une importante diversité des profondeurs de pénétration entre les différents canaux polarimétriques. La profondeur de pénétration varie également en fonction de la hauteur de la forêt différemment d'un canal polarimétrique à l'autre. Sur les parcelles dont la hauteur est inférieure à 18 m, le centre de phase le plus élevé correspond à la polarisation VV et le plus bas à la polarisation HH. Au delà de cette hauteur, une réorganisation verticale des centres de phase est observée et les centres de phase associés aux polarisations HV et HH-VV occupent les positions extrêmes.

Le comportement de la phase interférométrique correspondant aux différentes polarisations est résumé par la figure 2.39 qui présente les histogrammes de hauteur des centres de phase calculés sur l'ensemble de chaque parcelle pour quatre étapes caractéristiques de la croissance des pins. Aucune différence de hauteur entre les différents centres de phase polarimétriques n'est mesurable sur les parcelles constituées de pins d'âge inférieur à 6 ans et les centres de phase sont situés très près du sol en raison de la présence d'une forte contribution de celui-ci dans tous les canaux polarimétriques. Sur les parcelles de 6 à 18 m, l'écart maximal entre les hauteurs des centres de phase polarimétriques, proportionnel à la différence de phases interférométriques des canaux co-polaires, croît avec la hauteur de la forêt. Pour les parcelles les plus hautes, l'écart maximal cesse d'augmenter et la hauteur des centres de phase associés aux états de polarisation VV et HH-VV diminue, perturbant le classement vertical des centres de phase polarimétriques.

Les mécanismes de rétrodiffusion sont fortement dépendants de la structure intrinsèque et de la géométrie du milieu avec lequel les ondes radar interagissent. C'est pourquoi l'évolution des positions verticales relatives des centres de phase associés aux mécanismes élémentaires de

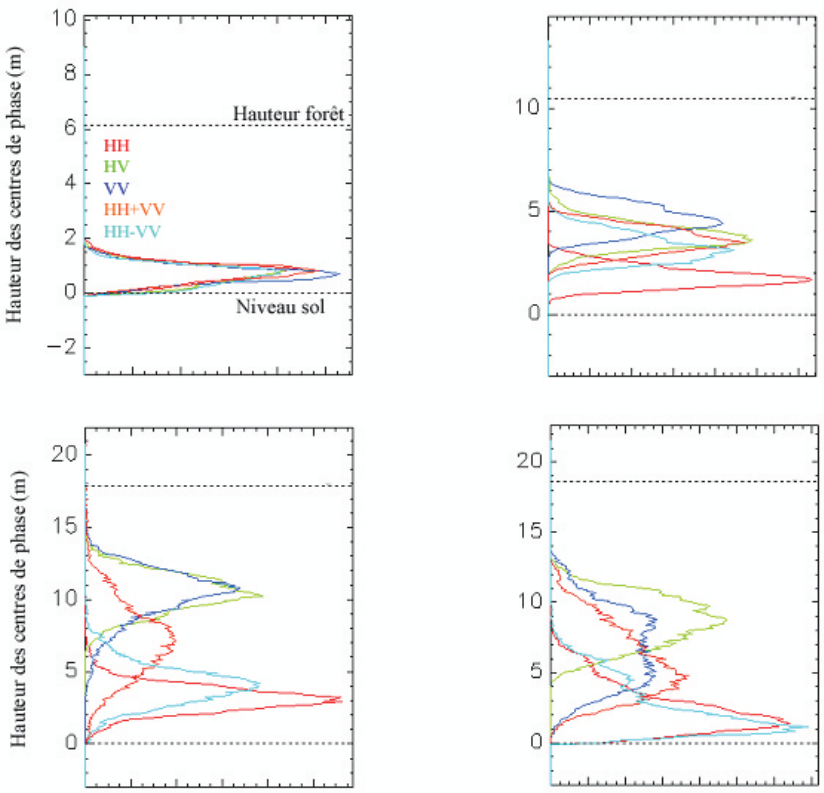

FIG. 2.39 – Histogrammes de hauteurs des centres de phase polarimétriques estimées sur des parcelles de différentes hauteurs.

rétrodiffusion va être confrontée à celle des éléments structuraux de la forêt, à mesure que la taille des pins augmente, afin de localiser les rétrodiffuseurs correspondants. Pour plus de clarté, chaque canal polarimétrique, dont la hauteur du centre de phase est représentée sur la figure 2.39, va être considéré indépendamment dans le but de déterminer l'origine des sources des contributions reçues.

– **le canal VV**

Comme le centre de phase associé à la polarisation VV est le plus élevé sur les parcelles de hauteur inférieure à 18 m, la forêt de pins ne peut être modélisée en bande P par un volume de particules orientées aléatoirement (modèle RVoG) comme c'est généralement le cas en bande L. Le classement vertical des centres de phase polarimétriques de la base lexicographique est en effet la signature d'un volume de particules orientées verticalement (modèle OVoG), caractérisé par une extinction des ondes radar maximale dans la direction verticale et minimale dans la direction horizontale. La contribution du sol est alors plus importante dans le canal HH que dans le canal VV. De même que dans le cas des surfaces agricoles de type "blé" en bande X (voir partie 2.3.1.2), la base de polarisations optimale associée au coefficient d'extinction moyen est $\{h, v\}$ en raison de la structure verticale du milieu formée par les troncs des pins.

Comme il a été évoqué lors de la présentation de la forêt de Nezer dans la partie 2.2.1, les parcelles sont éclaircies à mesure que la taille des pins augmente. La figure 2.3 présente l'évolution globale de la densité de pins en fonction de leur hauteur à partir de mesures provenant de quelques parcelles de différentes forêts de pins maritimes contrôlées par l'INRA. Cependant, même si cette tendance est représentative de la maintenance globale des parcelles, les contraintes matérielles perturbent la régularité des interventions sur toutes les forêts. Ainsi, la diminution de hauteur du centre de phase associé à la polarisation VV, observable sur les parcelles de hauteur supérieure à 18 m est due à la diminution de la densité de la forêt sur ces parcelles, augmentant ainsi la contribution du sol dans ce canal polarimétrique.

– **le canal HH-VV**

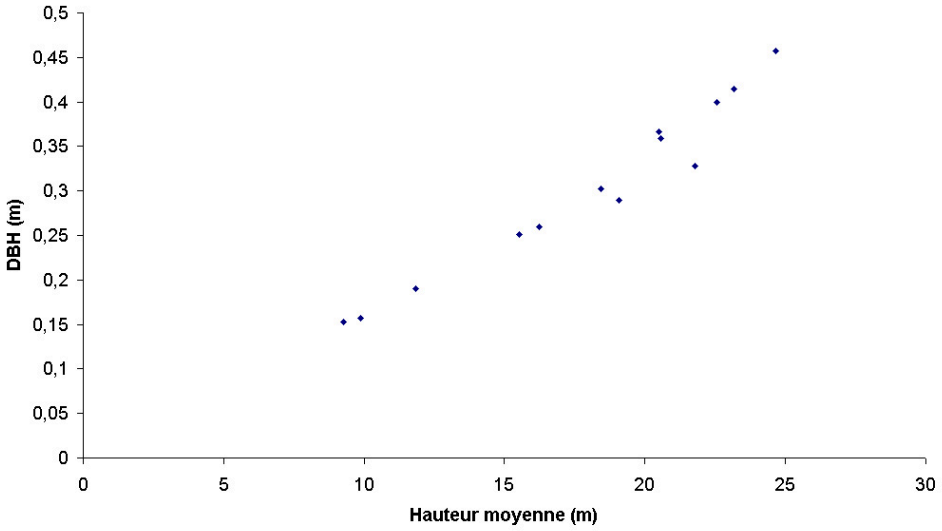

FIG. 2.40 – Diamètre des troncs à 1,3 m du sol ("Diameter at Breast Height") en fonction de la hauteur moyenne des parcelles.

Les figures 2.38 et 2.39 montrent que la position du centre de phase associé au mécanisme de double rebond, qui est potentiellement présent sur l'ensemble de la hauteur de la forêt, diminue jusqu'à devenir le centre de phase polarimétrique le plus proche du sol sur les parcelles les plus hautes. La figure 2.40 présente la corrélation entre le diamètre moyen des troncs à 1,3 m du sol ("Diameter at Breast Height") et la hauteur moyenne des pins. D'une part, l'accroissement de la largeur du dièdre formé par le tronc et le sol induit une augmentation de l'intensité du mécanisme de double rebond au niveau du sol et, d'autre part, l'éclaircissement de la forêt favorise la réception de cette contribution, ce qui a pour effet d'abaisser le centre de phase correspondant.

– **le canal HH**

La proximité de ce centre de phase avec le sol est lié à la faible extinction des ondes radar et à la présence des contributions du sol et du mécanisme de double rebond dans ce canal. Cependant, à mesure que la hauteur de la forêt augmente, ce centre de phase s'éloigne du niveau du sol. Deux variations de la structure du pin lors de sa croissance sont candidates pour expliquer cette

élévation.

La première est l'augmentation du diamètre et de la hauteur du tronc pouvant être le siège du mécanisme de rétrodiffusion de surface sur un plus grand intervalle de hauteur.

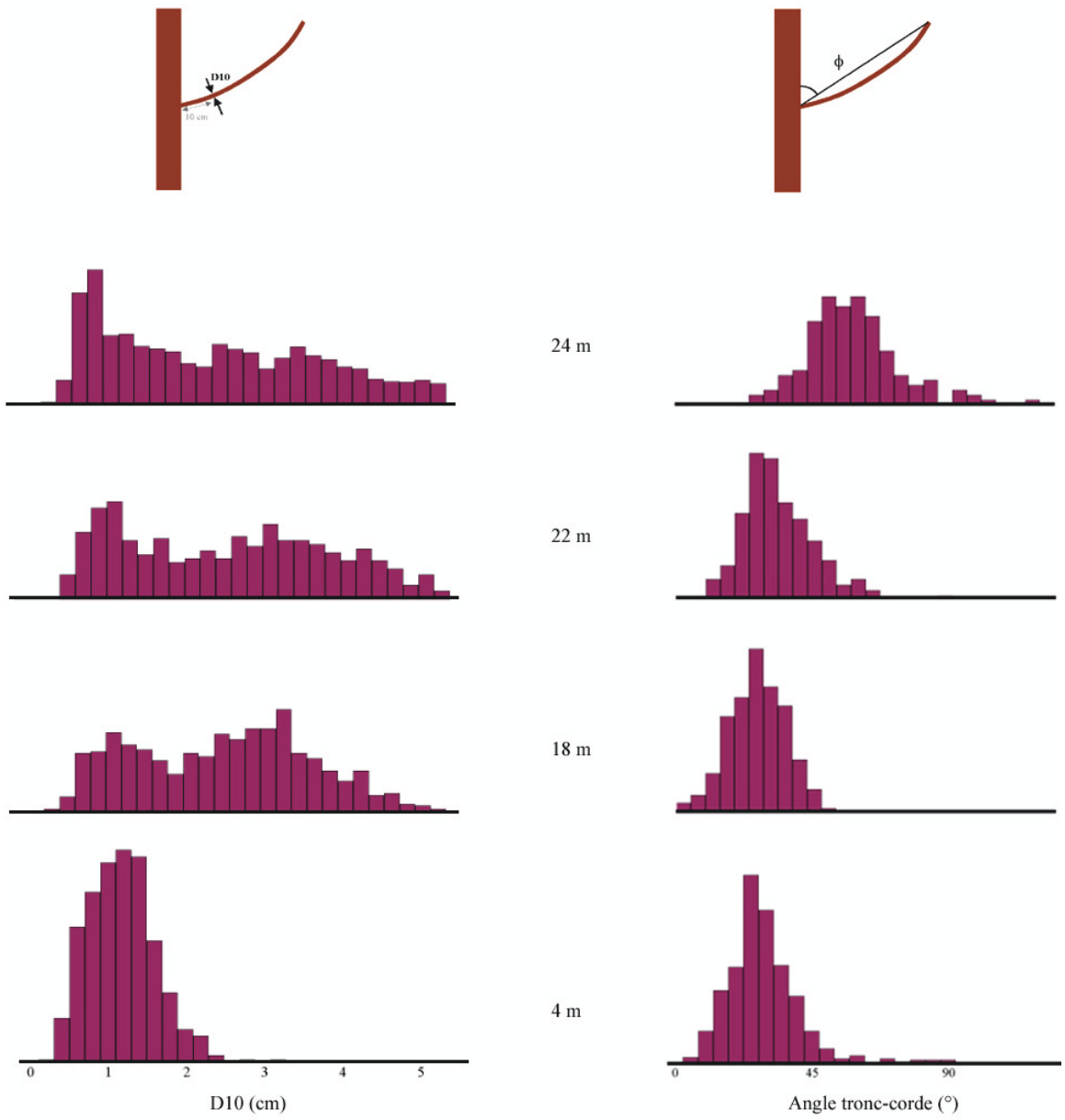

FIG. 2.41 – Sur quatre parcelles de pins de hauteurs différentes (4, 18, 22 et 24 m) : histogrammes de diamètres des branches primaires à 10 cm de l'insertion dans le tronc (à gauche) et histogrammes d'angles tronc-corde ϕ mesurés sur l'ensemble des peuplements (à droite). Ces mesures ont été fournies par I. Champion et A. Porté (INRA).

La seconde est l'apparition de structures sub-horizontales lors de la croissance des pins. La

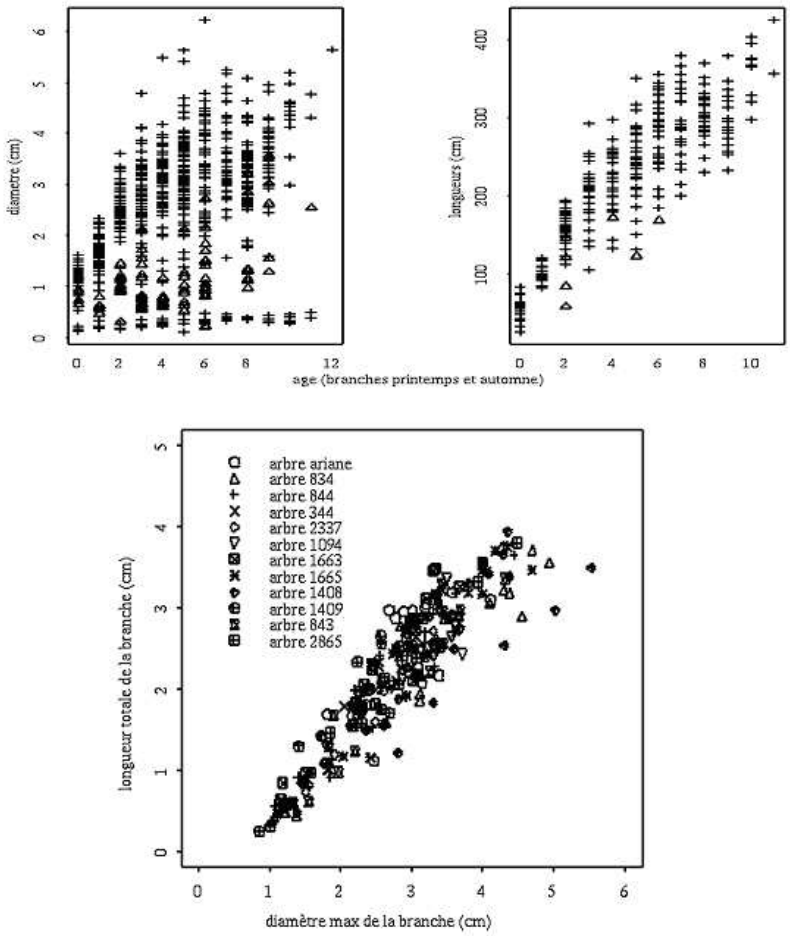

FIG. 2.42 – Mesures de diamètre et de longueur des branches de différents âges sur quelques pins d'une parcelle de 25 ans (Le Bray). Ces figures sont fournies par I. Champion (INRA) et proviennent de [Champion 95].

figure 2.41 présente les histogrammes des angles tronc-corde ϕ mesurés sur tous les pins d'une parcelle, pour quatre parcelles de tailles différentes, la corde étant définie par le segment qui relie les deux extrémités d'une branche. Il apparaît que les angles tronc-corde augmentent globalement sur les parcelles les plus hautes car, lors de la croissance du pin, les branches primaires les plus jeunes poussent verticalement au sommet de la canopée alors que les branches les plus vieilles, situées à la base de la couronne, s'écartent du tronc. Le diamètre des branches mesuré à 10 cm de l'embranchement augmente également avec leur âge. Ceci se traduit sur la figure 2.41 par un accroissement de la diversité des diamètres des branches. Notons que l'irrégularité de la distribution des diamètres est liée à l'apparition discontinue des jeunes branches (présence de plusieurs cycles morphogénétiques : polycyclisme). La figure 2.42 présente la relation linéaire entre la longueur et le diamètre des branches mesurées sur quelques peuplements d'une parcelle de 25 ans (Le Bray) dans le but d'illustrer la proportionnalité de ces deux paramètres [Champion 95]. Ces données structurales montrent que les parcelles les plus hautes sont constituées de pins dont

les branches les plus grosses et les plus longues, qui ne sont pas présentes sur les parcelles plus basses, sont plus écartées du tronc. Des structures sub-horizontales font donc leur apparition sur ces hautes parcelles et peuvent être responsable de l'élévation du centre de phase de la polarisation HH.

– **le canal HV**

La comparaison de deux jeux de données PolInSAR acquis avec des lignes de base temporelles différentes permet de mettre en évidence une sensibilité plus importante de ce canal polarimétrique à la décorrélation temporelle.

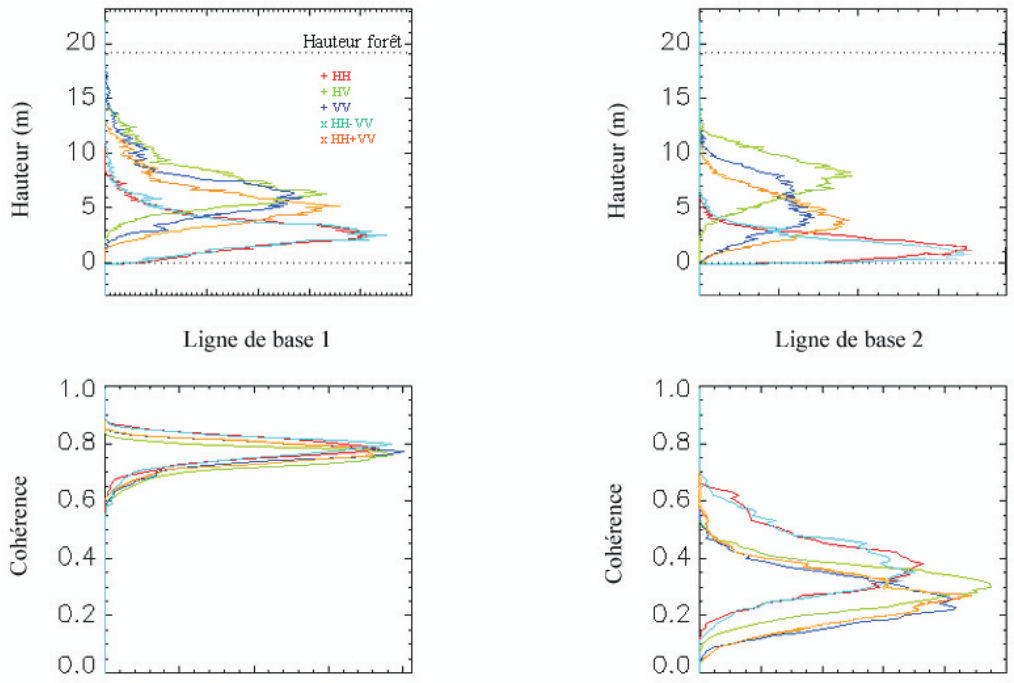

FIG. 2.43 – Hauteurs et cohérences des centres de phase polarimétriques estimés sur deux jeux de données correspondant à deux lignes de base spatiales et temporelles différentes.

La figure 2.43 montre que les hauteurs moyennes des centres de phase estimées sur les deux jeux de données sont comparables pour toutes les polarisations, sauf pour le canal HV où une diminution de 3 m est observée sur le premier jeu de données par rapport au second. Nous avons vu que la sensibilité d'un système interférométrique à la décorrélation de volume dépendait de la différence d'angle d'incidence des deux antennes interférométriques (relations 2.13 et 2.14), c'est pourquoi l'ordre de grandeur des cohérences diffère d'un jeu de données à l'autre, qui sont caractérisés par des lignes de base de longueurs différentes. Le classement des valeurs de cohérence des différents canaux polarimétriques estimées sur les deux jeux de données est également le même, à l'exception de la cohérence du canal HV. Effectivement, la cohérence du canal HV est inférieure aux cohérences des autres canaux polarimétriques sur le premier jeu de données, alors que cela n'est pas le cas sur le second.

Comme l'a illustré schématiquement la figure 2.24 de la partie 2.3.2.1 dans le contexte du modèle RVoG, la décorrélation temporelle de la canopée provoque une diminution de la hauteur du centre de phase des contributions caractérisées par un rapport des puissances du sol et du volume μ supérieur à zéro conjointement à une perte de cohérence. La décorrélation temporelle de la canopée, induite par le mouvement des aiguilles et des branches secondaires entre les deux acquisitions interférométriques, peut par conséquent expliquer le comportement de la cohérence interférométrique du canal HV observé sur le premier jeu de données.

L'utilisation de ces deux lignes de base montre qu'une forte contribution provenant de ces éléments structuraux de petite taille de la canopée est davantage présente dans le canal HV que dans le canal VV, dont la cohérence interférométrique demeure stable d'une ligne de base à l'autre car peu affectée par la décorrélation temporelle.

2.4.2.2 Inversion de la hauteur des parcelles

Quelle que soit la fréquence, l'inversion des paramètres physiques de la forêt avec des données PolInSAR nécessite un modèle représentant un compromis équitable entre la complexité de la scène imagée et le nombre d'observables. Comme il est exposé dans la partie 2.2.2.1, le modèle RVoG s'est avéré très efficace pour l'extraction de paramètres en bande L. En revanche, la partie 2.3.2 a montré en bande X que l'interaction entre les ondes radar et la canopée constituait une source de décorrélation qui devait être prise en compte pour estimer les paramètres physiques de la forêt avec le modèle RVoG à cette fréquence. La procédure d'inversion détaillée dans la partie 2.2.2.2 n'est pas non plus applicable directement sur des données PolInSAR en bande P pour plusieurs raisons. Premièrement, l'estimation du niveau du sol par régression linéaire de la cohérence interférométrique des différents canaux polarimétriques dans le plan complexe est biaisée si le volume est verticalement orienté et également si la cohérence du sol est inférieure à 1. Ensuite, en raison d'une forte pénétration des ondes dans le couvert végétal, la contribution du sol est présente dans tous les canaux polarimétriques et la cohérence interférométrique du volume, qui n'est directement mesurable dans aucun des canaux polarimétriques, doit donc être estimée.

Dans un premier temps, la validité de la modélisation cohérente de la forêt par un volume de particules reposant sur une surface de sol est évaluée en tenant compte de la structure des pins. Une inversion non biaisée est effectuée dans le cas où la décorrélation de volume est générée seulement par les branches qui forment la couronne, comme on l'a observé à plus haute fréquence, et dans le cas où elle est provient de l'interaction des ondes avec la forêt sur toute sa hauteur. Les résultats sont comparés aux mesures au sol afin de déterminer l'hypothèse la plus réaliste. Ensuite, deux méthodologies complémentaires, basées sur l'optimisation temps-fréquence, sont proposées afin de procéder à l'inversion de la hauteur des parcelles.

– **détermination des hypothèses pour la modélisation cohérente de la forêt**

La cohérence interférométrique estimée pour différents états de polarisation est représentée dans le plan complexe sur la figure 2.44, pour une parcelle de 12 m de hauteur (à gauche) et d'une parcelle de 19 m de hauteur (à droite), chaque point correspondant à une position spatiale de la fenêtre d'estimation glissante et chaque couleur à un état de polarisation. La position dans le plan

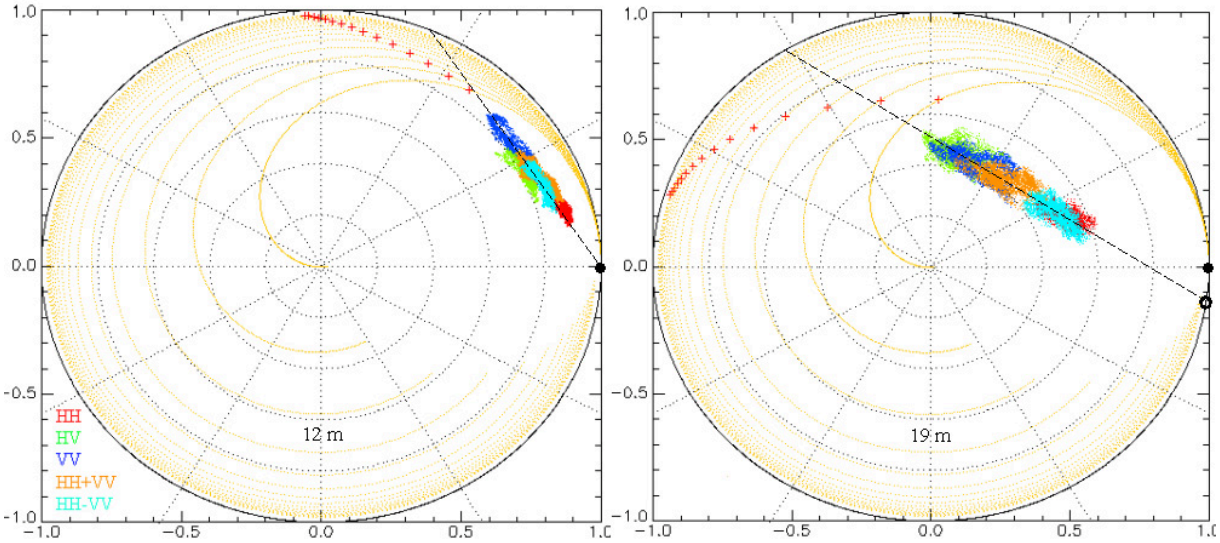

FIG. 2.44 – Représentation de la cohérence interférométrique associée à plusieurs canaux polarimétriques dans le plan complexe, calculée sur toutes les fenêtres spatiales d'une parcelle. La figure de gauche correspond à une parcelle de 12 m et celle de droite à une parcelle de 19 m.

complexe de la cohérence interférométrique d'un volume de particules orientées aléatoirement est représentée de couleur jaune. Sur chaque ligne associée à un coefficient d'extinction moyen variant de 0 à 1,5 dB/m, la hauteur du volume varie de 0 à 40 m. Les croix oranges localisent la position de la cohérence interférométrique d'un volume de particules orientées aléatoirement dont la hauteur est égale à celle de la parcelle, pour des valeurs de coefficient d'extinction moyen diminuant à mesure que les croix s'éloignent du cercle trigonométrique. Les phases interférométriques mesurées sont recalées par rapport à celle d'une surface de sol située à proximité des deux parcelles, qui est localisée sur la figure 2.44 par un point noir. Sur cette figure, les deux diagrammes représentatifs de l'ensemble des parcelles montrent que ni la contribution pure d'une canopée modélisée par un volume de particules orientées aléatoirement, ni la contribution pure du sol ne sont reçues, car les positions dans le plan complexe des cohérences interférométriques mesurées dans les différents canaux polarimétriques sont comprises entre les cohérences interférométriques de ces contributions pures (lignes jaunes et point noir). Néanmoins, la présence en bande P du mécanisme de double rebond dans la forêt et la réception d'une importante contribution du sol sont responsables d'une élongation importante de la région de cohérence dans le plan complexe. De plus, la cohérence interférométrique, dont les fluctuations spatiales sur toute la parcelle sont faibles, se positionne globalement de manière linéaire dans le plan complexe en fonction de la polarisation. Le diagramme de gauche de la figure 2.44 montre qu'une des intersections de la droite de régression linéaire de la cohérence interférométrique associée aux différents états de polarisation synthétisés et du cercle trigonométrique permet de retrouver la phase interférométrique du sol, comme dans le cas du modèle RVoG. Ceci indique que l'effet d'orientation, dont témoigne la position extrême du centre de phase du canal VV, peut être négligé sur les parcelles les plus basses. En revanche, le diagramme de droite montre qu'en utilisant la même procédure, la hauteur du sol est sous-estimée sur les plus hautes parcelles (cercle noir).

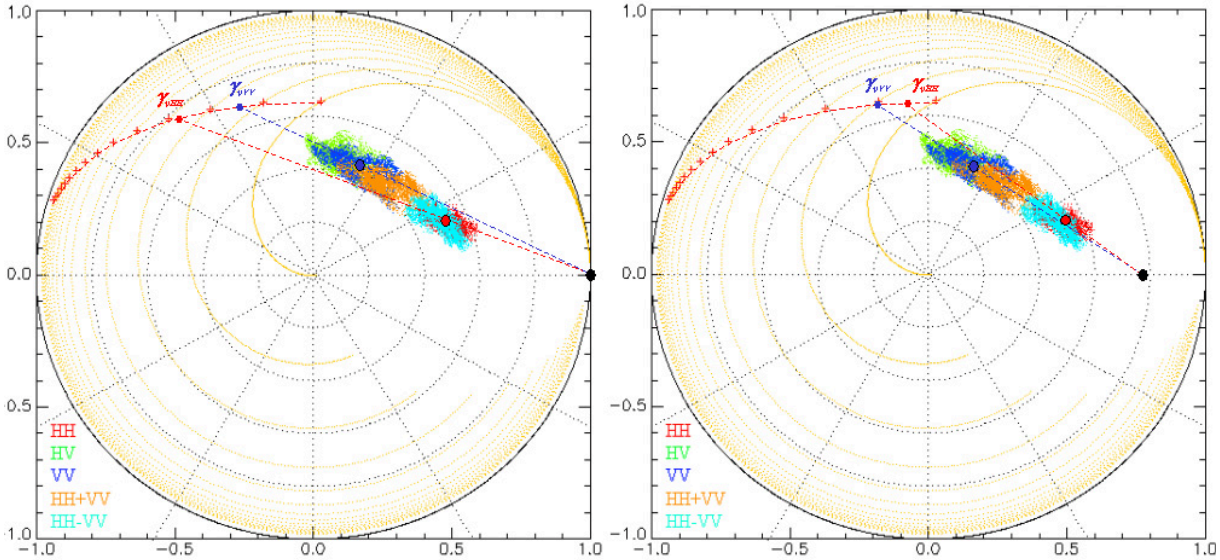

FIG. 2.45 – Illustration de la validité de la modélisation d'une parcelle de 19 m par un volume de particules verticalement orientées reposant sur une surface de sol dont la cohérence est inférieure à 1.

Considérons à présent le cas de la parcelle de 19 m de hauteur, représentative des parcelles les plus hautes. La figure 2.45 localise la cohérence interférométrique du volume associée aux polarisations HH et VV dans le cas où la cohérence du sol est égale à 1 (à gauche) et inférieure à 1 (à droite). La courbe orange définit la position de la cohérence interférométrique théorique d'un volume de particules de 19 m de hauteur pour plusieurs valeurs de coefficient d'extinction moyen dans le plan complexe, la valeur de ce paramètre étant plus élevée lorsque la cohérence interférométrique est proche du cercle trigonométrique. Pour chacune de ces deux polarisations, la position de la cohérence interférométrique du volume est déterminée par l'intersection de la droite qui relie la cohérence interférométrique du sol et le barycentre des cohérences interférométriques mesurées et de la courbe orange. Il apparaît que la cohérence du sol doit être inférieure à 1 pour que la position de la cohérence interférométrique du volume associée aux canaux HH et VV satisfasse les hypothèses d'un volume de particules orientées verticalement : $\sigma_{VV} > \sigma_{HH}$.

– **test de l'hypothèse du volume posé sur une surface de sol**

Avant de procéder à l'élaboration d'une méthodologie pour effectuer l'extraction de paramètres en bande P, l'hypothèse d'un volume de particules posé sur une surface de sol est testée sur les canaux polarimétriques qui contiennent la plus grande contribution de la canopée, c'est-à-dire pour lesquels le rapport des puissances du sol et du volume μ est le plus faible (canaux VV et HV). Pour ce faire, seules les parcelles qui jouxtent une surface nue sont considérées, afin de mesurer directement la hauteur du sol et par conséquent d'éliminer le biais de l'inversion lié à l'estimation de ce paramètre. Comme la cohérence interférométrique d'un signal résultant de la sommation cohérente des contributions du sol et du volume est située sur la droite qui relie les cohérences interférométriques de ces deux contributions pures (voir partie 2.2.2.1), la cohérence interférométrique estimée est extrapolée linéairement jusqu'à la cohérence interférométrique

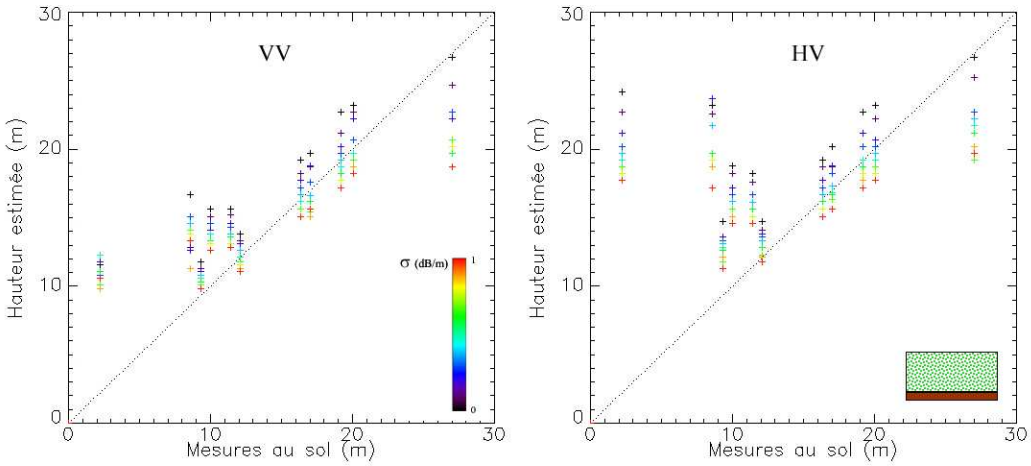

FIG. 2.46 – Estimation de la hauteur des parcelles à l'aide du modèle RVoG pour différentes valeurs du coefficient d'extinction moyen σ, à partir de la mesure de la phase interférométrique du sol sur une surface nue du proche voisinage et de la cohérence interférométrique du canal VV (à gauche) et HV (à droite).

théorique d'un volume de particules γ_v. La cohérence interférométrique du volume est simulée pour un intervalle de coefficients d'extinction moyens allant de 0 à 1 dB/m et pour différentes hauteurs. L'ensemble de solutions est alors constitué par les cohérences interférométriques γ_v théoriques situées sur la droite passant par la cohérence interférométrique mesurée et celle du sol dont la norme est supposée égale à 1. La figure 2.46 montre que pour les deux canaux polarimétriques VV et HV, la hauteur de la forêt est retrouvée sur les parcelles supérieures à 12 m. La qualité de l'interpolation linéaire est proportionnelle à la distance qui sépare la cohérence interférométrique mesurée de celle du sol dans le plan complexe. Plus cette distance est courte, comme c'est le cas des petites parcelles, plus le biais induit par une perte de cohérence, comme par exemple la décorrélation temporelle, sera important et se traduira par une surestimation de la hauteur des pins.
Les parcelles supérieures à 12 m montrent que l'hypothèse simple d'un volume de particules reposant sur une surface de sol suffit à décrire la forêt en bande P au regard des polarisations VV et HV. Dans les deux cas, le coefficient d'extinction moyen qui permet de retrouver la hauteur des parcelles est compris entre 0 et 0.7, ce qui est en accord avec des mesures de ce paramètre sur ce type de végétation en bande P [Brandfass 01]. Comme le montre la figure 2.3, il diminue avec la densité des arbres, lorsque la hauteur des parcelles augmente. Notons toutefois que ces valeurs de coefficient d'extinction moyen constituent une limite supérieure en raison de l'hypothèse d'une cohérence du sol égale à 1 utilisée pour effectuer cette analyse.

– **test de l'hypothèse du volume surélevé au dessus du sol**

A plus haute fréquence, la décorrélation de volume est essentiellement générée par les branches. L'épaisseur de la couronne des pins maritimes de la forêt de Nezer est inférieure à la moitié de la hauteur de la forêt, en moyenne sur tout l'intervalle des âges de la forêt, comme l'illustre la photographie de la figure 2.47. L'hypothèse des branches primaires comme seules responsables

FIG. 2.47 – Illustration de la proportion entre l'épaisseur de la couronne et la hauteur de la forêt sur une parcelle de pins de la forêt de Nezer.

de la décorrélation de volume peut être testée en bande P en modélisant la forêt par une couche de volume de particules surélevée par rapport au sol, comme il est représenté schématiquement sur la figure 2.48. La cohérence interférométrique de la somme cohérente des contributions du volume surélevé et du sol, associée à l'état de polarisation $\mathbf{w}$, s'exprime alors pour une configuration interférométrique définie par un angle d'incidence θ et un nombre d'onde vertical k_z donnés ainsi :

$$\begin{aligned}\gamma(\mathbf{w}) &= \frac{\gamma_v e^{jk_z(h_0-e_c)} + \mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})} e^{j\phi_0} \\ &= \left[\gamma_v e^{jk_z(h_0-e_c)} + \frac{\mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})}(1-\gamma_v e^{jk_z(h_0-e_c)})\right] e^{j\phi_0} \end{aligned} \tag{2.22}$$

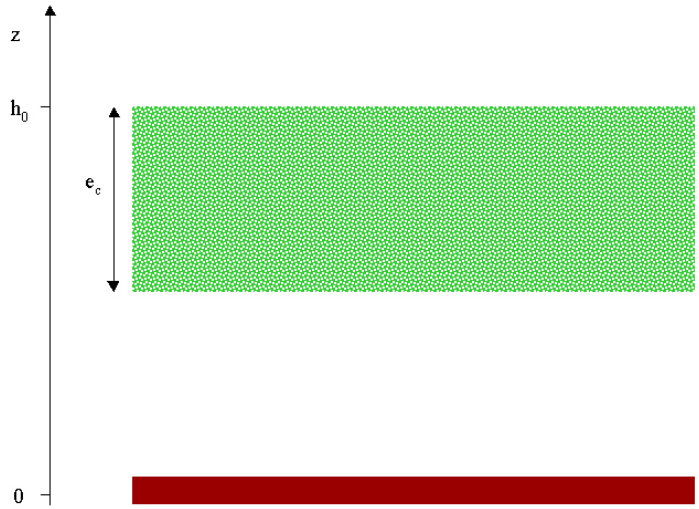

FIG. 2.48 – Représentation schématique d'un volume de particules orientées aléatoirement d'épaisseur e_c surélevé par rapport à une surface de sol.

où les paramètres structuraux h_0 et e_c sont respectivement la hauteur de la forêt et l'épaisseur de la couronne. μ est le rapport des puissances du sol et du volume qui prend en compte l'extinction σ des ondes radar dans le volume. La décorrélation de volume est moins importante que dans le cas du modèle RVoG, où elle est générée sur toute la hauteur de la forêt. La cohérence interférométrique du volume d'épaisseur e_c s'exprime de la sorte d'après 2.13 :

$$\gamma_v = \frac{2\sigma}{\cos\theta(e^{\frac{2\sigma e_c}{\cos\theta}} - 1)} \int_0^{e_c} e^{jk_z z} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}} dz \tag{2.23}$$

L'étude de l'évolution de la structure de la forêt au cours de la croissance des pins révèle une relation entre l'épaisseur moyenne de la couronne $\overline{e}_c$ et la hauteur moyenne de la forêt $\overline{h}_0$ représentée sur la figure 2.49 :

$$\overline{e}_c = 2,7 \ln \overline{h}_0 - 0,1 \tag{2.24}$$

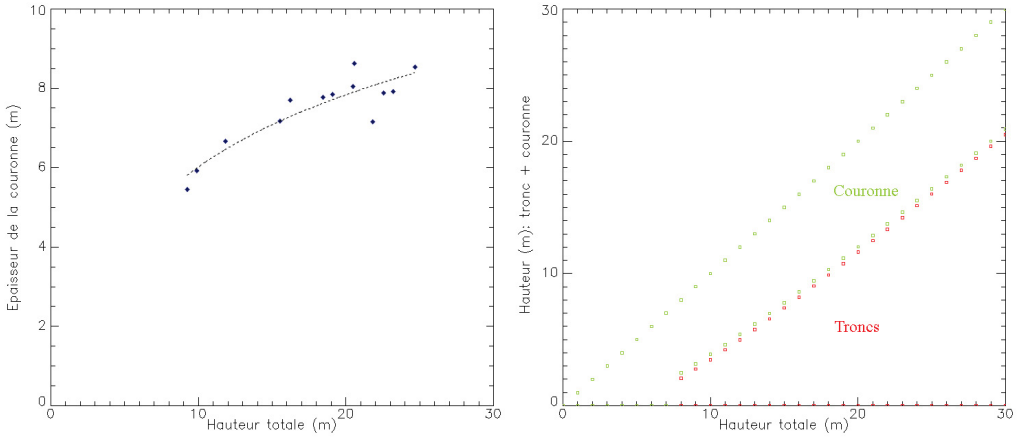

FIG. 2.49 – Croisement des mesures d'épaisseur de la couronne et de hauteur de la forêt fournies par I. Champion et A. Porté (INRA) (à gauche). Représentation de la structure de la forêt modélisée en fonction de la hauteur de la parcelle (à droite).

Dans le but d'évaluer l'inversion de la hauteur de la forêt avec ce modèle de manière réaliste, nous considérerons une couronne d'épaisseur variable comme le schématise la figure 2.49. L'extinction des ondes dans le volume est supposée nulle car la cohérence interférométrique γ_v est peu sensible à ce paramètre lorsque l'épaisseur du volume est faible comme nous l'avons vu dans la partie 2.2.2.2. L'inversion est effectuée sur les même parcelles que dans le cas précédent, où la hauteur du volume est supposée égale à celle de la forêt, en utilisant la phase interférométrique de la surface nue pour éliminer le biais lié à l'estimation de la hauteur du sol. La figure 2.50 montre que la hauteur des pins est sous-estimée dans le cas des deux canaux polarimétriques sur les parcelles supérieures à 12m, où la précision de l'inversion est satisfaisante.

La hauteur estimée avec ce type d'inversion étant biaisée vers des valeurs plus élevées à cause d'une cohérence du sol inférieure à 1, il apparaît clairement que le modèle du volume de particules surélevé au dessus d'une surface de sol n'est pas adapté à la forêt de Nezer en bande P. Cela signifie que la décorrélation de volume n'est pas générée qu'au niveau de la couronne

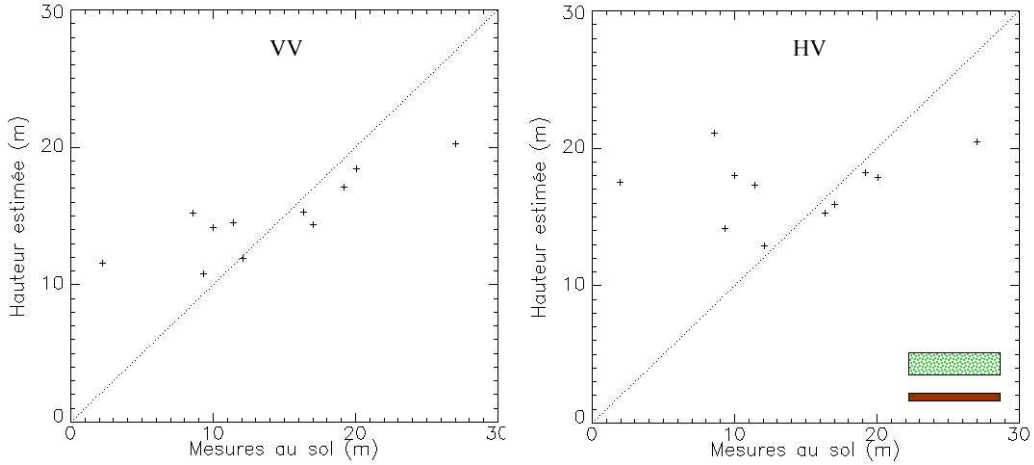

FIG. 2.50 – Estimation de la hauteur des parcelles à l'aide du modèle RVoG pour différentes valeurs du coefficient d'extinction moyen σ, à partir de la mesure de la phase interférométrique du sol sur une surface nue du proche voisinage et de la cohérence interférométrique du canal VV (à gauche) et HV (à droite).

mais aussi par les troncs sur l'ensemble de la forêt. Ce test valide donc l'hypothèse d'un volume de particules verticalement orientées de hauteur égale à celle de la forêt posé sur une surface de sol.

– **inversion de la hauteur de la forêt par optimisation temps-fréquence**

Afin d'extraire les paramètres physiques de la forêt en bande P à partir d'un jeu de données PolInSAR, la cohérence interférométrique du volume γ_v doit être estimée, à la différence de la bande L où on peut faire l'hypothèse que la contribution du volume seul est présente dans l'un des canaux polarimétriques. Il a été montré dans la partie 2.3.2 que la décomposition en sous-looks permettait de séparer les contributions du sol et de la canopée d'une forêt en bande X. En bande P, la variation maximale de l'angle de visée en azimut est bien supérieure (relation 1.16) et atteint 14° dans le cas de ce jeu de données. La stabilité de la phase interférométrique et de la cohérence des trois canaux polarimétriques calculée sur 5 sous-looks dont 3 sont indépendants, est vérifiée sur des trièdres et des surfaces nues, comme le montre la figure 2.51. La taille de la cellule de résolution est multipliée par 3 en azimut par rapport à la pleine résolution et reste la même en distance.

Contrairement aux surfaces nues, des variations de la cohérence et de la phase interférométrique parmi les différents sous-looks sont observées dans chaque canal polarimétrique sur toutes les parcelles de la forêt de Nezer. Cela signifie que le signal interférométrique est sensible aux changements de géométrie de la scène éclairée, occasionnés par l'importante variation de l'angle de visée en azimut de la bande P. La figure 2.51 illustre la sensibilité de la cohérence interférométrique à l'angle de visée dans le cas où celle-ci est calculée sur une zone de lisière de forêt, où les contributions du sol et de la canopée sont reçues sans atténuation, et sur une parcelle entière. Dans ces deux cas, il apparaît que le rapport des puissances du sol et du volume est fortement

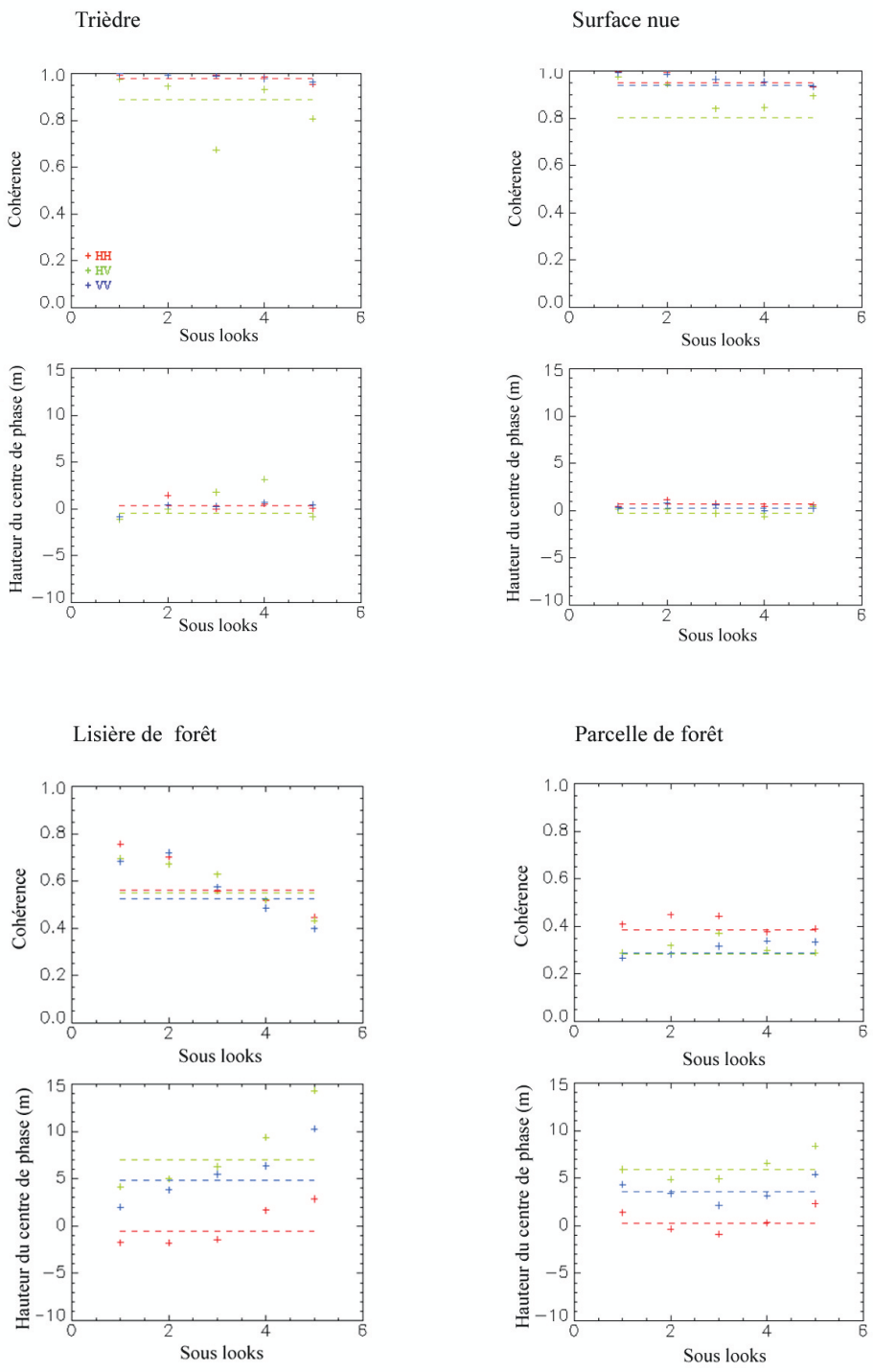

FIG. 2.51 – Cohérence et hauteur des centres de phase polarimétriques calculée sur 5 sous-looks, dont 3 sont indépendants, sur un trièdre et une surface nue (haut), une lisière de forêt et une parcelle entière (bas). Les pointillés indiquent la valeur du paramètre à pleine résolution.

variable d'un sous-look à l'autre, ce qui se traduit par une corrélation inverse entre la hauteur du centre de phase et la cohérence : la sélection d'une contribution plus importante de sol induit une diminution de la hauteur du centre de phase et une augmentation de la cohérence.

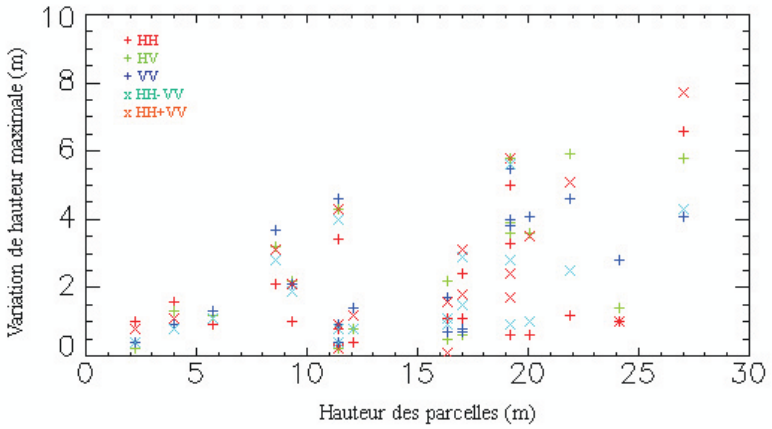

FIG. 2.52 – Variation maximale de la hauteur des centres de phase polarimétriques parmi 5 sous-looks, dont 3 sont indépendants, en fonction de la hauteur des parcelles.

Les parties 2.2.1 et 2.4.2.1 ont montré que chacun des paramètres structuraux de la forêt (DBH, densité d'arbres, orientation et longueur des branches) impliqué dans la structure globale de la forêt était fortement corrélé avec la hauteur des parcelles. La figure 2.52 représente l'amplitude de variation maximale de la hauteur des centres de phase polarimétriques entre les sous-looks, donc la mesure de la variabilité de leur hauteur lorsque l'angle de visée en azimut change, en fonction de la hauteur des parcelles. Une corrélation globale de ces deux paramètres pour toutes les polarisations indique que lorsque la hauteur de la forêt augmente, la hauteur des centres de phase polarimétriques devient plus sensible à l'angle de visée en azimut. C'est la hauteur du centre de phase associé à la polarisation VV qui présente la plus grande sensibilité aux variations de l'angle de visée. En effet, comme ce canal polarimétrique contient la plus forte contribution de la canopée, la sélection d'une contribution du sol plus cohérente provoque une diminution de hauteur du centre de phase plus importante que dans le cas des canaux polarimétriques caractérisés par un rapport des puissances du sol et du volume plus élevé, comme par exemple celui qui est associé à la polarisation HH.
La variabilité de la cohérence des différents canaux polarimétriques sur l'ensemble des parcelles est quant à elle comprise entre 0,1 et 0,2 en moyenne, et ne présente par contre aucune corrélation évidente avec la hauteur des parcelles. L'augmentation de la hauteur des pins ne suffit toutefois pas à caractériser totalement le comportement du signal interférométrique lorsque l'angle de visée change. La géométrie de la scène illuminée dépend encore de l'orientation des rangs et de la répartition spatiale des pins, ainsi que de l'hétérogénéité locale de la distribution des éléments de moindre échelle (branches, sous-bois...), dont la mesure au sol n'est pas accessible avec suffisamment de précision.

La décomposition en sous-looks permet, sur chaque fenêtre de cohérence, de sélectionner les contributions dont le rapport des puissances du sol et du volume est minimal et par conséquent d'accéder à une estimation de la cohérence du volume, nécessaire à l'extraction des paramètres

physiques de la forêt. Dans un premier temps, l'effet d'orientation observé sur la forêt en bande P est négligé dans le but de pouvoir utiliser le modèle RVoG pour estimer la hauteur de la forêt. Tous les états de polarisation sont synthétisés sur les sous-looks formés à partir des deux jeux de données polarimétriques afin de rechercher la polarisation associée au plus haut centre de phase parmi les différents sous-looks. La cohérence interférométrique associée à ce centre de phase est alors supposée être celle du volume de particules orientées aléatoirement. Les résultats

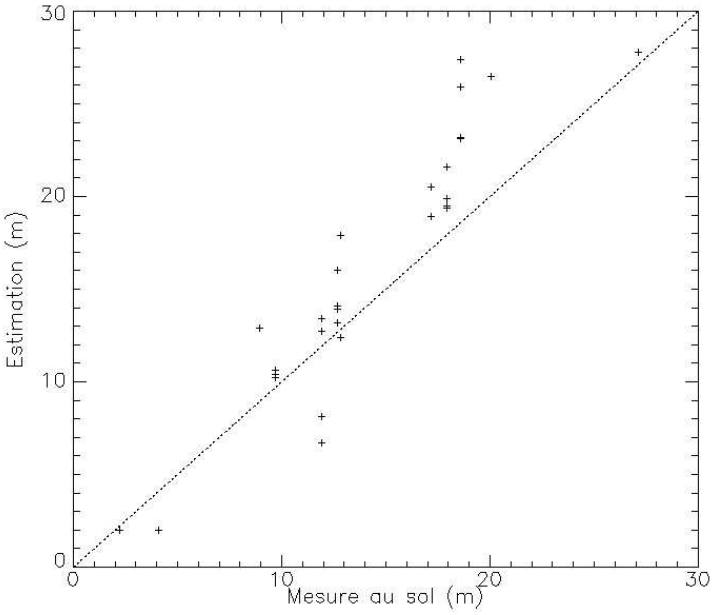

FIG. 2.53 – Résultat de l'inversion de la hauteur des parcelles en utilisant le modèle RVoG après optimisation temps-fréquence.

de l'inversion représentés sur la figure 2.53 montrent d'une part que la hauteur des pins est globalement surestimée, et d'autre part que cette surestimation augmente avec la hauteur. La figure 2.54 compare la hauteur du sol estimée avec le modèle RVoG et celle d'une surface de sol proche du point central de l'image car celui-ci est plat sur l'ensemble des données. Comme il est expliqué dans la partie 2.3.1.2, dans le cas d'un volume orienté posé sur une surface de sol (modèle OVoG), les cohérences interférométriques correspondant aux différents canaux polarimétriques ne se déplacent pas sur la même droite dans le plan complexe car le coefficient d'extinction dépend de la polarisation. L'effet d'orientation et une cohérence du sol inférieure à 1 dans la réalité sont responsables de la diminution de la hauteur estimée du sol avec le modèle RVoG, comme l'illustre la figure 2.44. Notons cependant que cinq parcelles de hauteurs comprises entre 17 et 18 m échappent à la tendance générale et sont représentées en rouge sur la figure 2.54. En effet, celles-ci sont situées sur la même zone en début de fauchée, où la hauteur d'ambiguïté est minimale ($Ha \simeq 21$ m). La figure 2.38 indique que les hauteurs des centres de phase les plus élevés sont supérieures à la moitié de la hauteur d'ambiguïté. Ceci se traduit dans le plan complexe par une phase interférométrique supérieure à π et donc par une surestimation systématique de la hauteur du sol avec le modèle RVoG. La représentation de la position de la cohérence interférométrique du volume dans le plan complexe (voir figure 2.10) montre une sensibilité de la hauteur du volume à sa phase interférométrique $\Delta h/\Delta\phi$ qui augmente avec la hauteur, ce qui explique l'importante surestimation de la hauteur de la forêt sur les parcelles

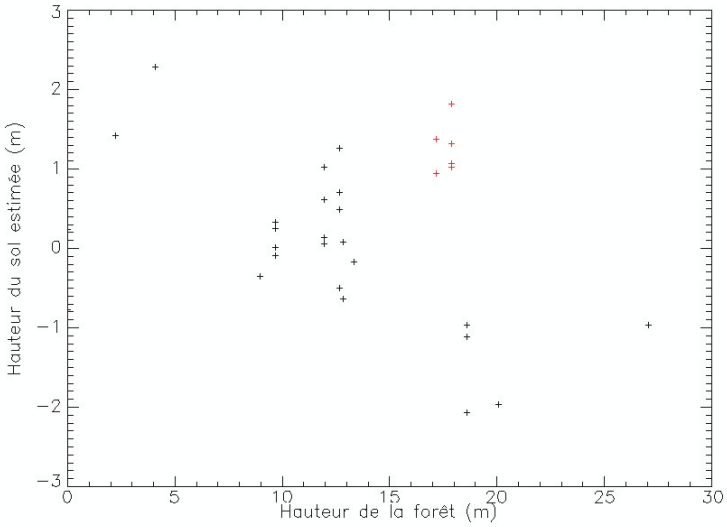

FIG. 2.54 – Différence entre la hauteur du sol estimée avec le modèle RVoG et la hauteur d'une parcelle de sol mesurée au centre des données.

hautes observée sur la figure 2.53.

L'analyse structurale de la partie précédente a montré que le canal HH recevait une importante contribution du sol sur les petites parcelles et que l'intensité de la contribution associée au mécanisme de double rebond généré au niveau du dièdre formé par le tronc et le sol augmentait avec la taille des parcelles. Afin de s'affranchir du biais lié à l'estimation de la hauteur du sol, la phase interférométrique de celui-ci peut donc être recherchée de la même manière que celle de la canopée, en faisant varier virtuellement l'angle de visée en azimut du radar et en sélectionnant le centre de phase polarimétrique dont la hauteur est la plus basse. D'après l'expression la plus générale de la cohérence interférométrique d'une somme cohérente de deux contributions donnée par la relation 2.9, celle d'un volume de particules aléatoirement orientées posé sur une surface de sol dont la cohérence est inférieure à 1 et égale à $|\gamma_s|$ devient :

$$\begin{aligned} \gamma(\mathbf{w}) &= \frac{\gamma_v + \mu(\mathbf{w})|\gamma_s|}{1+\mu(\mathbf{w})} e^{j\phi_0} \\ &= \left[\gamma_v + \frac{\mu(\mathbf{w})}{1+\mu(\mathbf{w})}(|\gamma_s| - \gamma_v)\right] e^{j\phi_0} \end{aligned} \tag{2.25}$$

L'intersection de la droite de régression et du cercle trigonométrique n'est dans ce cas plus égale à la phase interférométrique du sol.

La figure 2.55 révèle une meilleure corrélation des résultats de l'inversion avec les mesures au sol en utilisant ce modèle. Les croix bleues correspondent aux solutions obtenues numériquement d'après la méthode décrite dans la partie 2.2.2.2 sans que la cohérence interférométrique d'un volume de particules ne soit mesurée pour aucun des états de polarisation, signifiant que la décomposition en sous-looks ne permet pas d'isoler les contributions pures du sol et/ou du volume.

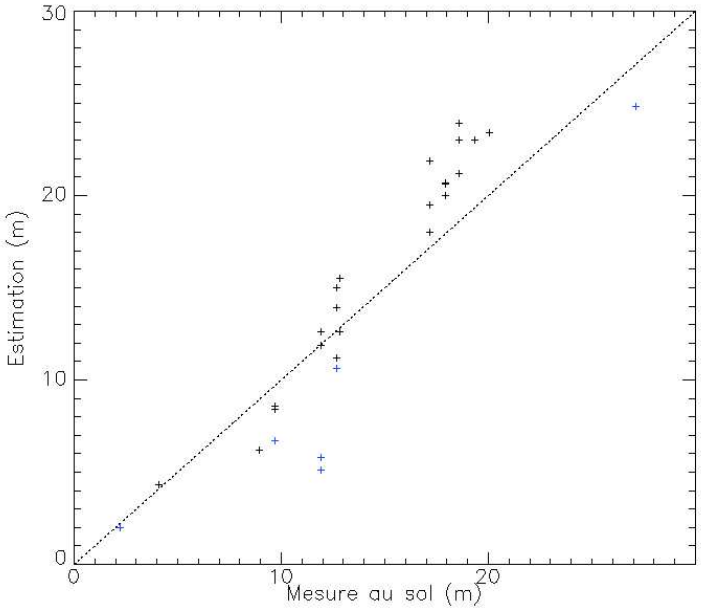

FIG. 2.55 – Inversion de la hauteur des parcelles après optimisation temps-fréquence des contributions du sol et de la canopée.

Alors que le modèle RVoG permet de mesurer la cohérence interférométrique du volume sur toute les parcelles, ce second modèle présente l'avantage d'une estimation non biaisée de la hauteur de la surface du sol sur la plupart des parcelles car ses performances sont indépendantes d'un effet d'orientation du volume et d'une cohérence du sol inférieure à 1. Il en résulte une surestimation de la hauteur des parcelles de 15 à 20 m moins importante. Cette surestimation résiduelle peut toutefois être expliquée par la présence de décorrélation temporelle ou parce que l'analyse temps-fréquence ne permet pas d'estimer la cohérence interférométrique des contributions pures du sol et/ou de la canopée.

2.5 Conclusion

L'analyse polarimétrique préliminaire des données a révélé qu'un mécanisme de rétrodiffusion de volume était prédominant dans la forêt, quelle que soit la fréquence. L'étude présentée dans ce chapitre a montré que l'hypothèse d'un volume de particules reposant sur une surface de sol impénétrable constituait un modèle réaliste et suffisamment simple pour permettre l'extraction des paramètres physiques de la forêt à partir de données PolInSAR à différentes fréquences.

La taille des rétrodiffuseurs étant de l'ordre de la longueur d'onde, l'information polarimétrique en bande X est étroitement liée à la densité du feuillage. De plus, la mesure des cohérences associées aux différents canaux polarimétriques a permis de rendre compte de la signature d'un volume verticalement orienté sur la végétation agricole de type "blé", témoignant d'une sensibilité à la structure verticale de ces cultures. L'étude préliminaire de la végétation en bande X a démontré que cette fréquence présentait un fort potentiel pour la discrimination et la classification des surfaces agricoles.
L'analyse PolInSAR en mode dual-pol d'une forêt de pins a permis de mesurer une différence

significative de hauteur des centres de phase polarimétriques, révélant une pénétration des ondes radar dans la canopée, et l'hypothèse d'un volume de particules orientées aléatoirement a été validée à cette fréquence. Cependant, à la différence de la bande L, l'extraction de paramètres avec le modèle RVoG en bande X nécessite la correction de la décorrélation du signal interférométrique par la "rugosité" de la canopée, ce qui implique une connaissance a priori du coefficient d'extinction moyen des ondes dans la canopée, estimée à 1,6 dB/m. Du fait d'une faible sensibilité de la méthode d'inversion à ce coefficient lorsqu'il prend des valeurs élevées, la hauteur de la forêt est retrouvée avec une précision de 5% pour une erreur de 30% faite sur ce paramètre.
De même que pour l'étude des bâtiments présentée dans le premier chapitre, une analyse temps-fréquence de la forêt permet une meilleure séparation des contributions du sol et de la canopée et par conséquent une amélioration de la qualité de l'inversion. La différence entre la hauteur du centre de phase de la contribution de la canopée (canal HV) et celle du sol estimée par le modèle RVoG conduit à une sous-estimation de la hauteur moyenne de la forêt de seulement 2 m, ce qui donne une estimation de la profondeur de pénétration dans le feuillage de la bande X en meilleur accord avec des travaux antérieurs. Cette analyse a également permis d'estimer une valeur plus réaliste du coefficient d'extinction moyen d'une forêt de pins en bande X (2 dB/m). Cette étude présente des résultats encourageants pour les acquisitions éventuelles de données sur la végétation par le système TerraSAR-X et la constellation TandemX-SAR [Moreira 04].

La profondeur de pénétration des ondes radar dans la canopée est plus importante en bande P qu'à plus haute fréquence. L'étude radiométrique de données acquises sur une forêt constituée de parcelles de hauteurs variables a permis de vérifier une plus grande dépendance du σ_0 associé au canal HV à la biomasse à cette fréquence qu'en bande L. Mais la caractérisation des mécanismes de rétrodiffusion par analyse polarimétrique a principalement mis en évidence une relation linéaire entre la hauteur des parcelles et l'anisotropie polarimétrique, qui permet de restituer la hauteur de la forêt avec une précision en moyenne inférieure à 2 m. Ce paramètre polarimétrique apparaît être le plus robuste pour l'estimation de la biomasse, car ses performances sont indépendantes de la hauteur des parcelles, aucune saturation n'étant observée sur les parcelles de biomasses plus élevées.
L'analyse PolInSAR a montré une forte dispersion verticale des centres de phase polarimétriques due à une profondeur de pénétration importante en bande P d'une part et à une forte diversité des rapports de puissance des contributions du sol et de la canopée dans les différents canaux polarimétriques d'autre part. Tout d'abord, la confrontation des mesures de l'évolution structurale des parcelles au cours de la croissance des pins et de la réorganisation verticale des centres de phase polarimétriques associés aux mécanismes de rétrodiffusion élémentaires a conduit à l'identification des rétrodiffuseurs correspondants. La modélisation de l'ensemble de la forêt par un volume de particules orientées verticalement posé sur une surface de sol a été ensuite validée à partir d'une estimation non biaisée de la hauteur du sol. Cependant, la contribution du sol est présente dans tous les canaux polarimétriques en raison de l'importante profondeur de pénétration des ondes dans la canopée en bande P. L'optimisation temps-fréquence est alors nécessaire pour estimer la contribution de la canopée, de la même manière qu'en bande X, et la contribution du sol pour éliminer le biais de l'extraction de paramètres lié à l'effet d'orientation observé sur les hautes parcelles et à l'hypothèse d'une cohérence du sol inférieure à 1. La qualité des résultats obtenus est accrue mais, sur les parcelles les plus hautes, la décomposition en sous-looks n'a pas toujours permis de séparer complètement des contribution du sol et de la canopée. Cette fréquence semble donc présenter également un fort potentiel pour l'étude des forêts possédant une biomasse plus élevée (forêts tropicales).

Cette étude multi-fréquentielle a montré que les bandes X et P étaient très complémentaires. En effet, une analyse temps-fréquence de données acquises par un système radar équipé d'antennes associées à ces deux fréquences [Hensley 01] peut améliorer considérablement les performances de l'estimation de la hauteur de la forêt grâce à une élongation de la région de cohérence dans le plan complexe.

Chapitre 3

Transposition aux conditions spatiales

Dans ce chapitre, la robustesse des méthodes d'inversion décrites précédemment est testée en fonction des paramètres système qui diffèrent le plus entre l'aéroporté et le spatial : le SNR et la résolution. En conditions spatiales, la puissance reçue est inférieure au cas aéroporté du fait de l'augmentation de la distance avec la cible et les résolutions vont généralement du mètre à quelques mètres, voire plusieurs dizaines de mètres.

Les conséquences de la diminution du SNR sur l'information polarimétrique et l'information PolInSAR sont dans un premier temps évaluées. Tout d'abord, la détérioration de la corrélation entre l'anisotropie polarimétrique et la biomasse sur les données aéroportées acquises sur la forêt de Nezer en bande P est analysée lorsque le niveau du bruit thermique augmente pour simuler les conditions spatiales. Ensuite, l'effet de l'ajout du bruit thermique sur la cohérence interférométrique est étudiée à l'aide de simulations numériques. Puis le biais généré par cette décorrélation sur l'inversion de la hauteur de la forêt avec la technique PolInSAR est quantifié pour deux coefficients d'extinction moyens correspondant aux bornes du spectre des fréquences utilisées pour des applications forestières : 0,5 dB/m (bande P) et 2 dB/m (bande X).

L'effet de la dégradation de la résolution sur l'anisotropie polarimétrique en bande P, ainsi que sur l'information PolInSAR à différentes fréquences est ensuite mesuré pour des tailles de cellules de résolution comparables allant de 3 à 15 m sur des zones de forêt pour évaluer dans chaque cas la robustesse de l'estimation de la biomasse. L'augmentation de la taille de la cellule de résolution et le filtrage du spectre fréquentiel des images SAR sont quantifiés de manières indépendantes pour identifier l'effet prédominant et accéder ainsi à une information sur la disposition spatiale des rétrodiffuseurs dans la canopée à chacune de ces fréquences. De même que dans le cas du bruit thermique, les conséquences du biais généré par une basse résolution sur l'estimation de la hauteur de la forêt sont ensuite analysées.

Enfin, pour compléter cette analyse des paramètres système, le rôle de la fréquence pour l'estimation de la biomasse est discuté. Les caractéristiques de l'information polarimétrique et de l'information PolInSAR déduites des études précédentes sont comparées à différentes fréquences afin d'identifier plus précisément les rétrodiffuseurs dans la forêt pour chacune de ces fréquences.

3.1 Le bruit thermique

3.1.1 Description du phénomène

Au dessus du zéro absolu, l'agitation thermique des particules est à l'origine d'une tension de bruit qui apparaît sur toute résistance. Le bruit thermique se traduit par une tension moyenne efficace $\overline{b_{eff}^2}$ qui s'exprime ainsi d'après la relation de Nyquist-Johnson :

$$\overline{b_{eff}^2} = 4kTR\Delta f \tag{3.1}$$

k est la constante de Boltzmann ($1,3810^{-23}$ J/K), T est la température (en K), R est la résistance (en Ω) et Δf est la bande passante du système à l'entrée duquel la résistance bruyante est branchée (en Hz).
Ce bruit est de valeur moyenne nulle et possède une densité spectrale qui ne dépend que de la résistance R et de la température T :

$$S(f) = \frac{\overline{b_{eff}^2}}{\Delta f} = 4kTR \tag{3.2}$$

Sa puissance totale (en W) obtenue dans une résistance constante est égale à :

$$P = kT\Delta f \tag{3.3}$$

Le spectre de densité de puissance est constant à l'intérieur de la bande passante utile du système Δf :

$$B(f) = B_0 \text{ avec } B_0 = \frac{1}{2}kT \tag{3.4}$$

C'est pourquoi le bruit thermique est assimilé à un bruit blanc, dont la fonction d'autocorrélation temporelle caractéristique est une impulsion de Dirac centrée sur 0. D'après le théorème central limite, comme ce bruit résulte de la somme d'un grand nombre de processus aléatoires décrits par des lois de distribution quelconques ayant chacun une faible amplitude devant leur somme, il suit une loi gaussienne.

Il s'agit d'un bruit additif dont les parties réelles et imaginaires sont caractérisées par des lois normales indépendantes :

$$z = x + iy \text{ avec } P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \text{ et } P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \tag{3.5}$$

où σ est l'écart-type de la distribution.

En pratique, après calibration radiométrique des images SAR, l'intensité du bruit thermique est estimée par excès par la mesure du σ_0 sur les zones d'ombre, c'est-à-dire là où l'intensité du signal rétrodiffusé est supposée être celle du bruit, ce qui permet de définir le $NE\sigma_0$ (Noise Equivalent σ_0) du système radar qui a acquis ces données.

Dans le contexte du radar SAR, l'expression du rapport signal à bruit est donnée par la relation [Curlander 91] :

$$SNR = \frac{\overline{P}G^2\lambda^3\sigma_0\delta_{Di}}{2(4\pi R^3)V_pFkT} \tag{3.6}$$

pour un système caractérisé par une puissance moyenne d'émission $\overline{P}$, un gain d'antenne G, une résolution en distance δ_{Di}, embarqué sur une plate-forme évoluant à une vitesse V_p située à une distance R de la cible. F est un facteur de bruit et λ est la longueur d'onde du rayonnement émis. Pour un système donné, comme la puissance du bruit augmente avec la bande passante, le SNR est proportionnel à la taille de la cellule de résolution. Mais comme l'indique la relation 3.6, c'est la distance antenne-cible qui est le paramètre principalement responsable de la différence de SNR entre les acquisitions aéroportées et spatiales.

3.1.2 Impact sur l'anisotropie polarimétrique en bande P

Des études antérieures ont porté sur l'effet du bruit thermique sur l'information polarimétrique et plus particulièrement sur la cohérence polarimétrique [Dubois-Fernandez 92b], [Freeman 93]. Dans cette partie, c'est sur l'anisotropie polarimétrique en bande P que les effets du bruit thermique sont mesurés car l'analyse de la végétation à cette fréquence, exposée dans le chapitre précédent, a révélé une forte corrélation entre la biomasse et ce paramètre. Afin de prédire la fiabilité de l'estimation de la biomasse à l'aide de l'anisotropie polarimétrique en conditions spatiales, un bruit blanc gaussien est ajouté sur le jeu de données polarimétriques aéroportées acquises sur la forêt de Nezer à cette fréquence, et l'analyse polarimétrique des différentes parcelles de forêt est reproduite pour chaque niveau de bruit simulé.

Le bruit affectant un canal correspondant à la polarisation XY possède les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} < n_{XY} > &= 0 \\ < n_{XY}n^*_{XY} > &= \nu_{XY} \end{aligned} \tag{3.7}$$

où ν_{XY} est sa puissance.

Les bruits affectant deux canaux polarimétriques XY et VW indépendants sont totalement décorrélés :

$$< n_{XY}n^*_{VW} > \;=\; 0 \quad \text{si X} \neq \text{V ou Y} \neq \text{W} \tag{3.8}$$

L'hypothèse que la puissance du bruit est équivalente dans tous les canaux polarimétriques est faite ($\nu_{HH} = \nu_{HV} = \nu_{VV}$) et un bruit de puissance ν est additionné à l'ensemble du jeu de données polarimétriques. La matrice de cohérence polarimétrique du bruit est diagonale par définition :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \nu & 0 & 0 \\ 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

et les trois valeurs propres de cette matrice sont égales : $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \nu$. Une entropie égale à 1 et une anisotropie nulle du bruit représentent les valeurs limites de ces paramètres lorsque le

SNR du signal SAR décroît. La matrice de rétrodiffusion d'un jeu de données polarimétriques bruité s'exprime quant à elle ainsi :

$$M = S + N = \begin{bmatrix} s_{HH} + n_{HH} & s_{HV} + n_{HV} \\ s_{VH} + n_{VH} & s_{VV} + n_{VV} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

s_{XY} et n_{XY} étant les coefficients de rétrodiffusion du signal et du bruit mesurés dans le canal polarimétrique XY, le signal n'étant pas corrélé au bruit quel que soit le canal polarimétrique :

$$< s_{XY} n^*_{VW} > \quad = \quad 0 \quad \text{pour tout X, V, Y et W} \tag{3.11}$$

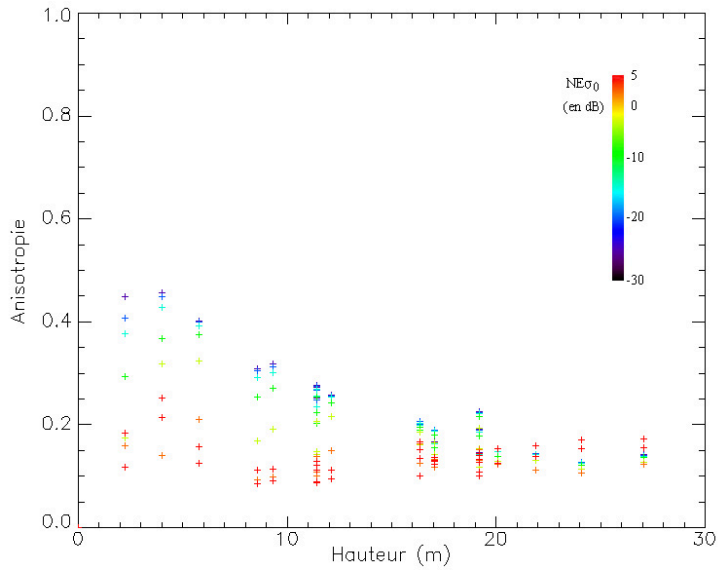

FIG. 3.1 – Moyenne sur chaque parcelle de l'anisotropie calculée sur une fenêtre 25x25 en fonction de leur hauteur, pour des valeurs de $NE\sigma_0$ allant de -30 à 5 dB.

La figure 3.1 représente l'anisotropie calculée sur une fenêtre 25x25 et moyennée sur chaque parcelle en fonction de leur hauteur pour différentes valeurs de $NE\sigma_0$. Les niveaux de bruit selon lesquels le jeu de données polarimétriques est successivement bruité varient de -30 dB, ce qui est de l'ordre du $NE\sigma_0$ du système RAMSES, à 5 dB, où le bruit est largement prépondérant par rapport au signal. Il apparaît que la sensibilité de l'anisotropie polarimétrique à la biomasse décroît graduellement jusqu'à devenir critique quand le $NE\sigma_0$ atteint -15 dB. Au-delà de cette valeur, l'anisotropie tend vers une faible valeur constante sur toutes les parcelles.

Cette étude permet de conclure, dans le cas de la forêt de Nezer, que la dégradation de la corrélation entre l'anisotropie polarimétrique et la hauteur des parcelles ne devient importante que pour les valeurs de $NE\sigma_0$ supérieures à -15 dB. Au-dessous de cette valeur, la diminution du SNR des signaux acquis par une plate-forme spatiale altère peu le potentiel de la polarimétrie radar pour l'estimation de la biomasse en bande P.

3.1.3 Effet du SNR sur la cohérence interférométrique

L'impact du bruit thermique sur le signal interférométrique est quantifié à partir de simulations de signaux bruités. Pour ce faire, un ensemble d'échantillons s_k d'un signal complexe unitaire synthétique est généré. Pour des raisons de temps de calcul, la cohérence interférométrique est calculée entre ce signal synthétique et la somme de celui-ci avec un signal complexe aléatoire b_k sur une fenêtre glissante de taille N :

$$\gamma_{SNR} = \frac{\sum_{k=1}^{N} s_k (s_k + b_k)^*}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N} |s_k|^2 \sum_{k=1}^{N} |s_k + b_k|^2}} \tag{3.12}$$

La moyenne de la norme de la cohérence interférométrique $|\gamma_{SNR}|$ calculée sur l'ensemble des fenêtres de taille N est représentée en traits pleins sur la figure 3.2 en fonction du SNR pour plusieurs tailles de fenêtre. La courbe en pointillés correspond à l'estimation théorique de la norme de la cohérence interférométrique $|\gamma_{SNR}|$ calculée sur tous les échantillons, qui s'exprime ainsi en fonction du SNR :

$$\begin{aligned} |\gamma_{SNR}| &= \frac{|s|^2}{\sqrt{|s|^2(|s|^2 + |b|^2)}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{SNR}}} \end{aligned} \tag{3.13}$$

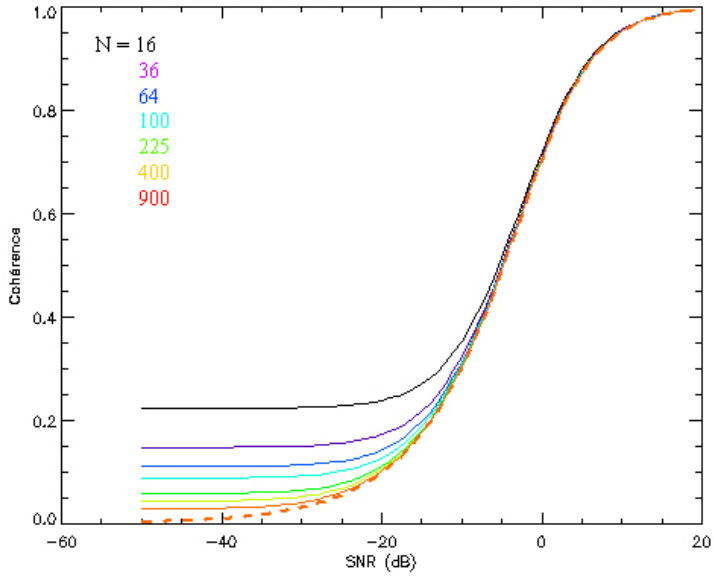

FIG. 3.2 – Norme de la cohérence interférométrique γ_{SNR} en fonction du SNR pour différentes tailles de fenêtre calculée à partir de simulations numériques (traits pleins) et d'un ajustement théorique de la relation 3.13 (pointillés).

La figure 3.2 montre que la cohérence est biaisée lorsque le SNR est faible, quelle que soit la taille de la fenêtre d'estimation. Pour une valeur de SNR donnée, la surestimation de la

cohérence est d'autant plus importante que le nombre d'échantillons indépendants utilisés est faible, ce biais apparaissant dès que le SNR des signaux interférométriques devient inférieur à -5 dB dans le cas d'une fenêtre de 4x4 pixels.

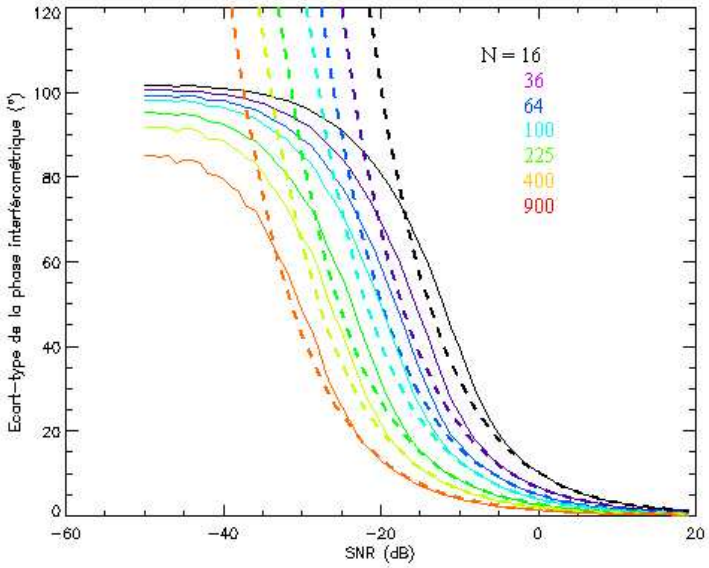

FIG. 3.3 – Écart-type de la phase de la cohérence interférométrique γ_{SNR} en fonction du SNR pour différentes tailles de fenêtre calculé à partir de simulations numériques (traits pleins) et ajustement théorique obtenu en combinant la relation 1.42 et la relation 3.13 (pointillés).

La figure 3.3 représente en traits pleins l'écart-type σ_Φ de la phase de la cohérence interférométrique calculée à partir des simulations numériques pour plusieurs tailles de fenêtre d'estimation en fonction du SNR. La précision de l'estimation de la phase de la cohérence interférométrique décroît avec la cohérence, donc avec le SNR, et son écart-type tend vers celui d'une distribution uniforme lorsque le SNR est dégradé ($\sigma_\Phi = \pi/\sqrt{3}$). Les courbes en pointillés sont un ajustement obtenu en combinant la relation 1.6 et la relation 3.13 :

$$\sigma_\Phi = \frac{1}{\sqrt{2N\ SNR}} \tag{3.14}$$

Son domaine de validité est le même que celui de la relation 3.13 : l'écart-type de la phase de la cohérence interférométrique estimée sur une fenêtre 4x4 est par exemple sous-estimé pour des valeurs de SNR inférieures à -5 dB.

L'influence du bruit thermique sur la précision de l'estimation de la phase de la cohérence interférométrique va maintenant être extrapolée au cas réaliste où les deux signaux interférométriques sont reçus dans deux canaux différents affectés chacun d'un bruit thermique indépendant. La norme de la cohérence interférométrique de deux signaux bruités indépendamment en fonction du SNR prédite par la relation 1.46 et représentée sur la partie gauche de la figure 3.4 est décalée vers des valeurs plus basses que dans le cas précédent. L'écart-type de la phase de la cohérence

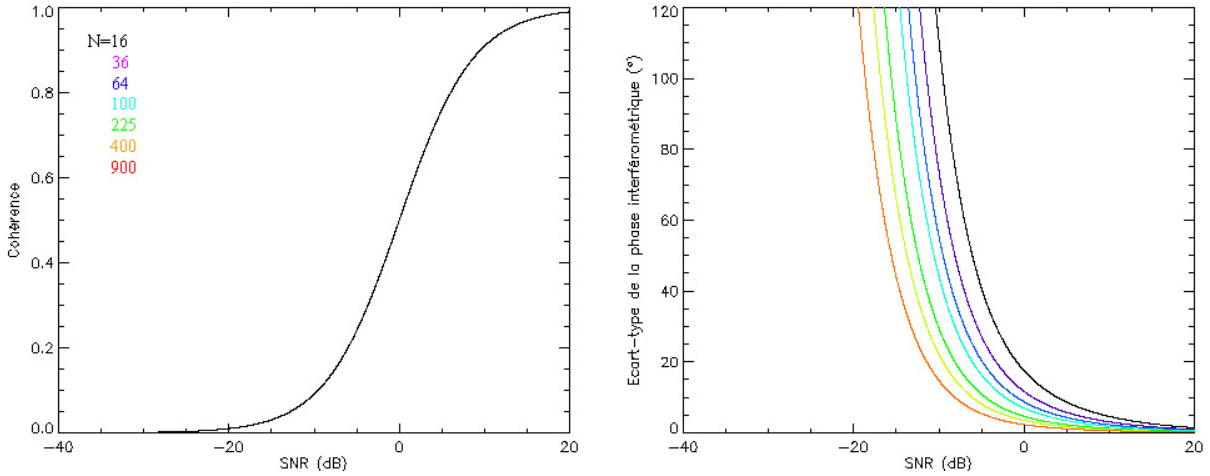

FIG. 3.4 – Norme et écart-type de γ_{SNR} calculés dans le cas de deux signaux affectés chacun d'un bruit thermique indépendant pour plusieurs tailles de fenêtre.

interférométrique peut être estimé de manière théorique en combinant les relations 1.46 et 1.42 :

$$\sigma_\Phi = \frac{1}{SNR}\sqrt{\frac{2\,SNR+1}{2N}} \tag{3.15}$$

La précision de l'estimation de la phase de la cohérence interférométrique représentée sur la partie droite de la figure 3.4 est par conséquent diminuée, comparé au cas représenté sur la figure 3.14, quelle que soit la valeur du SNR du signal interférométrique.

3.1.4 Biais sur l'extraction de paramètres

L'extraction des paramètres physiques de la forêt avec des données aéroportées à différentes fréquences, présentée dans le chapitre précédent, a révélé un fort potentiel de la technique PolInSAR pour l'estimation de la biomasse. En conditions spatiales, la perte de cohérence causée par la diminution du SNR a pour effet d'induire un biais sur ce type d'inversion. Quelle que soit la fréquence, la méthodologie adaptée utilise l'hypothèse que la contribution du volume est contenue en bande L dans un canal polarimétrique et en bandes X et P dans le sous-look d'un canal polarimétrique. L'impact de la perte de cohérence du volume induite par une diminution du SNR est évaluée sur l'estimation de la hauteur en fonction de la hauteur du volume sur la figure 3.5.

La région noire située en bas à gauche de chaque diagramme correspond au cas où la cohérence d'un volume de particules orientées aléatoirement, caractérisé par un coefficient d'extinction moyen égal à 0,5 dB/m à gauche et 2 dB/m à droite, devient inférieure à celle d'un volume de particules dans lequel l'extinction des ondes est nulle, c'est-à-dire où la décorrélation de volume est maximale. La figure 3.5 montre que le biais généré par une diminution du SNR est plus important lorsque l'extinction du volume est élevée, et qu'il diminue à mesure que la hauteur des parcelles augmente quelle que soit la valeur du coefficient d'extinction moyen.

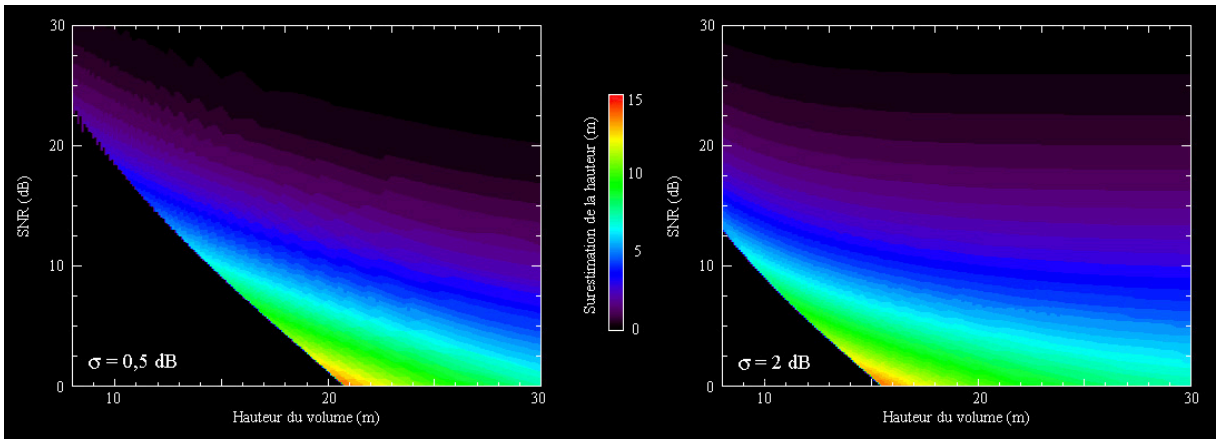

FIG. 3.5 – Surestimation de la hauteur du volume en fonction du SNR dans le cas d'un volume de particules aléatoirement orientées de hauteur allant de 0 à 30 m associé à un coefficient d'extinction moyen égal à 0,5 dB/m (à droite) et 2 dB/m (à gauche).

Le SNR mesuré sur des surfaces forestières en conditions spatiales définies par un $NE\sigma_0$ compris entre -20 dB et -15 dB, supérieur au cas aéroporté ($NE\sigma_0 \simeq -30\ dB$), est de l'ordre de 10 dB [Ulaby 43]. La figure 3.5 montre qu'un tel SNR induit une surestimation de 3 et 5 m sur les parcelles de 20 m de hauteur pour des coefficients d'extinction moyens respectivement égaux à 0,5 et 2 dB/m. Cependant, la perte de cohérence qui affecte tous les canaux polarimétriques induit également une sous-estimation de la hauteur du sol, dans le cas d'une inversion avec le modèle RVoG, et par conséquent une surestimation de la hauteur du volume. La surestimation de 5 m prédite en bande X (caractérisée par un coefficient d'extinction moyen de 2 dB/m) sur la hauteur d'une forêt de 20 m de hauteur constitue alors une valeur minimale car elle ne prend pas en compte le biais associé à l'estimation de la hauteur du sol. La surestimation de 3 m attendue en bande P (σ = 0,5 dB/m) est en revanche très réaliste car la décorrélation liée au SNR ne modifie pas la valeur moyenne de la phase interférométrique de la contribution qui est extraite par analyse temps-fréquence pour estimer la hauteur du sol (elle augmente seulement son écart-type).
En conclusion, il apparaît que l'extraction de paramètres est plus robuste en bande P et que le biais généré par la diminution du SNR en conditions spatiales augmente avec la fréquence. Il ne faut pas oublier que lorsque le degré de qualité des données est connu précisément, il est possible de corriger l'effet associé au SNR.

3.2 La résolution

3.2.1 Dégradation de la résolution : méthodologie

Comme il est mentionné dans le chapitre 1.2, la taille de la cellule de résolution d'une image SAR est proportionnelle à l'inverse de la bande passante du chirp émis, en distance, et à l'inverse de la bande Doppler conservée, en azimut. Lorsque la résolution est dégradée, l'information fréquentielle des images SAR est filtrée et la taille de la cellule de résolution augmente par conséquent dans les deux directions comme l'illustre la figure 3.6. La figure 3.7 compare l'effet de la dégradation de la résolution sur la taille de la cellule de résolution dans les deux directions

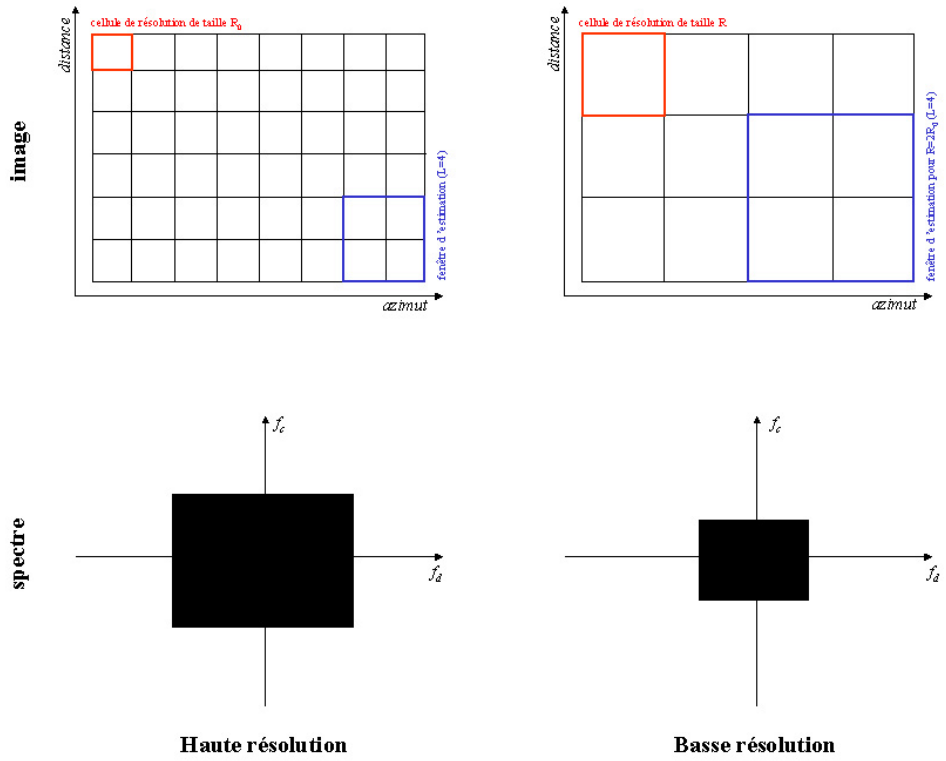

FIG. 3.6 – Représentations spatiale et spectrale (fréquence centrale : f_c, fréquence Doppler : f_d) d'une image SAR à haute et faible résolution. La cellule de résolution est représentées en rouge et la fenêtre d'estimation en bleu.

et sur l'intervalle d'angles de visée θ_{Azmax} en azimut sur lequel le signal SAR est intégré. Nous avons vu dans le premier chapitre que le filtrage de la bande passante du spectre des fréquences Doppler induisait une réduction de l'intervalle de variation de l'angle de visée en azimut.

La cohérence interférométrique et les estimateurs polarimétriques (entropie, anisotropie) sont biaisés lorsque le nombre de looks équivalent L est insuffisant [Lopez-Martinez 05], [Touzi 99]. Celui-ci est défini en fonction de la taille de la cellule de résolution R et du pixel P dans les directions azimut et distance, ainsi que du nombre total de pixels N utilisés pour l'estimation :

$$L = \frac{N P_{di} P_{az}}{R_{di} R_{az}} \tag{3.16}$$

Comme la taille des pixels est conservée dans cette étude quelle que soit la résolution, la taille N_R de la fenêtre d'estimation, représentée en bleu sur la figure 3.6, doit être adaptée à chaque résolution pour conserver un nombre de looks équivalent constant afin effectuer des estimations non-biaisées. Le nombre de pixels N_R augmente lorsque la résolution est dégradée par rapport à celui qui est nécessaire à pleine résolution N_{R_0}. Il peut s'exprimer en fonction du rapport de la bande passante conservée et de la bande passante du spectre à pleine résolution dans les deux directions :

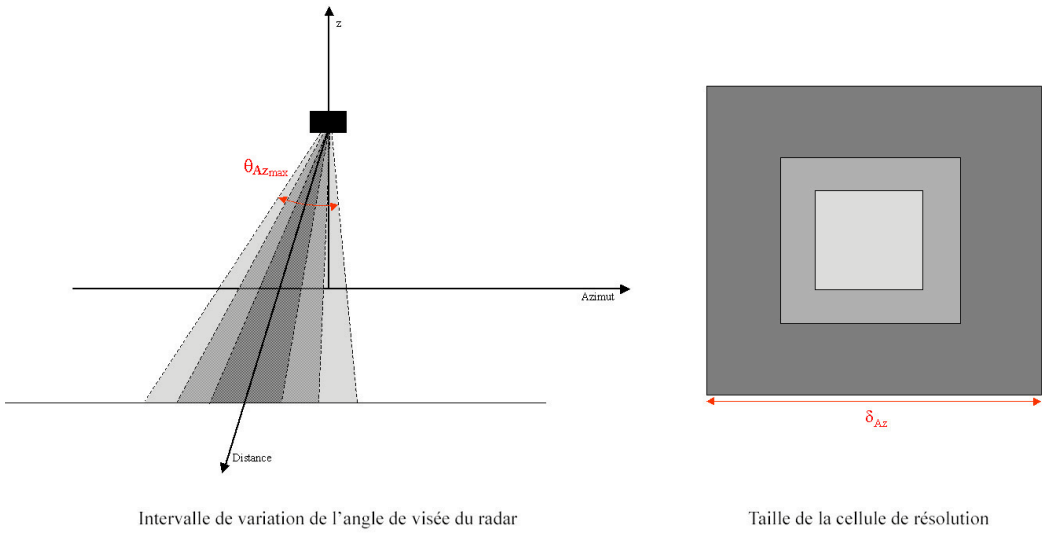

FIG. 3.7 – Illustration de l'effet de la dégradation de la résolution sur l'intervalle d'angles de visée en azimut θ_{Az} et sur la taille de la cellule de résolution dans les deux directions.

$$N_R = N_{R_0} \frac{B_{di\{R_0\}} B_{az\{R_0\}}}{B_{di\{R\}} B_{az\{R\}}} \tag{3.17}$$

Des analyses ont été effectuées pour quantifier l'effet de la résolution sur un estimateur polarimétrique ou interférométrique μ (cohérence, anisotropie). La valeur moyenne de ce paramètre $\bar{\mu}$ est calculée sur l'ensemble des fenêtres à pleine et à plus faible résolution et leur rapport μ_{res} est utilisé pour quantifier l'effet de la résolution indépendamment de la valeur de $\bar{\mu}$:

$$\mu_{res} = \frac{\bar{\mu}_{\{R,N_R\}}}{\bar{\mu}_{\{R_0,N_{R_0}\}}} \rightarrow \bar{\mu}_{\{R,N_R\}} = \mu_{res} \bar{\mu}_{\{R_0,N_{R_0}\}} \tag{3.18}$$

Par exemple, lorsque μ_{res} augmente, cela signifie que la valeur de l'estimateur a augmenté quand la résolution a été dégradée.

L'estimation des paramètres polarimétriques et de la cohérence nécessite un moyennage spatial des pixels. Dans cette étude, nous avons choisi de conserver la taille des pixels constante et indépendante de la résolution. Lorsque celle-ci est dégradée, d'une part, le nombre de pixels contenus dans une fenêtre d'estimation doit augmenter pour conserver un nombre de looks équivalent constant et d'autre part, l'observation angulaire des rétrodiffuseurs en azimut est réduite en raison de la diminution de la bande passante du spectre de l'image dans cette direction. Afin de comprendre l'influence de la résolution sur l'information polarimétrique et PolInSAR, les effets du filtrage fréquentiel et du moyennage spatial vont être quantifiés séparément à mesure que la résolution sera dégradée. Deux méthodologies qui permettent d'accéder à une mesure de l'impact de chacun de ces deux effets sont tout d'abord présentées et sont ensuite appliquées à des

données en bandes P, L et X.

– **le filtrage fréquentiel**

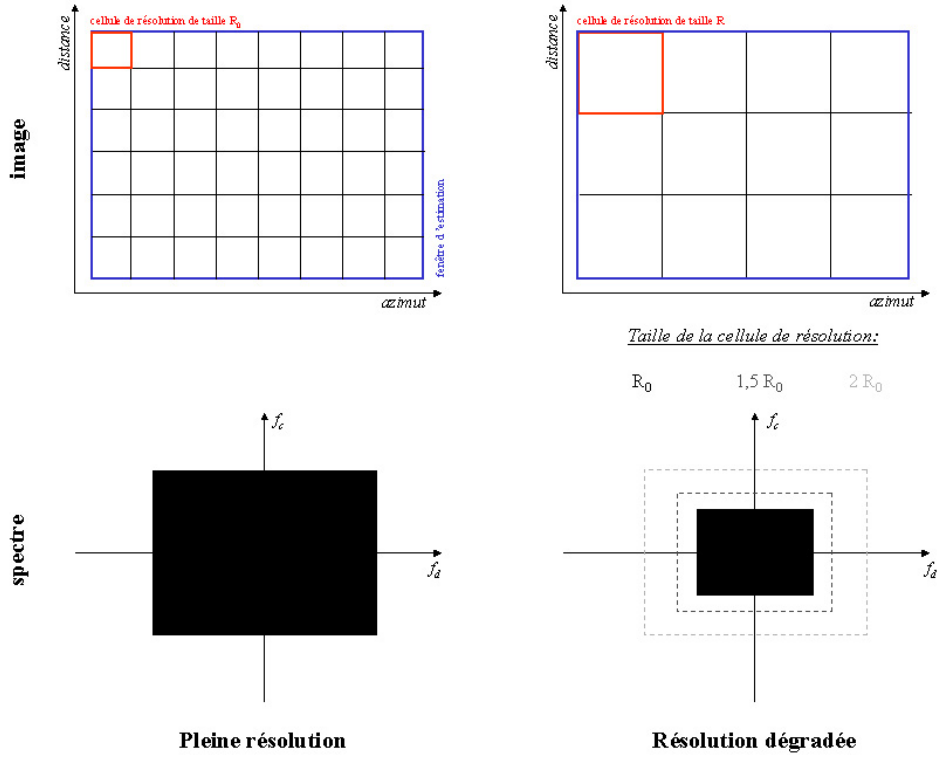

FIG. 3.8 – Effet du filtrage : filtrage du spectre fréquentiel pour simuler différentes résolutions et estimation sur tous les pixels de la zone. La cellule de résolution est représentées en rouge et la fenêtre d'estimation en bleu.

Dans le but de ne mesurer que l'effet du filtrage du spectre fréquentiel et de s'affranchir de tout effet de fenêtrage, l'estimateur μ est calculé sur les N pixels de la zone supposée homogène à pleine résolution, et lorsque celle-ci est dégradée, comme l'illustre schématiquement la figure 3.8. La zone considérée, représentée en bleu, est suffisamment grande pour ne pas générer de biais d'estimation associé à une diminution du nombre de looks équivalent lorsque la résolution est dégradée.
Le spectre fréquentiel des images est filtré avec différentes bandes passantes et μ_{res} est estimé à partir de la valeur de μ calculée sur toute l'image pour différentes résolutions :

$$\mu_{res} = \frac{\mu_{\{R,N\}}}{\mu_{\{R_0,N\}}} \tag{3.19}$$

– **le moyennage spatial**

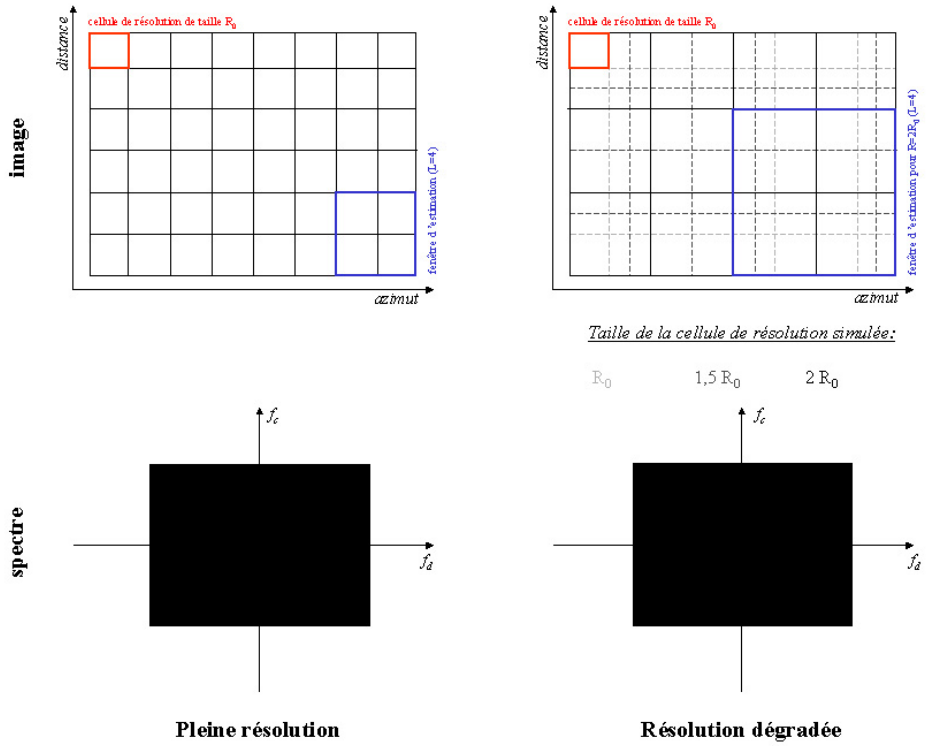

FIG. 3.9 – Effet du fenêtrage : estimation de μ sur l'ensemble des fenêtres dont la taille N_R varie pour simuler différentes résolutions. La cellule de résolution est représentées en rouge et la fenêtre d'estimation en bleu.

A l'inverse du cas précédent, aucun filtrage du spectre des images ne sera effectué dans cette analyse car l'objectif est de quantifier seulement l'influence de la taille de la fenêtre sur l'estimation. Nous avons vu que pour conserver un nombre de looks équivalent suffisant lorsque la résolution est dégradée, la taille de la fenêtre d'estimation N_R, représentée en bleu sur la figure 3.9, doit croître si la taille des pixels ne varie pas. Dans cette analyse, l'estimateur μ est alors calculé sur des images à pleine résolution selon plusieurs tailles de fenêtre N_R qui seraient nécessaires à une estimation non biaisée si la résolution était dégradée, comme l'illustre la figure 3.9. En définissant N_{R_0} comme la taille de fenêtre minimale à pleine résolution pour effectuer une estimation non biaisée, la mesure de la variation de la valeur moyenne de l'estimateur $\bar{\mu}$ lorsque la taille de fenêtre augmente s'effectue de la manière suivante :

$$\mu_{res} = \frac{\bar{\mu}_{\{R_0,N_R\}}}{\bar{\mu}_{\{R_0,N_{R_0}\}}} \tag{3.20}$$

3.2.2 Impact sur l'information polarimétrique et PolInSAR en bande P

L'effet de la résolution sur l'information polarimétrique et l'information PolInSAR est maintenant analysé sur les données en bande P couvrant une partie de la forêt de Nezer (présentée

dans la partie 2.2.1.1), à l'aide des deux méthodes évoquées précédemment pour évaluer l'importance du fenêtrage par rapport au filtrage fréquentiel.

– **anisotropie polarimétrique**

Il a été mis en évidence dans la section 2.4.1 que l'anisotropie polarimétrique était étroitement liée à la biomasse en bande P. L'influence de la résolution sur l'anisotropie à cette fréquence va être mesurée par le critère suivant :

$$A_{res} = \frac{\bar{A}_R}{\bar{A}_{R_0}} \tag{3.21}$$

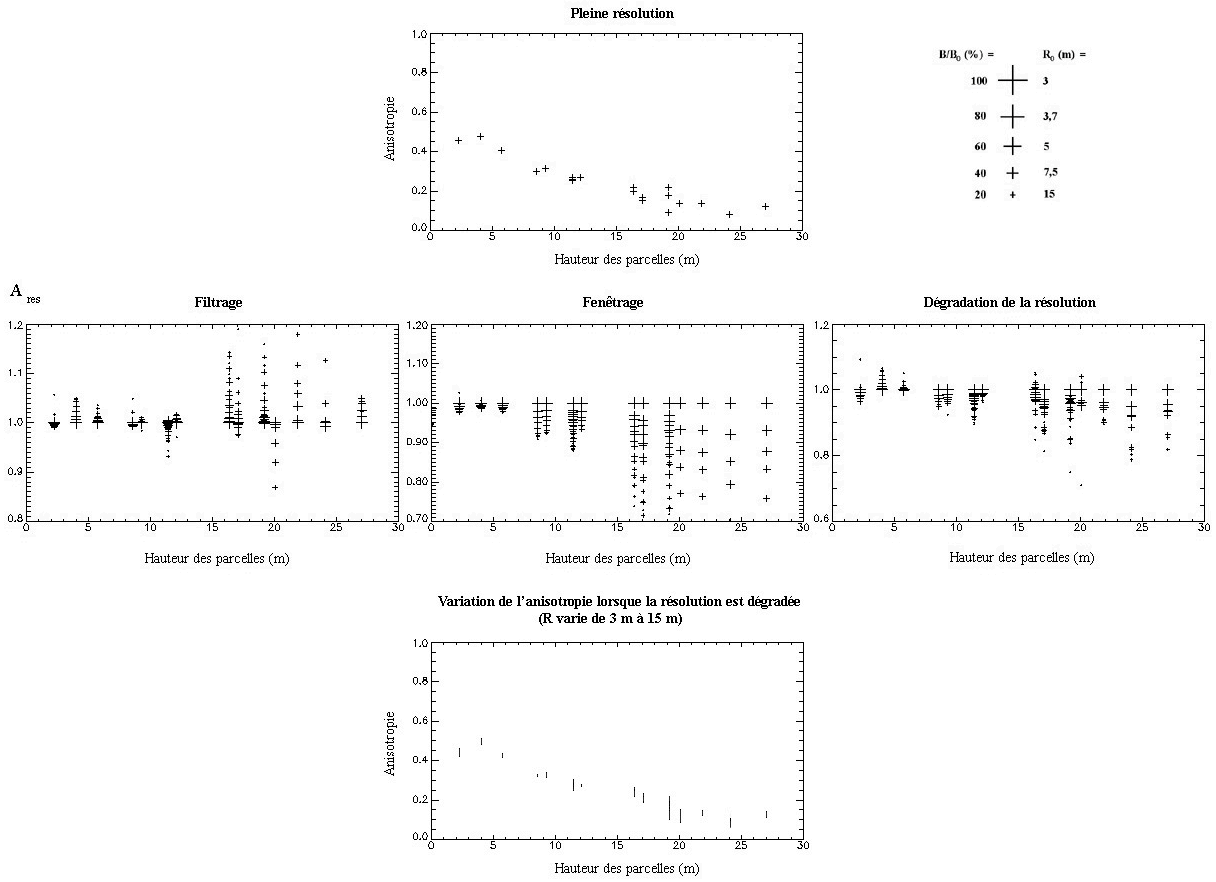

FIG. 3.10 – Analyse de l'effet de la résolution sur l'anisotropie dans le cas de différentes parcelles de la forêt de Nezer en bande P. La taille des croix diminue lorsque la résolution est dégradée.

La figure 3.10 présente l'analyse de l'effet de la dégradation de la résolution sur l'anisotropie. Le diagramme du haut représente les valeurs moyennes de l'anisotropie sur les différentes parcelles en fonction de la hauteur des pins à pleine résolution. L'impact du filtrage fréquentiel et du fenêtrage sont représentés séparément et comparés à celui de la dégradation de la résolution (diminution de la bande passante du spectre fréquentiel et augmentation de la taille des fenêtres

d'estimation).

La diminution de l'intervalle de variation de l'angle de visée en azimut permet d'expliquer l'augmentation de l'anisotropie lorsque le spectre des images est filtré car les rétrodiffuseurs deviennent localisés sur des intervalles plus étroits en azimut. Les mécanismes élémentaires de rétrodiffusion dont la réponse est très directionnelle sont donc filtrés ou sélectionnés (troncs : mécanisme de double rebond, orientation des rangs : rétrodiffusion de surface), ce qui induit un déséquilibre du spectre des valeurs propres de la matrice de cohérence polarimétrique. Une augmentation significative de l'anisotropie est exclusivement observée sur les parcelles les plus hautes, car celles-ci sont caractérisées par une forte hétérogénéité spatiale des mécanismes de rétrodiffusion liée à la diminution de la densité des troncs et à l'augmentation de leur diamètre (augmentation de la puissance du mécanisme de double rebond).

La taille de la fenêtre est proche de l'ordre de grandeur de la taille des rétrodiffuseurs polarimétriques en bande P à pleine résolution (R_0 =3 m). Lorsque la taille de fenêtre augmente, l'hétérogénéité spatiale des rétrodiffuseurs polarimétriques est lissée et conduit à un rééquilibrage du spectre des valeurs propres de la matrice de cohérence polarimétrique (les trois valeurs propres deviennent équivalentes) et donc à la diminution de l'anisotropie polarimétrique observée sur la figure 3.10.

Il résulte globalement de cette analyse des effets de la résolution une influence prédominante du moyennage spatial des pixels sur l'information polarimétrique lorsque la résolution est dégradée, car l'anisotropie diminue sur les plus hautes parcelles. Le diagramme du bas de la figure 3.10, qui représente l'amplitude de variation de l'anisotropie lorsque la cellule de résolution varie de 3 à 15 m, montre que la valeur de ce paramètre est peu sensible à la résolution. La dégradation de la résolution ne détériore que très légèrement la corrélation entre l'anisotropie polarimétrique et la biomasse en bande P.

– **cohérence interférométrique**

La mesure de l'effet de la résolution sur la cohérence des différents canaux polarimétriques, représentée sur la figure 3.11 dans le contexte des parcelles de pins de la forêt de Nezer, est effectuée ainsi :

$$|\gamma_{res}| = \frac{\overline{|\gamma_R|}}{\overline{|\gamma_{R_0}|}} \tag{3.22}$$

La figure 3.11 montre que les effets du filtrage du spectre fréquentiel et du fenêtrage sur la cohérence apparaissent antagonistes quel que soit le canal polarimétrique.
Le filtrage fréquentiel du spectre en azimut induit une réduction de l'intervalle d'angles de visée et par conséquent une diminution de la variabilité de la hauteur des rétrodiffuseurs. Cette diminution de la dispersion verticale des rétrodiffuseurs est à l'origine de l'augmentation de la cohérence des différents canaux polarimétriques observée sur la figure 3.11.

A l'opposé, l'accroissement de la taille de la fenêtre d'estimation a pour effet d'augmenter la diversité des positions verticales des rétrodiffuseurs, ce qui induit une perte de cohérence sur les plus hautes parcelles. Notons que sur ces parcelles, une perte de cohérence moins importante est observée dans les canaux polarimétriques HH et HH-VV. Les centres de phase associés à ces

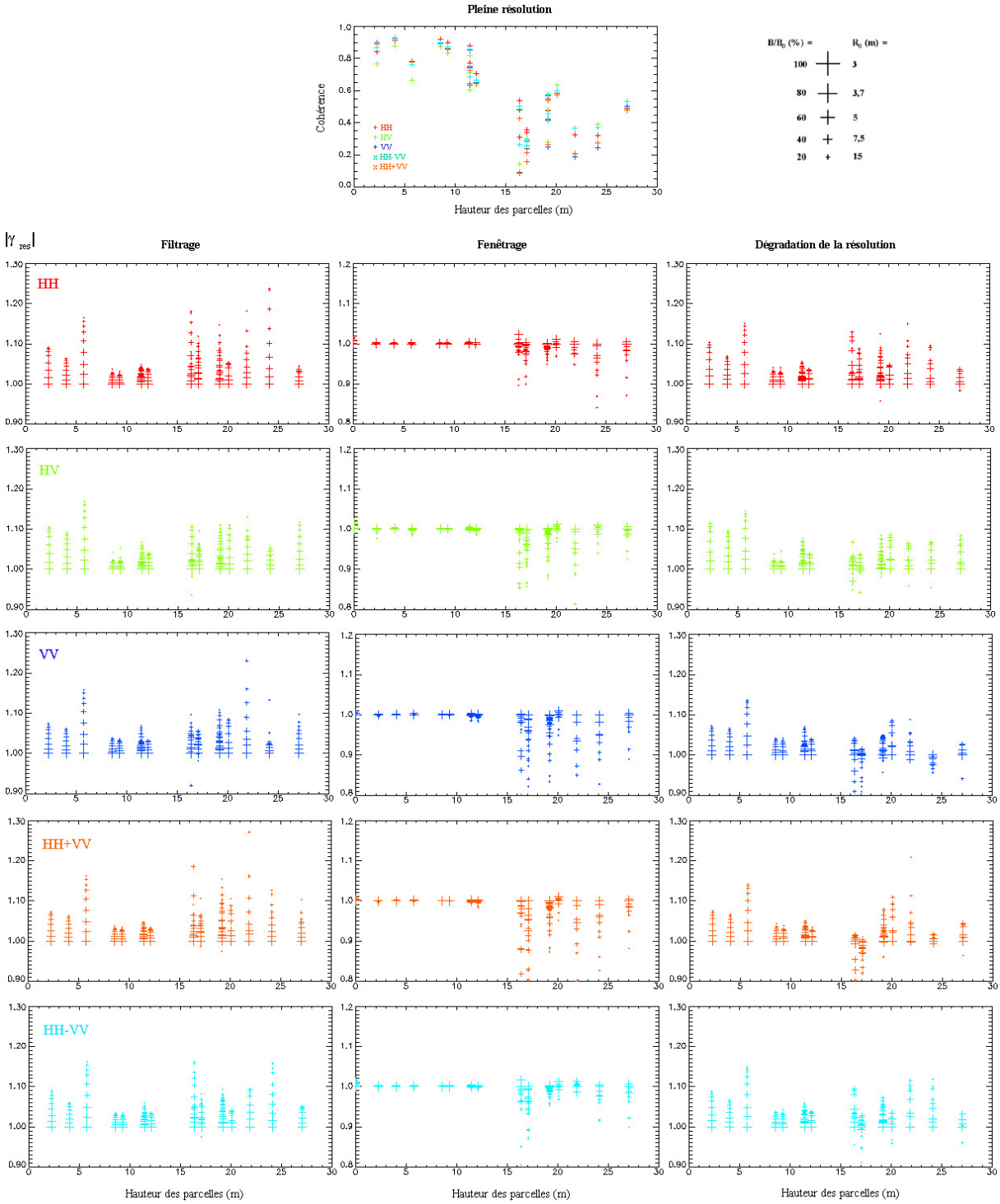

FIG. 3.11 – Analyse de l'effet de la résolution sur la cohérence associée aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion dans le cas de différentes parcelles de la forêt de Nezer en bande P.

deux canaux polarimétriques sont les plus bas en raison de la réception d'une forte contribution du mécanisme de double rebond et du sol qui restreint la variabilité de leur hauteur sur la parcelle. Par contre, une sensibilité plus élevée au fenêtrage est observée dans les canaux VV et HV qui reçoivent des contributions rétrodiffusées par l'ensemble de la forêt. Dans le cas de ces deux canaux polarimétriques, la plus forte décorrélation est observée sur les parcelles les plus hautes, où la variabilité de la hauteur des centres de phase est plus importante.

Notons que sur les trois parcelles inférieures à 6 m, où l'effet du fenêtrage est très faible, le filtrage du spectre induit une forte augmentation de la cohérence. Une analyse fréquentielle a révélé que la contribution du sol reçue dans le canal HH+VV est directionnelle et localisée sur un intervalle d'angle de visée restreint, donc sur une partie du spectre Doppler. Comme les petites parcelles sont structurées en rangs (partie 2.2.1.1), la dégradation de la résolution permet dans ce cas de sélectionner le look le plus cohérent (caractérisé par le rapport des puissances du sol et du volume le plus élevé) mais peut également conduire à une perte de cohérence pour une autre orientation des rangs.

Lorsque la résolution des images SAR est dégradée, le filtrage fréquentiel et le moyennage spatial induisent des effets antagonistes. L'influence du filtrage est globalement prépondérante lorsque la résolution est dégradée même si celui-ci est perturbé par un effet opposé du fenêtrage sur les plus hautes parcelles dans les canaux VV et HV. L'augmentation globale de la cohérence conduit à une valeur de $|\gamma_{res}|$ située entre 1,05 et 1,1 pour une taille de cellule de résolution qui varie de 3 à 15 m.

3.2.3 Impact sur l'information PolInSAR en bandes X et L

La taille et la localisation des rétrodiffuseurs dans la forêt, et par conséquent les propriétés physiques du milieu, varient avec la fréquence car les ondes radar n'interagissent pas avec les mêmes éléments structuraux de la forêt. L'analyse des effets de la résolution est poursuivie en bandes X et L à des résolutions comparables à celles qui ont été considérées en bande P (la taille de la cellule de résolution varie de 3 à 15 m) afin de comparer la robustesse de l'information PolInSAR entre ces différentes fréquences en conditions spatiales.

En bande L, les variations de cohérence lorsque la résolution est dégradée, qui sont représentées sur la figure 3.12, sont globalement moins importantes que celles qui ont été mesurées en bande P pour les même résolutions (figure 3.11). L'augmentation de la taille de la fenêtre d'estimation entraîne également une perte de cohérence, à l'inverse du filtrage du spectre qui induit peu de conséquences sur la valeur de la cohérence sur l'ensemble des parcelles. Il apparaît que l'impact des deux mécanismes qui interviennent lors de la dégradation des images SAR (filtrage et fenêtrage) sur la cohérence interférométrique est d'une part inférieur à celui qui a été observé en bande P, et d'autre part est du même ordre dans tous les canaux polarimétriques.

Premièrement, la faible perte de cohérence induite par l'augmentation de la taille des fenêtres d'estimation mesurée en bande L signifie que la hauteur des rétrodiffuseurs est plus homogène sur la forêt, et donc qu'ils sont localisés sur un intervalle vertical plus étroit. Ensuite, comme l'effet du filtrage fréquentiel est par définition nul sur un volume de particules orientées aléatoirement, les faibles variations de cohérence lorsque le spectre des images SAR est filtré par rapport à la bande P, confortent les hypothèses déduites de travaux antérieurs (PolInSAR [Papathanassiou 01] [Papathanassiou 03a], tomographie [Reigber 00]), concernant les caractéristiques aléatoires de

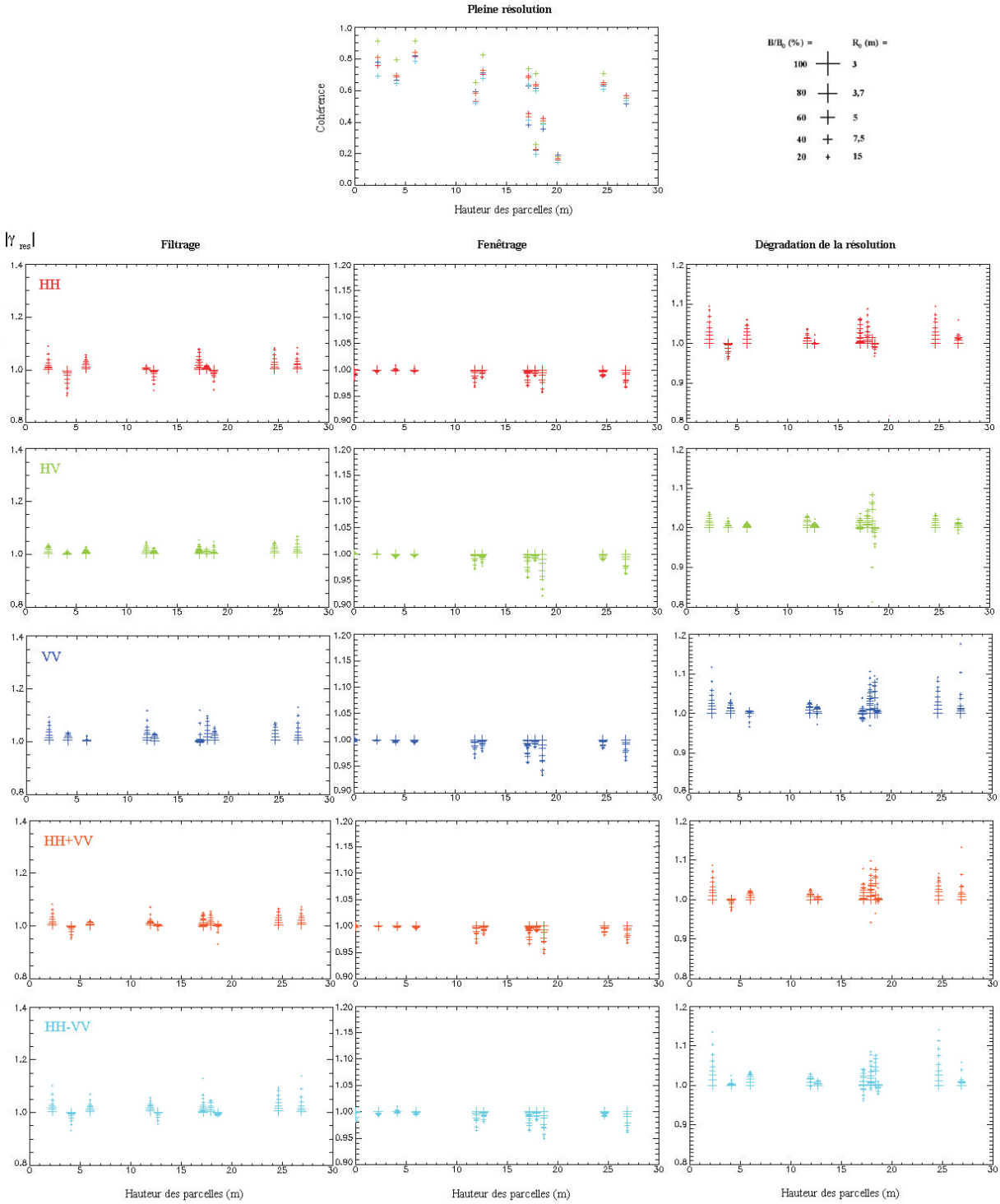

FIG. 3.12 – Analyse de l'effet de la résolution sur la cohérence associée aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion dans le cas de différentes parcelles de la forêt de Nezer en bande L.

la structure de la forêt à cette fréquence. Ceci indique que les hypothèses du modèle RVoG sont plus adaptées à la bande L.

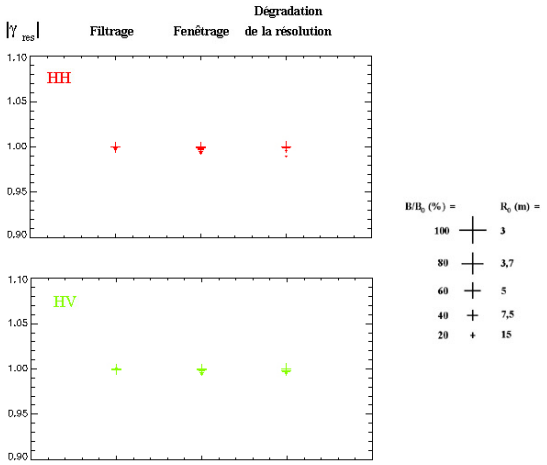

FIG. 3.13 – Analyse de l'effet de la résolution sur la cohérence des canaux polarimétriques HH et HV, dans le cas d'une forêt de pins en bande X.

En bande X, l'effet de la résolution sur la cohérence est presque nul pour cet intervalle de résolutions, comme le montre la figure 3.13. Nous avons vu dans le chapitre précédent que la cohérence interférométrique était très sensible à la "rugosité" de la canopée formée par les variations de la hauteur de celle-ci dans une cellule de résolution. Comme les rétrodiffuseurs sont de petite taille ($\sim$ 3 cm), la perturbation de la cohérence du signal interférométrique causée par l'augmentation de la taille de la fenêtre diminue rapidement lorsque la taille augmente et devient nulle quand la taille devient trop importante par rapport à l'échelle du rétrodiffuseur, ce qui est le cas de la gamme des tailles de cellule de résolution étudiées.

Cette analyse de données PolInSAR acquises en bandes X et L montre que l'influence de la résolution sur la cohérence diminue lorsque la fréquence augmente, dans le contexte des forêts de pins étudiées. L'impact de la dégradation de la qualité de ce paramètre système en conditions spatiales sur l'extraction de paramètres apparaît donc faible en bande L et négligeable en bande X.

3.2.4 Biais sur l'extraction de paramètres

L'effet de la dégradation de la résolution est évalué sur l'inversion de la hauteur de la forêt de la même manière que dans le cas de l'étude du bruit thermique. La figure 3.14 représente l'erreur associée à l'estimation de la hauteur en fonction de $|\gamma_{res}|$ et de la hauteur du volume. Seul un coefficient d'extinction moyen bas, intermédiaire entre celui des bandes L et P, est considéré ($\sigma = 0{,}5$ dB/m) car il a été observé que la résolution influait peu sur la valeur de la cohérence interférométrique en bande X, caractérisée par un coefficient d'extinction moyen plus élevé ($\sigma =$ 2 dB/m).

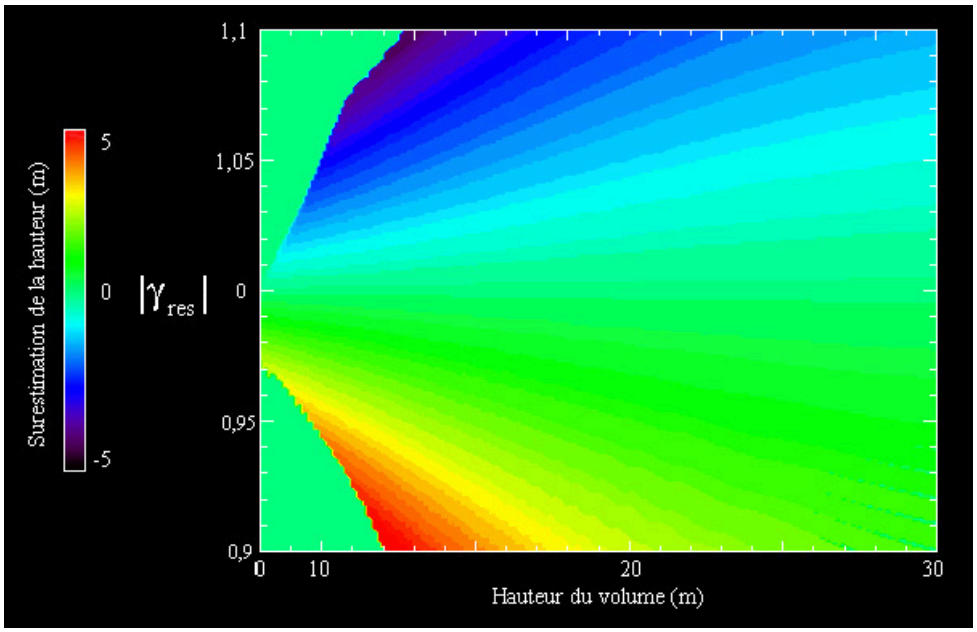

FIG. 3.14 – Erreur sur l'estimation de la hauteur du volume en fonction de l'indicateur de l'effet de la résolution $|\gamma_{res}|$ dans le cas de volumes de particules orientées aléatoirement dont la hauteur varie de 0 à 30 m et dont le coefficient d'extinction moyen est égal à 0,5 dB/m.

A titre d'exemple, l'effet de la dégradation de la résolution, qui est le plus important en bande P ($|\gamma_{res}|$ est en moyenne compris entre 1,05 et 1,1), induit une sous-estimation de la hauteur de l'ordre de 2-3 m sur une forêt de 20 m. En revanche, le biais généré est plus faible en bande L et de l'ordre de grandeur de la précision des mesures au sol de la hauteur des arbres.

La qualité de l'extraction de paramètres en bande P dépend de l'extension de la partie "visible" de la cohérence interférométrique dans le plan complexe après optimisation temps-fréquence. Un moyen d'évaluer les effets de la dégradation de la résolution sur les performances de l'optimisation temps-fréquence est de mesurer la distance maximale moyenne Δ entre les centres de phase polarimétriques à pleine résolution et après optimisation. Le diagramme de gauche de la figure 3.15 montre premièrement que la longueur de la région de cohérence dans le plan complexe est fortement corrélée à pleine résolution avec la hauteur des parcelles, sauf pour les parcelles inférieures à 8 m où elle est presque nulle en raison d'une forte contribution du sol dans tous les canaux polarimétriques. Ensuite, il apparaît que cette distance varie peu lorsque la résolution est dégradée.

L'optimisation temps-fréquence consiste, sur chaque fenêtre spatiale, à maximiser la distance entre les centres de phase polarimétriques par décomposition du spectre Doppler en sous-looks. Sur chaque parcelle de la forêt de Nezer, la cohérence interférométrique a donc été estimée sur cinq sous-looks, dont trois sont indépendants, afin de mesurer la distance verticale maximale entre les centres de phase polarimétriques à différentes résolutions. Le diagramme de droite de la figure 3.15 illustre l'altération des performances de l'analyse temps-fréquence lorsque la résolution est dégradée : 30 % de la distance verticale maximale est réduite en moyenne lorsque la résolution devient basse (R=15 m).

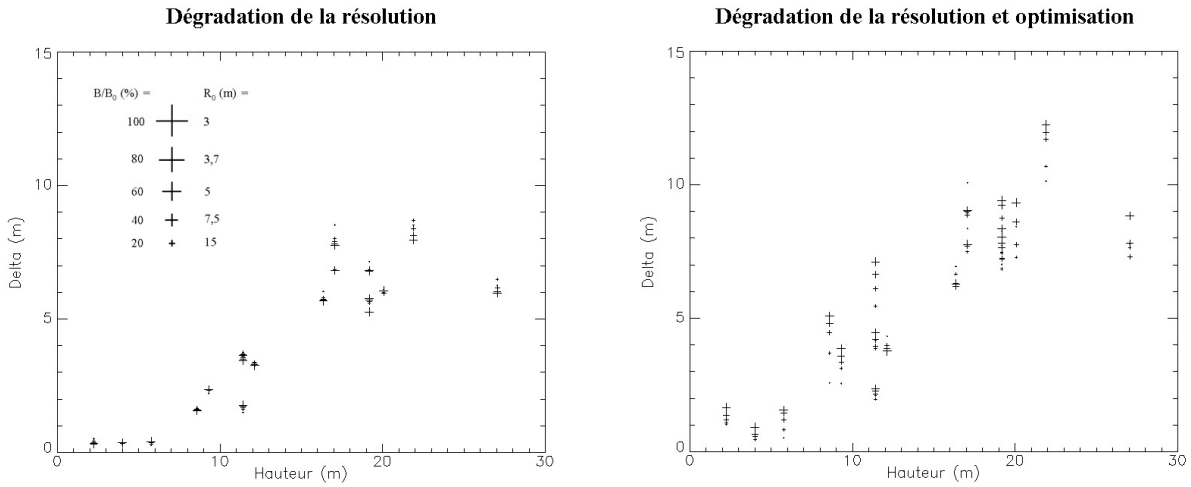

FIG. 3.15 – Distance verticale maximale mesurée entre les centres de phase polarimétriques sur l'ensemble des parcelles de la forêt de Nezer lorsque la résolution est dégradée (à gauche) et après optimisation temps fréquence (à droite).

3.3 Discussion sur la fréquence

Une analyse complète des paramètres systèmes nécessite, après l'étude du bruit thermique et de la résolution, l'évaluation du rôle de la fréquence pour l'extraction des paramètres physiques de la végétation. Les travaux présentés dans ce chapitre et dans le chapitre précédent ont été effectués sur un large intervalle du spectre des fréquences utiles aux applications thématiques représentées sur la figure 3.16. Les différentes analyses radiométriques, polarimétriques, PolInSAR et de l'effet de la résolution effectuées en bandes X, L et P sont maintenant comparées pour identifier les rétrodiffuseurs dans la forêt et confronter les caractéristiques de l'inversion à chaque fréquence.

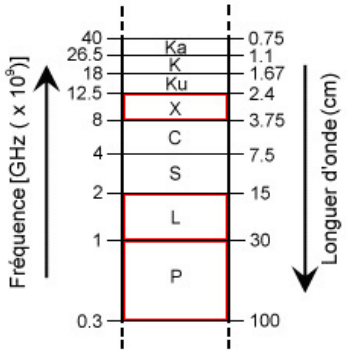

FIG. 3.16 – Fréquences du signal SAR utilisées pour les applications scientifiques.

La bande X s'est avérée très adaptée à la discrimination des surfaces agricoles car les ondes

radar, dont la longueur d'onde est de l'ordre de 3 cm, interagissent superficiellement avec le feuillage. L'information polarimétrique, qui est étroitement liée à l'abondance des feuilles sur la végétation agricole, présente toutefois une saturation, se traduisant par la signature du mécanisme de rétrodiffusion de volume, sur la végétation haute et la forêt. Il a également été observé à cette fréquence une forte sensibilité de l'information PolInSAR à la structure verticale des cultures de type "blé". Sur la forêt, les rétrodiffuseurs sont majoritairement localisés sur la partie haute de la canopée mais leur position verticale est dépendante de l'hétérogénéité spatiale de la forêt. En effet, la hauteur des centres de phase polarimétriques se disperse en présence de trous dans la canopée, du fait de la réception d'une plus forte contribution du sol dans les canaux co-polaires.

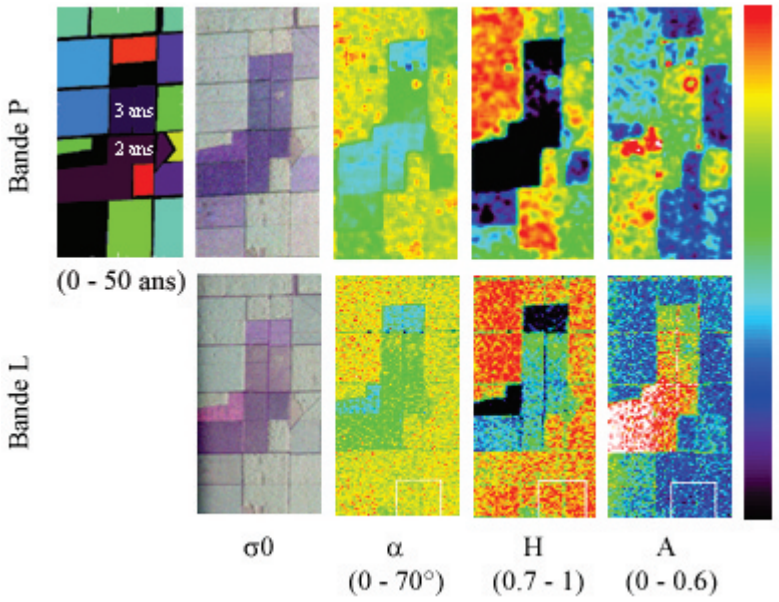

FIG. 3.17 – Comparaison des propriétés polarimétriques de certaines parcelles basses de la forêt de Nezer entre les bandes L et P.

L'acquisition de données en bande P et en bande L sur le même site et durant la même campagne permet de comparer exactement les caractéristiques du signal rétrodiffusé à ces deux fréquences et leur potentiel pour l'étude de la forêt. Les analyses présentées précédemment ont porté sur différentes parcelles de la forêt de Nezer, chacune étant représentative d'un stade de maturité particulier. Il a donc été possible de mesurer les variations des propriétés du signal radiométrique, polarimétrique et PolInSAR sur l'ensemble de l'intervalle des hauteurs des pins.

La bande L présente une rapide saturation de l'information radiométrique et polarimétrique en fonction de la hauteur des parcelles. La discrimination des parcelles est possible à cette fréquence à l'aide d'un jeu de données polarimétriques, mais se détériore fortement dès les faibles hauteurs (6 m), au delà desquelles la signature du mécanisme de rétrodiffusion de volume est prédominante. En bande P, comme la profondeur de pénétration est plus importante, les propriétés radiométriques et polarimétriques du signal rétrodiffusé sont plus sensible à la hauteur de la forêt et par conséquent plus contrastées sur l'ensemble des parcelles. On a principalement

constaté que l'anisotropie polarimétrique était fortement corrélée avec la hauteur des parcelles en raison de l'augmentation de la puissance reçue dans le canal croisé à mesure que la hauteur de la forêt augmente. La figure 3.17 illustre la complémentarité de l'information polarimétrique de la bande L et de la bande P pour la discrimination des surfaces et des parcelles de différentes hauteurs. Les surfaces de sol nu sont situées au centre de la figure et correspondent aux valeurs minimales de l'angle alpha et de l'entropie ainsi qu'à une valeur élevée de l'anisotropie. Les parcelles de végétation basse de 2 et 3 ans, qui sont accolées aux surfaces nues, ne sont pas distinguées de ces dernières en bande P, à la différence de la bande L. En revanche, la sensibilité du signal polarimétrique à la hauteur de la forêt en bande P est visible pour les parcelles plus hautes situées en périphérie, sur lesquelles les estimateurs polarimétriques sont homogènes en bande L.

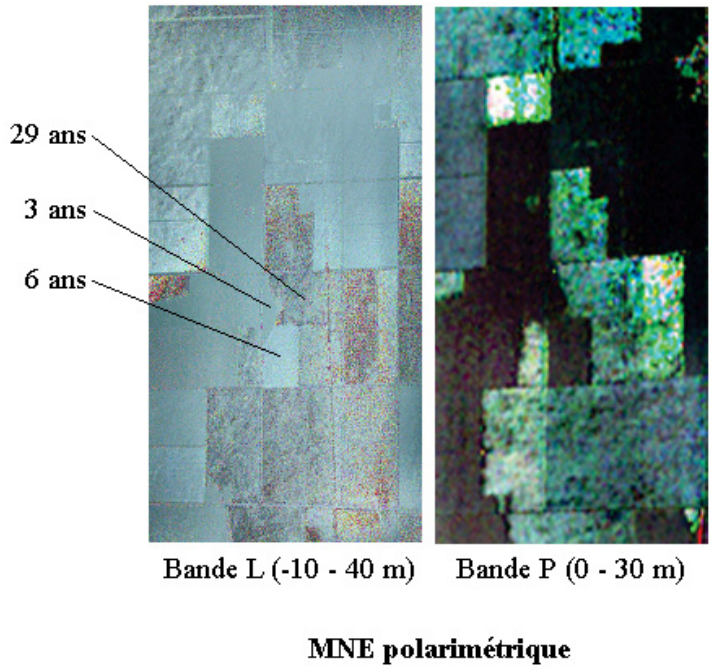

Fig. 3.18 – Comparaison de MNE polarimétriques concernant une partie de la forêt de Nezer.

La mesure de la hauteur des centres de phase polarimétriques avec la technique PolInSAR en bande P a mis en évidence diverses relations avec les éléments structuraux de la forêt, ainsi qu'une organisation verticale qui varie avec la hauteur des parcelles. De manière globale, les centres de phase des mécanismes de rétrodiffusion polarimétriques sont positionnés sur l'ensemble de la hauteur de la forêt à cette fréquence. En bande L, les parcelles de forêt de différentes hauteurs apparaissent en niveaux de gris sur le Modèle Numérique d'Élévation polarimétrique codé en RGB dans la base lexicographique sur la figure 3.18. Les centres de phase polarimétriques sont globalement situés à une même hauteur, qui varie avec l'âge des peuplements. Notons qu'en raison d'une faible hauteur d'ambiguïté sur les données en bande L, la phase interférométrique est enroulée sur les parcelles les plus hautes. Ces observations laissent à supposer que les rétrodiffuseurs sont essentiellement constitués par les branches primaires ainsi que les branches secondaires à cette fréquence. La figure 3.18 permet cependant d'observer que l'information PolInSAR per-

mettait de distinguer des parcelles de faible hauteur entre elles en bande L, ce qui est impossible en bande P car la contribution du sol est prédominante dans tous les canaux polarimétriques sur les parcelles les plus basses. En bande P, la forte dispersion verticale des centres de phase polarimétriques et la réorganisation de leurs positions lorsque la hauteur de la forêt augmente est visible sur les plus hautes parcelles, car elles apparaissent de couleurs différentes. Nous avons vu que les ondes radar interagissaient avec l'ensemble de la forêt à cette fréquence, donnant lieu à des relations complexes entre les mécanismes de rétrodiffusion et les éléments structuraux de la forêt.
L'effet du fenêtrage sur la cohérence du signal interférométrique des différents canaux polarimétriques lorsque la résolution est dégradée est d'autant plus important que la fréquence est basse. La perte de cohérence induite par le moyennage spatial des centres de phase de différentes hauteurs est presque nulle en bande X et maximale en bande P, ce qui confirme les hypothèses sur la localisation verticale des rétrodiffuseurs déduites des précédentes analyses et illustrées sur la figure 3.19.

De manière globale, les performances de l'extraction de paramètres dépendent de la précision de l'estimation de la hauteur du sol et de la cohérence interférométrique de la canopée. Comme l'illustre de manière schématique la figure 3.19, l'utilisation de différentes fréquences permet de faire varier la profondeur de pénétration des ondes radar dans la canopée et le rapport des puissances de ces deux contributions.
En bande X et en bande L, la contribution de la canopée est supposée reçue dans l'un des canaux polarimétriques et la hauteur du sol est estimée par régression linéaire de la cohérence interférométrique dans le plan complexe. La qualité de l'inversion dépend dans ce cas de l'extension de la région de cohérence dans le plan complexe. La dispersion verticale des centres de phase polarimétriques est faible en bande X, c'est pourquoi l'augmentation de la puissance de la contribution du sol confère une meilleure précision de l'inversion. La séparation des contributions du sol et de la canopée par optimisation temps-fréquence permet d'augmenter légèrement les performances de l'inversion, même si la variation maximale de l'angle de visée θ_{Azmax} est de l'ordre de 1° à cette fréquence, et de diminuer le bais lié à l'estimation de la contribution de la canopée. A l'autre extrémité du spectre, en bande P, une forte contribution du sol est présente dans tous les canaux polarimétriques et a pour effet d'allonger la région de cohérence dans le plan complexe. L'extraction de paramètres en bande P, qui doit prendre en compte un effet d'orientation (l'extinction des ondes dépend de la polarisation) et une cohérence du sol inférieure à 1, nécessite une analyse temps-fréquence (avec θ_{Azmax} =14° dans cette étude) pour séparer les contributions du sol et de la canopée afin de s'affranchir du biais généré par la procédure d'inversion du modèle RVoG sur l'estimation de la hauteur du sol.

Comme les rétrodiffuseurs ne sont pas constitués par les mêmes éléments structuraux de la forêt à ces différentes fréquences, les performances de l'extraction de paramètres ne sont pas affectées de la même manière par la décorrélation temporelle. Celle-ci est essentiellement due au mouvement des feuilles induit par le vent entre deux passes interférométriques et est susceptible d'altérer le signal interférométrique dans les hautes fréquences, sachant par ailleurs que lorsque la fréquence est élevée, les lignes de base peuvent être suffisamment courtes pour effectuer des acquisitions mono-passe.

L'extraction de paramètres avec la technique PolInSAR en bandes X et P comporte des points faibles différents : en bande X, la qualité de l'inversion dépend de la densité de la forêt

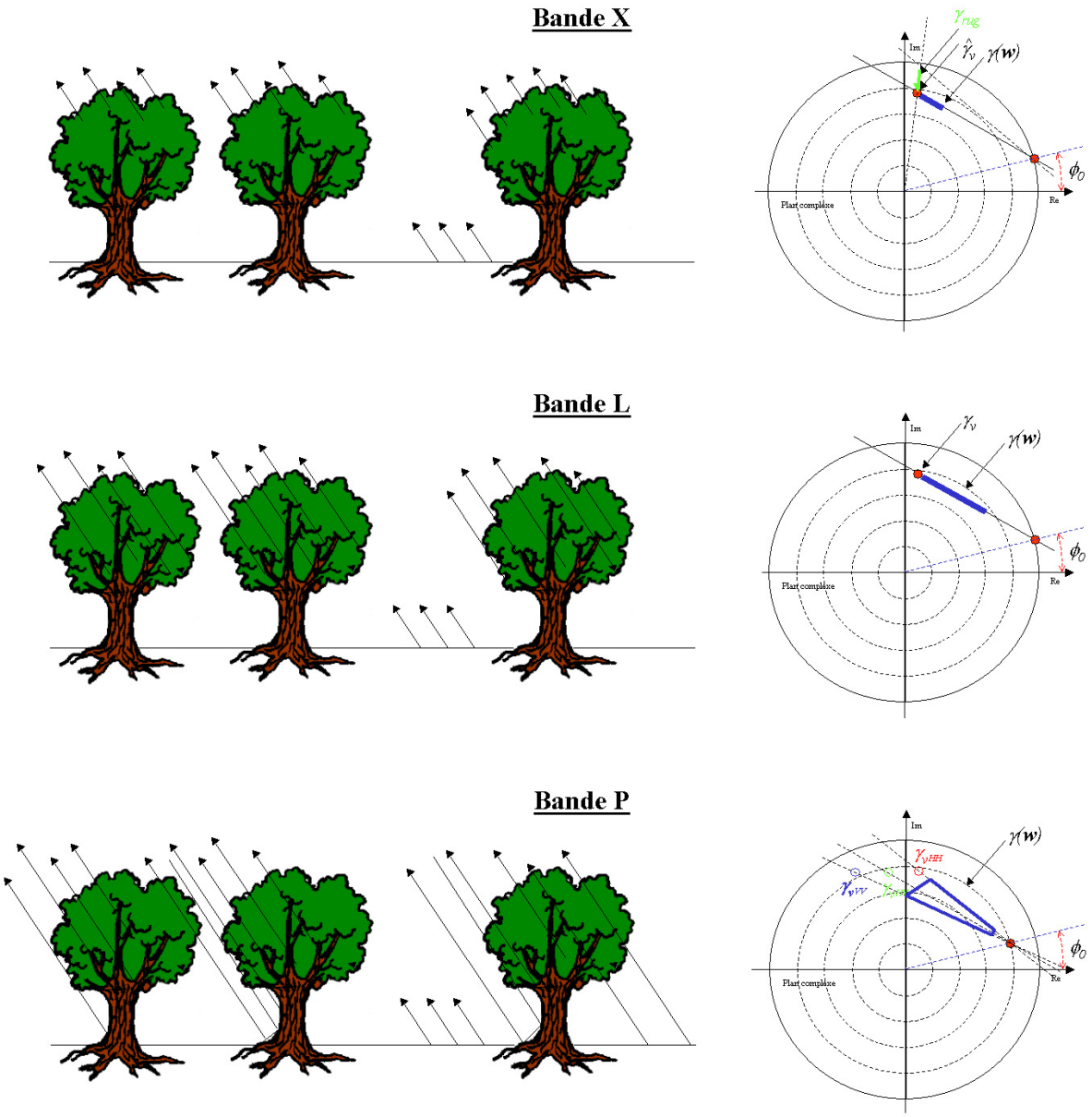

FIG. 3.19 – Comparaison de la profondeur de pénétration des ondes radar dans la canopée à différentes fréquences et représentation qualitative de l'impact sur l'extraction de paramètres. Les cohérences interférométriques du sol et du volume sont localisées dans le plan complexe par un point rouge.

car la présence de trous dans la canopée est nécessaire à la réception de la contribution du sol. En bande P, la surestimation de la hauteur sur les plus hautes parcelles signifie que la contribution pure de la canopée ne peut pas être séparée complètement de celle du sol par optimisation temps-fréquence. L'inversion ne devient également fiable qu'à partir d'une certaine hauteur de forêt à cette fréquence. La bande P apparaît ainsi plus adaptée à l'étude des forêts correspondant à de fortes valeurs de biomasse, comme par exemple les forêts tropicales.

3.4 Conclusion

L'analyse multi-fréquentielle de la végétation a été testée en conditions spatiales pour évaluer le potentiel des satellites radar passés, actuels et futurs, dont les caractéristiques techniques sont détaillées dans le tableau ci-dessous, pour l'estimation des paramètres physiques de la végétation. Comme il n'existe actuellement aucun système émettant en bande P, la transposition aux conditions spatiales des analyses effectuées à cette fréquence permet de prédire le potentiel de tels systèmes embarqués sur une plate-forme spatiale et de proposer des recommandations quant à l'étude de la végétation à cette fréquence.

Système	**Bande**	**Inc.** (°)	**Polar.**	**Rés.** (m)	**Fauc.** (km)	**NEσ_0** (dB)
ERS 1/2	C	23	VV	25	100	-24
ENVISAT/ASAR	C	15-45	partielle	30-2000	56-400	-24
COSMO-SKYMED	X-L	30-57	mono/dual	3-15	10-200	?
Terra-SAR	X	15-60	toutes	1,5-3,5	30-100	-20
RADARSAT 1	C	10-59	HH	9-100	50-500	-24
RADARSAT 2	C	10-59	toutes	3-100	35-500	-24
JERS-1	L	35	HH	18	75	-18
ALOS-PALSAR	L	8-60	toutes	7-100	20-350	-30
SIR-A/B	L	20/20-50	HH	40/25	50	-35
SIR-C / X-SAR	C-L/X	17-63/15-60	toutes	10-200	15-90	-20
SRTM	C/X	17-63/15-60	VV	30	225/50	-25

TAB. 3.1 – Principales caractéristiques des systèmes spatiaux passés, actuels et futurs.

Il apparaît tout d'abord dans cette étude que la corrélation entre l'anisotropie et la hauteur des parcelles en bande P est principalement affectée par la diminution du SNR et qu'elle est peu détériorée par la dégradation de la résolution. En effet, l'anisotropie polarimétrique est par définition un paramètre très sensible au bruit et la précision de l'inversion de la hauteur des parcelles décroît fortement lorsque le $NE\sigma_0$ atteint -15 dB. Le tableau ci-dessus indique que les plate-formes spatiales passées, actuelles et futures possèdent toutes un niveau de bruit thermique inférieur à cette valeur critique.

L'extraction de paramètres à partir de données PolInSAR acquises par une plate-forme spatiale est également altérée par la diminution du SNR et par la dégradation de la résolution.
Le bruit thermique est à l'origine d'une perte de cohérence dans tous les canaux polarimétriques. La dégradation de la résolution d'un jeu de données PolInSAR, qui implique les effets antagonistes du fenêtrage et du filtrage du spectre fréquentiel (le fenêtrage conduit à une diminution de la cohérence et le filtrage induit l'effet opposé), affecte plus fortement le signal interférométrique en bande P qu'à plus haute fréquence, car la diversité des hauteurs des centres de phase polarimétriques dans les forêts de pins étudiées est plus élevée à basse fréquence. En bande P, il a été observé que la diminution de la résolution influait de manière différente sur l'ensemble des canaux polarimétriques. La cohérence interférométrique est plus stable en fonction de la résolution pour les canaux polarimétriques associés aux polarisations HH et HH-VV, où la hauteur des rétrodiffuseurs est peu variable à l'intérieur d'une fenêtre d'estimation. A mesure que

la fréquence augmente, l'influence de la résolution diminue car les rétrodiffuseurs deviennent localisés au sein d'un intervalle plus étroit en hauteur.

Le biais sur l'inversion de la hauteur généré par la diminution du SNR et par la dégradation de la résolution a été quantifié en fonction de la hauteur de la forêt. Comme l'hypothèse que la contribution pure de la canopée est reçue dans un canal polarimétrique ou dans un sous-look est faite sur tout l'intervalle de fréquences, l'erreur induite par le biais qui affecte la cohérence interférométrique d'un volume de particules orientées aléatoirement a été mesurée en fonction de ces deux paramètres système pour plusieurs hauteurs du volume.
Comme l'effet du bruit thermique est d'autant plus important que l'extinction des ondes radar dans la canopée est forte, celui-ci est plus élevé en bande X qu'en bande P. Dans le cas concret d'une forêt de 20 m de hauteur, le bruit thermique produit par un système dont le $NE\sigma_0$ est compris entre -15 et -20 dB induira une surestimation de la hauteur de 3 m et d'au moins 5 m dans les cas respectifs où le coefficient d'extinction moyen est égal à 0,5 dB/m (bande P) et à 2 dB/m (bande X). La diminution de la résolution conduit quand à elle à une sous-estimation de la hauteur de 2 à 3 m en bande P et à un biais négligeable devant la précision des mesures au sol (supposée supérieure au mètre) à plus haute fréquence, lorsque la taille de la cellule de résolution varie de 3 à 15 m.

L'extraction de paramètres à partir de données PolInSAR s'est avérée efficace sur l'ensemble du spectre fréquentiel, même si la précision de l'inversion est directement liée dans chaque cas à la nature des rétrodiffuseurs avec lesquels les ondes radar interagissent. Schématiquement, ils sont constitués de manière prédominante par le haut de la canopée en bande X, par les branches primaires et secondaires en bande L, et par l'ensemble de la forêt ainsi que le sol en bande P. La faible profondeur de pénétration de la bande X diminue le potentiel de l'extraction de paramètres sur des forêts denses où la contribution du sol reçue est faible. En bande P, la profondeur de pénétration est au contraire très importante et cette fréquence présente par conséquent un fort potentiel pour l'analyse de forêts caractérisées par une biomasse plus élevée.

L'information PolInSAR est peu affectée par la dégradation de la résolution en bande X, mais l'effet du SNR sur l'extraction de paramètres est plus important qu'à basse fréquence. Les principaux problèmes liés à l'utilisation de systèmes SAR orbitaux en bandes X et L sont donc la qualité du système au regard du bruit thermique et également la décorrélation temporelle, qui ne peut être évitée que par une acquisition mono-passe du signal interférométrique (tandem). La décorrélation du signal interférométrique causée par une diminution du SNR doit impérativement être corrigée pour effectuer une extraction de paramètres non-biaisée.

En aéroporté, l'extraction de paramètres est plus robuste en bande P qu'à plus haute fréquence en raison de l'importante variation de l'angle de visée sur tout le spectre en azimut qui permet de séparer les contributions du sol et de la canopée par analyse temps-fréquence et d'éliminer l'erreur liée à l'estimation du sol. L'estimation non-biaisée de la hauteur de la forêt en bande P avec les méthodes proposées dans la partie 2.4.2.2 nécessite une qualité minimale de la résolution et du SNR. En effet, la diminution de la résolution génère une sous-estimation de la hauteur, mais altère également les capacités de l'optimisation temps-fréquence nécessaire à l'estimation de la hauteur du sol et de la cohérence interférométrique de la canopée. Les problèmes d'allocation de fréquences qui se posent en bande P ne permettent pas d'espérer de résolutions meilleures que 25 m. L'estimation de la hauteur de la forêt à partir de données spatiales ne

peut donc pas utiliser l'optimisation temps-fréquence, mais peut s'effectuer par des méthodes d'un autre type, basées sur une hypothèse de la valeur du coefficient d'extinction moyen. La diminution du SNR induit en revanche un biais opposé à celui de la dégradation de la résolution, qui se traduit par une surestimation de la hauteur plus faible à cette fréquence qu'en bande X. De même qu'à plus haute fréquence, l'annulation de ce biais nécessite la compensation de la décorrélation du signal interférométrique. Remarquons cependant qu'à cette fréquence, les effets de l'altération de la qualité de ces deux paramètres système sur l'estimation de la hauteur peuvent se compenser partiellement.

Conclusion générale et perspectives

La cartographie de la biomasse continentale contenue dans les forêts est une donnée importante pour la quantification des processus de transfert impliqués dans le cycle du carbone qui gouverne en grande partie l'évolution du climat. Les techniques spatiales radar sont très adaptées à la quantification de la biomasse sur l'ensemble des surfaces continentales car elles garantissent une indépendance aux conditions météorologiques ainsi que la possibilité de produire des séries temporelles sur une même région du globe. Des travaux antérieurs ont montré que l'estimation de la biomasse au travers de la hauteur des forêts avec la technique PolInSAR était possible en bande L, en supposant que la forêt possède les propriétés d'un volume de particules orientées aléatoirement. Ce travail de thèse a été consacré dans un premier temps à l'évaluation du potentiel de la technique PolInSAR aux fréquences extrêmes du spectre généralement utilisé (bandes X et P) pour l'estimation de la biomasse de forêts de pins et dans un second temps à une étude de la robustesse de l'extraction de paramètres en conditions spatiales.

La technique PolInSAR s'est tout d'abord avérée efficace pour l'estimation de la hauteur des bâtiments et pour la caractérisation des surfaces agricoles de type "blé" en bande X. Sur la végétation, les rétrodiffuseurs sont essentiellement constitués par le feuillage à cette fréquence et c'est pour cette raison que l'analyse polarimétrique des surfaces agricoles permet la discrimination des différents types de culture, caractérisés par différentes densités de feuillage. L'estimation de la hauteur de la forêt en bande X a été possible car la présence de trous dans la canopée augmente la puissance de la contribution du sol reçue dans les canaux co-polaires, ce qui a pour effet d'augmenter la dispersion verticale des centres de phase polarimétriques. La forêt peut être modélisée par un volume de particules orientées aléatoirement caractérisé par un coefficient d'extinction moyen élevé lié à une faible profondeur de pénétration des ondes radar dans la canopée. Cependant, la procédure d'inversion doit prendre en compte une faible décorrélation du signal interférométrique du volume générée par les variations de la hauteur de la canopée au sein d'une fenêtre d'estimation. La hauteur peut être obtenue précisément en supposant un coefficient d'extinction moyen de l'ordre de 2 dB/m sur une forêt de pins. Ce paramètre est peu sensible à la hauteur lorsqu'il est élevé car une variation de 0,5 dB/m n'induit qu'une erreur inférieure au mètre sur l'estimation de la hauteur de la forêt. Il a été montré que même si l'amplitude de variation de l'angle de visée sur l'ensemble du spectre en azimut était restreinte en bande X, une analyse temps-fréquence permettait de diminuer le biais lié à la présence de la contribution du sol dans le canal HV et d'accroître légèrement la précision de l'inversion.

En bande P, la contribution du sol est présente dans tous les canaux polarimétriques car la profondeur de pénétration des ondes radar dans la canopée est importante. De manière globale, les ondes interagissent avec l'ensemble de la forêt, mais la mesure de la hauteur des centres de phase polarimétriques a révélé des relations plus complexes entre les mécanismes élémentaires de

rétrodiffusion et des éléments structuraux de la forêt, qui évoluent au cours du temps. Comme l'ont mentionné des études précédentes au sujet de l'information radiométrique, cette fréquence est particulièrement adaptée à l'analyse de la forêt car d'une part, l'anisotropie polarimétrique est fortement corrélée avec la biomasse aérienne et d'autre part, la technique PolInSAR permet d'estimer la hauteur de la forêt avec une précision satisfaisante. La procédure d'inversion en bande P présente une plus grande robustesse que l'inversion de type RVoG utilisée à plus haute fréquence car les contributions du sol et de la canopée peuvent être séparées par analyse temps-fréquence grâce à une forte variabilité de l'angle de visée en azimut. Cette méthode permet de prendre en compte la structure orientée du volume et une cohérence du sol inférieure à 1, ce qui diminue considérablement l'erreur associée à l'estimation de la hauteur du sol dont dépend essentiellement la précision de l'inversion. Notons également que la technique développée dans cette étude s'avère très prometteuse en mode dual-pol pour un choix judicieux des polarisations (HH/HV ou HH/VV).

Le potentiel de l'estimation de la biomasse à partir de données spatiales, où le SNR est plus faible et la résolution est moins bonne que dans le cas aéroporté, a ensuite été évalué à différentes fréquences. Il apparaît tout d'abord que la relation entre l'anisotropie polarimétrique et la biomasse est peu affectée par la dégradation de la résolution et devient critique dans le cas d'une acquisition par un système radar spatial possédant un $NE\sigma_0$ supérieur à -15 dB. L'inversion de la hauteur de la forêt avec des données PolInSAR n'est pas perturbée de la même manière en bandes X, L et P par l'altération des paramètres système en conditions spatiales. Le biais généré par la diminution du SNR est plus important en bande X et conduit à une surestimation de la hauteur de la forêt. En revanche, le signal interférométrique devient plus sensible à la dégradation de la résolution à mesure que la fréquence diminue car l'intervalle vertical sur lequel les rétrodiffuseurs sont localisés augmente. La dégradation de la résolution, qui a été quantifiée pour des tailles de cellule de résolution allant jusqu'à 15 m, génère un biais sur l'extraction de paramètres qui se traduit par une sous-estimation de la hauteur de la forêt ainsi qu'une réduction des performances de l'optimisation temps-fréquence dont dépend la qualité de l'inversion en bande P.

Les exigences sur la qualité du système pour l'utilisation d'un satellite émettant dans le domaine des hautes fréquences concernent donc essentiellement le SNR. Notons toutefois qu'une caractérisation précise des données autorise une correction de la décorrélation du signal interférométrique et par conséquent d'effectuer une inversion non-biaisée à partir de données PolInSAR. De plus, en conditions spatiales, le problème de la décorrélation temporelle liée principalement au mouvement des feuilles induit par le vent entre deux acquisitions est susceptible d'affecter significativement le potentiel de la bande X et de la bande L, où les rétrodiffuseurs sont respectivement constitués par le haut de la canopée et l'ensemble de la couronne formé par les branches primaires et secondaires. Ce biais sur l'extraction des paramètres physiques de la végétation peut être évité avec une acquisition mono-passe, comme il est prévu par la mission TandemX-SAR [Moreira 04].
La mise en orbite d'un système en bande P présente un fort potentiel pour l'estimation de la biomasse car ce paramètre est très lié à l'information radiométrique, polarimétrique et PolInSAR. Un des problèmes rencontrés à cette fréquence est la limitation de la résolution pour des raisons d'allocation de fréquences. L'estimation de la hauteur des forêts à partir de données spatiales doit alors utiliser des techniques plus simples, basées sur une hypothèse de la valeur du coefficient d'extinction moyen. Également, l'interaction des ondes radar avec la ionosphère induisent

un phénomène de rotation de Faraday en bandes L et P. Cet aspect n'a pas été abordé dans ce travail car il a déjà été traité dans des travaux antérieurs [Freeman 04a], [Freeman 04b], qui montrent qu'une estimation juste de la matrice de rétrodiffusion nécessite une correction de cet effet, dont l'intensité est proportionnelle à la racine carrée de la longueur d'onde du rayonnement émis (il est plus important en bande P qu'en bande L).

En ce qui concerne les perspectives de ce travail de thèse, la validation de la modélisation de la forêt proposée à différentes fréquences nécessite une analyse PolInSAR multi-fréquentielle de données acquises par d'autres systèmes radar aéroportés sur d'autres types de forêts, comme par exemple des forêts tropicales.

Également, une évaluation plus complète de la bande X pour l'estimation de la hauteur de la forêt requiert la mesure de la précision de l'inversion à partir de la cohérence interférométrique de tous les canaux polarimétriques et l'analyse de l'influence de la densité de la canopée sur la dispersion verticale des centres de phase polarimétriques, car ce paramètre conditionne fortement les performances de l'inversion.

La classification de la forêt à partir de données PolInSAR, qui a déjà été abordée en bande L [Ferro-famil 03a], [Lee J.-S. 05], s'avère très prometteuse en bande P avec l'utilisation supplémentaire de l'information radiométrique et de l'information polarimétrique, car le croisement de ces techniques indépendantes devrait augmenter la précision de l'estimation de la biomasse.

Enfin, dans l'hypothèse de la mise en orbite d'un système radar en bande P, la détection et la localisation des mécanismes de rétrodiffusion les plus stables en fonction du temps avec la méthode des "permanent scatterers" [Ferreti 01] et des mécanismes directionnels avec une analyse du même type que celle qui est utilisée pour la caractérisation des "coherent scatterers" sur les zones urbaines [Zandona-Schneider 05] constitue un domaine à explorer car la distribution spatiale de tels rétrodiffuseurs (mécanisme de double rebond) est un indicateur de la structure spatiale de la forêt et de la biomasse qu'elle contient.

Bibliographie

[Askne 97] J. I. H. Askne, P. B. G. Dammert, L. M. H. Ulander, G. Smith, "C-Band Repeat-Pass Interferometric SAR Observations of the Forest," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 35, No. 1 pp. 25-35, January 1997.

[Baghdadi 04] N. Baghdadi et al., "Discrimination potential of X-band polarimetric SAR data, " *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 00, pp. 1-10, 2004.

[Bamler 94] R. Bamler, P. Hartl, "Synthetic Aperture Radar Interferometry, " *Inverse Problems* , Vol. 14, pp. R1-R54, 1998.

[Beaudoin 94] A. Beaudoin et al., "Retrieval of Forest Biomass from SAR Data," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 14, pp. 2777-2296, 1994.

[Boutry 01] J.-M. Boutry, D. le Coz, J.-P. Bruyant, "Instrumentation Embarquée de la Station Expériementale RAMSES," *IEEE Onde électrique*, Vol.74, No. 1, pp. 1-7, November 1994.

[Brandfass 01] M. Brandfass, C. Hofmann, J.C. Mura, K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry as applied to fully polarimetric rain forest data, " *Proceedings of IGARSS 01.*, Vol.6, pp. 2575-2577, Sydney, Australia, 2001.

[Castel 00] T. Castel et al., "Deriving Forest Parameters for Backscatters Models Using the AMAP Architectural Plant Model," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.39, No. 3, pp. 571-583, 2000.

[Champion 95] I. Champion, "Mesures de structures des pins sur des arbres de 25 ans - parcelle du bray," *Document interne*, INRA Ephyse Bordeaux, October 1995.

[Cloude 95] S. R. Cloude, E. Pottier, "Concept of Polarization Entropy in Optical Scattering," *Optical Engineering*, Vol.34, No. 6, pp. 1559-1610, 1995.

[Cloude 96] S. R. Cloude, E. Pottier, "A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.34, No. 2, pp. 498-518, September 1996.

[Cloude 97] S. R. Cloude, E. Pottier, "An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.35, No. 1,

pp. 68-78, January 1997.

[Cloude 98] S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR Interferometry," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.36, No. 5, pp. 1551-1565, September 1998.

[Curlander 91] J. C. Curlander, R. N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar : Systems and Signal Processing," *Wiley series in remote sensing*, 1991.

[Dubois-Fernandez 92a] P. C. Dubois, E. Rignot, J. J. van Zyl, "Direction Angle Sensitivity of Agricultural Field Backscatter with AIRSAR Data," *Proceedings of IGARSS 92*, pp. 1680-1682, 1992.

[Dubois-Fernandez 92b] P. Dubois-Fernandez, D. Evans, J. J. van Zyl, "Approach to Derivation of SIR-C Science Requirements for Calibration ,"*IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.30, No. 6, pp. 1145-1149, november 1992.

[Dubois-Fernandez 04] P. Dubois-Fernandez et al., "The ONERA RAMSES SAR : status in 2004," *Proc. RADAR 2004 symposium*, Toulouse, October 2004.

[Dubois-Fernandez 05] P. Dubois-Fernandez, X. Dupuis, F. Garestier,"PolInSAR calibration of deramp-on-receive system : example with the RAMSES airborne system," *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 31, No. 1, pp. 112-121, 2005.

[Ferreti 01] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, "Permanent Scatterers in SAR Interferometry," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, pp. 8-20, January 2001.

[Ferro-famil 03a] L. Ferro-Famil, E. Pottier, P. Lundsom, R. Moshammer, K.P. Papathanassiou, " Forest Mapping and Classification Using L-Band POLINSAR Data",*Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2003.

[Ferro-famil 03b] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, W.-M. Boerner, "Scene Characterization Using Subaperture Polarimetric SAR Data," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.41, No. 10, pp. 2264-2276, October 2003.

[Ferro-famil 05] L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, "Nonstationnary natural media analysis from polarimetric SAR data using a two-dimensional time-frequency decomposition approach," *Canadian Journal of Remote sensing.*, Vol.31, No. 1, pp. 21-29, febuary 2005.

[Floury 97] N. Floury et al., "On the Coupling of Basckscatter Models with Tree Growth Models. Part2 : RT modelling of forest backscatter," *Proceedings of IGARSS 97*, Singapore, 1997.

[Flynn 02] T. Flynn, M. Tabb, R. Carande, "Estimation of Coherence Shapes in Polarimetric SAR Interferometry," *in Proc. AIRSAR Earth Sciences and Applications Workshop*, Pasadena, 2002.

[Freeman 93] A. Freeman, "The effects of noise on polarimetric SAR data, ",*Proceedings of IGARSS 93*, Vol. 2, pp. 799-802, Tokyo, Japan, 1993.

[Freeman 04a] A. Freeman, S. Saatchi, "On the Detection of Faraday Rotation in Linearly Polarized L-Band SAR Backscatter Signatures, " *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.412, No. 8, pp. 1607-1616, august 2004.

[Freeman 04b] A. Freeman, "Calibration of Linearly Polarized Polarimetric SAR Data Subject to Faraday Rotation, " *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.412, No. 8, pp. 1617-1624, august 2004.

[Gabriel 88] A. Gabriel, R. Goldstein, "Crossed orbit interferometry : theory and experimental results from SIR-B, " *International Journal of Remote Sensing*,Vol.9, No. 5, pp. 857-872, 1988.

[Garestier 04a] F. Garestier, P. Dubois-Fernandez, X. Dupuis, P. Paillou, "Influence of the Window Size on the Accuracy of the Interferometric Phase Estimation," *Proceedings of RADAR 04*, Toulouse, France, October 2004.

[Garestier 04b] F. Garestier, P. Dubois-Fernandez, K. Papathannassiou et I. Hajnsek, " Analysis of High Resolution Single-Pass Polarimetric and Interferometric Data ," *Proceedings of BioGeoSAR 2004*, Innsbruck, Austria, 2004.

[Garestier 05a] F. Garestier, P. Dubois-Fernandez, K. Papathannassiou et I. Hajnsek, " Analysis of Forest Parameters and Agricultural Field Structure from High Resolution PolInSAR X Band Data ", *Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2005.

[Garestier 05b] F. Garestier, P. Dubois-Fernandez, X. Dupuis et P. Paillou, " PolInSAR Analysis of Pine Forest at L and P Band on High Resolution Data, " *Proceedings of IGARSS 05*, Seoul, Korea, 2005.

[Garestier 05c] F. Garestier, P. Dubois-Fernandez, X. Dupuis, P. Paillou et I. Hajnsek, " PolInSAR Analysis of X-Band Data over Vegetated and Urban Areas ," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 44, No. 2, pp. 356-364, Febuary 2006.

[Gatelli 94] F. Gatelli et al., "Wavenumber Shift in SAR Interferometry," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.32, No. 4, pp. 855-865, July 1994.

[Graham 74] L. Graham, "Synthetic Interferometer Radarfor Topographic Mapping, " *Proceedings of IEEE*, Vol.62, No. 6, pp. 763-768, 1974.

[Guillaso 03] S. Guillaso, L. Ferro-Famil, A. Reigber, E. Pottier, " Urban Area Analysis Based on ESPRIT/MUSIC Methods Using Polarimetric Interferometric SAR, " *Proceedings of URBAN 03*, Berlin, Germany, may 2003 (Invited Paper).

[Guyon 04] D. Guyon, C. Meredieu, A. Bosc, A. Kuszewski, F. Bernier, " Inventaire Dendrométrique sur le Dispositif Expérimental de Nezer à partirde 2003, " *Document interne*, INRA Ephyse Bordeaux, febuary 2004.

[Hajnsek 01] I. Hajnsek, "Inversion of Surface Parameters using Polarimetric SAR", PhD dissertation, Universität Jena, DLR Science Report ISSN 1434-8454, 2001.

[Hajnsek 04a] I. Hajnsek, K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "Investigating Orientation Effects over Agricultual vegetation with Polarimetric SAR Interferometry",*Proceedings of EUSAR 04*, pp. 439-442, Ulm, Germany, 2004.

[Hajnsek 04b] I. Hajnsek, S. R. Cloude, "PolInSAR for Agricultural Vegetation",*Proceedings of IGARSS 04.*, pp. 1224-1227, Anchorage, Alaska, 2004.

[Hajnsek 05] I. Hajnsek, S. R. Cloude, "Differential Extinction Estimation over Agricultural Vegetation from Pol-InSAR",*Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2005.

[Hardange 92] J. P. Hardange, Ph. Lacomme, J.-C. Marchais, "Radars aéroportés et spatiaux," *Masson*, 1992.

[Hensley 01] S. Hensley et al.,"First P-band results using the GeoSAR mapping system," *Proceedings of IGARSS '01.*, Vol. 1, pp. 126-128, Sydney, Australia, 2001.

[Lee H. 01] H. Lee et J-G. Liu, "Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry Using Ratio Coherence Imagery," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.39, No. 2, pp. 223-232, febuary 2001.

[Lee J.-S. 94] J-S Lee et al., "Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric ans Interferometric SAR Imagery," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 32, No. 5, pp. 1017-1028, September 1994.

[Lee J.-S. 99] J-S Lee et al., "Unsupervised Classification Using Polarimetric Decomposition and the Complex Wishart Classifier," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.37, No. 5, pp. 2249-2258, september 1999.

[Lee J.-S. 05] J.S. Lee, M.R. Grunes, T. Ainsworth, I. Hajnsek, T. Mette, K.P. Papathanassiou, "Forest Classification Based on L-band Polarimetric and Interferometric SAR Data",*Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2005.

[Le Toan 92] T. Le Toan, A. Beaudoin, J. Riom, D. Guyon, "Relating Forest Biomass to SAR Data," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.30, No. 2, pp. 403-411, march 1992.

[Lopez-Martinez 05] C. Lopez-Martinez, E. Pottier, "Study of the speckle noise effects over the eigen decomposition of POLSAR DATA", *Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2005.

[Martinez 00] J.-M. Martinez et al., "Measurements and modeling of vertical backscatter distribution," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, No. 2, pp. 710-719, march 2000.

[Mette 03] T. Mette et al., "Forest Biomass Estimation using Polarimetric SAR Interferometry", *Proceedings of PolInSAR 03*, Frascati, Italy, 2003.

[Mette 05] T. Mette et al., "Performance of Forest Biomass Estimation from Pol-InSAR and Forest Allometry over Temperate Forests", *Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2005.

[Moreira 04] A. Moreira, S. Riegger, "TanDEM-X : A TerreSAR-X Add-On Satellite for Single-Pass SAR Interferometry," *Proceedings of IGARSS 04*, Anchorage, Alaska, 2004.

[Mougin 93] E. Mougin, A. Lopez, M. A. Karam, A. K. Fung, "Effect of Tree Structure on X-Band Microwave Signature of Conifers," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 31, No. 3, pp. 370-381, may 1993.

[Mougin 99] E. Mougin et al., "Multifrequency and Multipolarization Radar Backscattering from Mangrove Forest," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 37, No. 1, pp. 94-101, january 1999.

[Oh 92] Y. Oh, K. Sarabandi and F.T. Ulaby, "An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 370-381, march 1992.

[Papathanassiou 99] K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR Interferometry", PhD dissertation, Universität Graz, DLR Science Report ISSN 1434-8454, 1999.

[Papathanassiou 01] K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.39, No. 11, pp. 2352-2363, november 2001.

[Papathanassiou 03a] K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "A 3-Stages Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry," *IEE Proceedings*, Radar, Sonar and Navigation, Vol.150, No. 03, pp. 125-134,june 2003.

[Papathanassiou 03b] K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "The Effect of Temporal Decorrelation onthe Inversion of Forest Parameters from PolInSAR Data," *Proceedings of IGARSS 03*, Toulouse, France, July 2003.

[Papathanassiou 04] K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "Forest Height Estimation using Dual-Pol InSAR Configurations," *Proceedings of EUSAR 04*, Ulm, Germany, May 2004.

[Papathanassiou 05] K. P. Papathanassiou, I. Hajnsek, Helmut Rott, Thomas Nagler, "Polarimetric SAR Interferometry for Snow Cover Parameter Estimation", *Proceedings of*

PolInSAR 05, Frascati, Italy, 2005.

[Picard 04] G. Picard, T. Le Toan, S. Quegan, "A Three-Dimentionnal Radiative Transfert Model applied to Ranging Scatterometer Measurements form a Pine Forest," *Waves in Random Media*, Vol.14, pp. 317-331, 2004.

[Porté 02] A. Porté et al., "Allometric Relationships for Branch and tree woody Biomass of Maritime Pine (Pinus Pinaster Ait.)," *Forest Ecology and Management*, Vol.158, pp. 71-83, 2002.

[Prati 93] C. Prati, F. Roca, "Improving Slant Range Resolution of stationnary objects with Multiple SAR Surveys," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.29, No. 1, pp. 135-144, january 1993.

[Reigber 97] A. Reigber, "Multitemporale Analyse der Kohärenz von SAR Daten," *Internal Report DLR No. 551-6/1997*, Diploma thesis, University Constance, 1997.

[Reigber 00] A. Reigber, A. Moreira, "First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multi Baseline L Band Data," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.38, No. 5, pp. 2142-2152, september 2000.

[Reigber 01] A. Reigber, "Airborne Polarimetric SAR Tomography," *DLR research report No. 2002-2*, PhD thesis, University Stuttgart, 2001.

[Seymour 94] M. S. Seymour, I.G. Cumming, "Maximum likelihood estimation for SAR interferometry, " *Proceedings of IGARSS 94.*, Vol.4, pp. 2272-2275, Pasadena, USA, 1994.

[Touzi 99] R. Touzi et al., "Coherence Estimation for SAR Imagery," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.37, No. 1, pp. 135-149, january 1999.

[Treuhaft 96] R. N. Treuhaft, S. Madsen, M. Moghaddam, J. J. van Zyl, "Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Data," *Radio Science*, Vol.31, pp. 1449-1495, december 1996.

[Treuhaft 99] R. N. Treuhaft, S. R. Cloude, "The Structure of Oriented Vegetation from Polarimetric Interferometry," *Radio Science*, Vol.37, No. 5, pp. 2620-2624, 1999.

[Treuhaft 00] R. N. Treuhaft, P. Siqueira, "Vertical structure of vegetated land surfaces from Interferometric and Polarimetric radar," *Radio Science*, Vol.35, No. 1, pp. 141-177, 2000.

[Ulaby 43] F. T. Ulaby, M. C. Dobson, "HANDBOOK of Radar Scattering Statistics for Terrain," *Artech House*, 1943.

[Williams 99] M. L. Williams, "Prediction and Observation of SAR Clutter from Vegetation Canopies," *Proceedings of IGARSS 99*, pp. 1983-1985, Hamburg, Germany, 1999.

[Williams 00] M. L. Williams, "Simulating Low Frequency SAR Clutter from a Pine Forest," *Proceedings of EUSAR 00*, pp. 149-152, Munich, Germany, May 2000.

[Zandona-Schneider 05] R. Zandona-Schneider, K. Papathanassiou, I. Hajnsek, A. Moreira, "Analysis of Coherent Scatterers over Urban Areas", *Proceedings of PolInSAR 05*, Frascati, Italy, 2005.

[Zebker 86] H. A. Zebker, R. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric SAR observations, " *Journal of Geophysical Research*, Vol.91, No. B5, pp. 4993-4999, 1986.

[Zebker 92] H. A. Zebker, J. Villasenor, "Decorrelation in Interferometric Radar Echoes," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.30, No. 5, pp. 950-959, september 1992.

Table des figures

1 Répartition mondiale des différents types de forêts. 2

1.1 Géométrie d'acquisition d'un système SAR. 6
1.2 Définition du référentiel dans lequel les positions de l'antenne et de la cible sont exprimées. 8
1.3 Chaîne de traitement SAR dans le cas d'un rétrodiffuseur ponctuel. 10
1.4 Géométrie d'acquisition d'un signal interférométrique. 12
1.5 Géométrie d'acquisition de signaux interférométriques provenant d'une même case distance mais de différentes hauteurs. 14
1.6 Précision de la phase interférométrique en fonction de la cohérence pour plusieurs tailles de fenêtre d'après [Seymour 94]. 16
1.7 Illustration du décalage fréquentiel en distance des spectres de deux images interférométriques, induit par la différence d'angle d'incidence des deux antennes, projeté au sol, dans le cas où la scène ne présente aucune topographie (ε=0). . . 18
1.8 Variation de la ligne de base normale $B_\perp$ en fonction de la distance dans le cas aéroporté. 19
1.9 Ellipse de polarisation représentée dans le plan $\{h, v\}$. a et b sont les grand et petit axes de l'ellipse, Ψ et χ sont les angles d'orientation et d'ellipticité. 20
1.10 Représentation de spectres de probabilités apparentes P_k caractéristiques. 26
1.11 Représentation schématique des 8 régions utilisées pour effectuer la classification en entropie-alpha. 28
1.12 Illustration de la comparaison de l'information contenue dans des données polarimétriques, interférométriques et interféro-polarimétriques pour l'exemple de la forêt. 29
1.13 Système RAMSES visible dans l'ouverture de la porte sur le flanc du Transall (à gauche) et baies numériques permettant la gestion et le contrôle de l'acquisition durant le vol (à droite). 32
1.14 Diagramme synoptique du système RAMSES. (Figure issue de [Dubois-Fernandez 05].) 33
1.15 Stratégie initiale de calibration d'un jeu de données PolInSAR. Le couple interférométrique correspondant au canal HH est d'abord calibré, puis une calibration polarimétrique est effectuée sur les deux jeux polarimétriques. (Figure issue de [Dubois-Fernandez 05].) 35
1.16 Données PolInSAR bande X RITAS acquise selon une trajectoire Nord-Sud. A gauche est représenté le σ_0 polarimétrique normalisé de la base de Pauli en RGB. A droite figure un MNE polarimétrique dont la hauteur est codée en RGB dans la base lexicographique. 37
1.17 Carte de répartition des différents types de végétation sur les données RITAS. . . 38

1.18 Cartes de cohérence interférométrique (comprise entre 0 et 1) correspondant respectivement aux canaux polarimétriques HH, HV, VH et VV. 39
1.19 Couples de cartes de cohérence polarimétrique (comprise entre 0 et 1) correspondant aux deux antennes interférométriques entre les canaux HH et VV (à gauche) et entre les canaux HV et VH (à droite). 40
1.20 Analyse en entropie/alpha (à gauche) et en entropie/anisotropie (à droite) de différents types de surfaces naturelles et d'une zone urbaine. 41
1.21 Image radiométrique du canal HH et cartes d'angle alpha, entropie et anisotropie calculées sur les données RITAS. 42
1.22 Écart-type de la phase de la cohérence interférométrique en fonction de la cohérence pour plusieurs tailles de fenêtre, estimé à partir de simulations numériques (traits pleins). Un ajustement valide pour des valeurs de cohérence supérieures à 0.5 est superposé (tirets gras). Les courbes en pointillés sont obtenues à l'aide de la relation 1.42, représentées également sur la figure 1.6 44
1.23 Représentation de la cohérence interférométrique calculée pour des états de polarisation similaires aux deux extrémités de la ligne de base (baseline co-polar) dans le plan complexe pour plusieurs types de surfaces. 46
1.24 Localisation des centres de phase correspondant aux mécanismes de rétrodiffusion de surface et de double rebond sur un bâtiment, de leur position dans l'image SAR et de leur hauteur. 47
1.25 MNE polarimétrique d'une zone urbaine codé en RVB dans la base lexicographique (rouge : HH, vert : HV et bleu : VV). Profils spatiaux de hauteur, cohérence et σ_0 normalisé correspondant aux polarisations de la base de Pauli codée en RGB (rouge :HH+VV, vert :HV et bleu : HH-VV) effectués en distance sur une zone contenant un lampadaire. 49
1.26 Représentation schématique de l'effet du filtrage du spectre Doppler de l'image SAR sur la valeur de l'angle virtuel de visée et de son intervalle de variation. . . 50
1.27 Hauteurs des centres de phase polarimétriques de la base de Pauli correspondant à différents angles d'observation dans le contexte d'une grue. La couleur rouge correspond à la polarisation HH+VV, le vert à HV, et le bleu à HH-VV. 51

2.1 Parcelles de pins de la forêt de Nezer dont les âges sont, de gauche à droite, égaux à 3, 6, 10 et 29 ans. 54
2.2 A gauche : variation de la biomasse aérienne (noir), du bois des troncs (rouge), de l'écorce des troncs (bleu), du bois des branches (vert) et du feuillage (violet) en fonction de l'âge des parcelles de la forêt de Nezer. A droite : variation de la hauteur moyenne (rouge), de la hauteur maximale (noir) et de la hauteur mesurée à la première branche (bleu) en fonction de l'âge des parcelles de la forêt de Nezer. Figures issues de [Guyon 04]. 55
2.3 Densité d'arbres en fonction de la hauteur des parcelles. 56
2.4 Carte de σ_0 polarimétrique normalisé, associé à la base lexicographique, des données acquises en bande L sur la forêt de Nezer. La passe est effectuée dans la direction Est-Ouest. 57
2.5 σ_0 (en dB) en fonction de l'âge des parcelles calculé pour les polarisations linéaires HH, HV et VV 58
2.6 Représentation spatiale de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie calculés sur une fenêtre 25x25. 59

2.7 Moyenne de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie sur toute la parcelle en fonction de la hauteur de celle-ci. 60
2.8 Volume de particules orientées aléatoirement sur une surface de sol. 61
2.9 Représentation schématique des cohérences interférométriques $\gamma(\mathbf{w})$ observables et des cohérences interférométriques "théoriques" de la contribution du volume de particules orientées aléatoirement γ_v et du sol $e^{j\phi_0}$. 63
2.10 Illustration de la procédure d'inversion avec le modèle RVoG sur des données simulées d'une forêt de pins (fournies par Mark Williams du DSTL, Malvern, GB). Les cohérences interférométriques correspondant aux bases de Pauli et lexicographique sont représentées en couleur et les cohérences optimales en noir. γ_v est calculé pour des hauteurs allant de 0 à 20 m et un coefficient d'extinction moyen variant de 0,3 à 0,8 dB/m (représenté en jaune). 65
2.11 Estimation du niveau du sol sur les données simulées en bande L. 66
2.12 Estimation de la hauteur de la forêt h_v sur les données simulées en bande L. . . . 67
2.13 Profils verticaux de puissance rétrodiffusée dans une forêt de sapins (15 - 20 m de hauteur) obtenus par tomographie polarimétrique [Reigber 00] sur des données multi ligne de base en bande L correspondant aux canaux polarimétriques de la base de Pauli et de la base lexicographique (figure issue de [Reigber 01]). 67
2.14 Analyse en entropie/alpha de différents types de surfaces naturelles et d'une zone urbaine sur les données RITAS. 69
2.15 Représentation schématique d'un volume de particules verticalement orientées reposant sur une surface de sol impénétrable. 70
2.16 Positions possibles de la cohérence interférométrique dans le plan complexe correspondant aux trois polarisations de la base lexicographique prédites par le modèle OVoG. Les simulations sont effectuées pour les polarisation HH, HV et VV pour un nombre d'onde vertical k_z=1.5, une hauteur h_v=2 m et des coefficients d'extinction moyens σ_{HH}=0,5 dB/m et σ_{VV}=5 dB/m 71
2.17 Représentation de la valeur du σ_0 et de la cohérence interférométrique des canaux polarimétriques associés à la base lexicographique calculés sur une surface nue (à gauche) et de la végétation de type blé (à droite). 72
2.18 Représentation des rapports de puissances du sol et du volume et des positions dans le plan complexe des cohérences interférométriques associés aux trois polarisations linéaires, dans l'hypothèse d'un volume de particules orientées verticalement reposant sur une surface de sol (modèle OVoG). 73
2.19 Représentation et localisation de la forêt de pins sur les cartes de σ_0 polarimétrique et de MNE polarimétrique représentés en entier sur la figure 1.16. 75
2.20 Photographies de la forêt de pins étudiée (prises en mars 2005). 75
2.21 Histogrammes de hauteurs des centres de phase polarimétriques relatifs aux polarisations HH et HV, et de hauteurs du sol calculées à l'aide du modèle RVoG (à gauche). Histogrammes de cohérence associées aux canaux polarimétriques HH et HV (à droite). 76
2.22 Histogrammes de hauteur des centres de phase polarimétriques relatifs aux polarisations HH, HV et VV. 77
2.23 Variations de la hauteur de la canopée au sein d'une même fenêtre de cohérence en bande X. 78

2.24 Migration de la cohérence interférométrique d'un volume aléatoire sur une surface de sol dans le plan complexe correspondant à plusieurs rapports sol/volume lorsque la décorrélation temporelle γ_t augmente. 79
2.25 Histogrammes de hauteur de la forêt h_v, calculées pour plusieurs valeurs de coefficient d'extinction moyen allant de 0,4 à 2 dB/m. 80
2.26 Valeurs moyennes des hauteurs de la forêt estimées pour plusieurs valeurs de coefficients d'extinction moyens (à gauche). Erreur de l'estimation de la hauteur en fonction de celle qui est associée au coefficient d'extinction moyen (à droite). . 81
2.27 Histogrammes de hauteur des centres de phase polarimétriques et du sol (à gauche) et des cohérences (à droite), avant (trait plein) et après (pointillés) optimisation temps-fréquence. 81
2.28 Représentation spatiale de la différence de hauteur entre les centres de phases associés aux polarisations HV et HH avant (à gauche) et après (à droite) l'optimisation temps-fréquence. 82
2.29 Identification du sous-look maximisant la distance verticale entre les centres de phase polarimétriques sur une partie de la forêt. 83
2.30 Valeurs moyennes des hauteurs de la forêt estimées pour plusieurs valeurs de coefficients d'extinction moyens après optimisation temps-fréquence. 84
2.31 σ_0 (en dB) en fonction de l'âge des parcelles pour les polarisations HH, HV et VV 85
2.32 Corrélation entre les σ_0 des polarisations HH et HV. 85
2.33 Données polarimétriques acquises en bande P sur la forêt de Nezer : carte de Sigma 0 polarimétrique normalisé associé à la base lexicographique. La passe est effectuée dans la direction Est-Ouest. 86
2.34 Représentation spatiale de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie calculés sur une fenêtre 25 x 25. 87
2.35 Moyenne de l'angle alpha, de l'entropie et de l'anisotropie sur la parcelle en fonction de la hauteur moyenne. 88
2.36 Inversion de la hauteur des parcelles à partir de l'anisotropie polarimétrique. . . 89
2.37 Représentation RGB de la carte des cohérences et du MNE polarimétriques calculés sur la forêt de Nezer correspondant à la base lexicographique (HH est associé à la couleur rouge, HV, au vert et VV au bleu). La hauteur des centres de phase est comprise entre 0 et 30 m et la cohérence est représentée entre 0 et 1. 90
2.38 Représentation de la différence de hauteur des centres de phase polarimétriques et du niveau d'une surface de sol en fonction de la hauteur des parcelles. 91
2.39 Histogrammes de hauteurs des centres de phase polarimétriques estimées sur des parcelles de différentes hauteurs. 92
2.40 Diamètre des troncs à 1,3 m du sol ("Diameter at Breast Height") en fonction de la hauteur moyenne des parcelles. 93
2.41 Sur quatre parcelles de pins de hauteurs différentes (4, 18, 22 et 24 m) : histogrammes de diamètres des branches primaires à 10 cm de l'insertion dans le tronc (à gauche) et histogrammes d'angles tronc-corde ϕ mesurés sur l'ensemble des peuplements (à droite). Ces mesures ont été fournies par I. Champion et A. Porté (INRA). 94
2.42 Mesures de diamètre et de longueur des branches de différents âges sur quelques pins d'une parcelle de 25 ans (Le Bray). Ces figures sont fournies par I. Champion (INRA) et proviennent de [Champion 95]. 95

2.43 Hauteurs et cohérences des centres de phase polarimétriques estimés sur deux jeux de données correspondant à deux lignes de base spatiales et temporelles différentes. 96
2.44 Représentation de la cohérence interférométrique associée à plusieurs canaux polarimétriques dans le plan complexe, calculée sur toutes les fenêtres spatiales d'une parcelle. La figure de gauche correspond à une parcelle de 12 m et celle de droite à une parcelle de 19 m. 98
2.45 Illustration de la validité de la modélisation d'une parcelle de 19 m par un volume de particules verticalement orientées reposant sur une surface de sol dont la cohérence est inférieure à 1. 99
2.46 Estimation de la hauteur des parcelles à l'aide du modèle RVoG pour différentes valeurs du coefficient d'extinction moyen σ, à partir de la mesure de la phase interférométrique du sol sur une surface nue du proche voisinage et de la cohérence interférométrique du canal VV (à gauche) et HV (à droite). 100
2.47 Illustration de la proportion entre l'épaisseur de la couronne et la hauteur de la forêt sur une parcelle de pins de la forêt de Nezer. 101
2.48 Représentation schématique d'un volume de particules orientées aléatoirement d'épaisseur e_c surélevé par rapport à une surface de sol. 101
2.49 Croisement des mesures d'épaisseur de la couronne et de hauteur de la forêt fournies par I. Champion et A. Porté (INRA) (à gauche). Représentation de la structure de la forêt modélisée en fonction de la hauteur de la parcelle (à droite). 102
2.50 Estimation de la hauteur des parcelles à l'aide du modèle RVoG pour différentes valeurs du coefficient d'extinction moyen σ, à partir de la mesure de la phase interférométrique du sol sur une surface nue du proche voisinage et de la cohérence interférométrique du canal VV (à gauche) et HV (à droite). 103
2.51 Cohérence et hauteur des centres de phase polarimétriques calculée sur 5 sous-looks, dont 3 sont indépendants, sur un trièdre et une surface nue (haut), une lisière de forêt et une parcelle entière (bas). Les pointillés indiquent la valeur du paramètre à pleine résolution. 104
2.52 Variation maximale de la hauteur des centres de phase polarimétriques parmi 5 sous-looks, dont 3 sont indépendants, en fonction de la hauteur des parcelles. . . 105
2.53 Résultat de l'inversion de la hauteur des parcelles en utilisant le modèle RVoG après optimisation temps-fréquence. 106
2.54 Différence entre la hauteur du sol estimée avec le modèle RVoG et la hauteur d'une parcelle de sol mesurée au centre des données. 107
2.55 Inversion de la hauteur des parcelles après optimisation temps-fréquence des contributions du sol et de la canopée. 108

3.1 Moyenne sur chaque parcelle de l'anisotropie calculée sur une fenêtre 25x25 en fonction de leur hauteur, pour des valeurs de $NE\sigma_0$ allant de -30 à 5 dB. 114
3.2 Norme de la cohérence interférométrique γ_{SNR} en fonction du SNR pour différentes tailles de fenêtre calculée à partir de simulations numériques (traits pleins) et d'un ajustement théorique de la relation 3.13 (pointillés). 115
3.3 Écart-type de la phase de la cohérence interférométrique γ_{SNR} en fonction du SNR pour différentes tailles de fenêtre calculé à partir de simulations numériques (traits pleins) et ajustement théorique obtenu en combinant la relation 1.42 et la relation 3.13 (pointillés). 116
3.4 Norme et écart-type de γ_{SNR} calculés dans le cas de deux signaux affectés chacun d'un bruit thermique indépendant pour plusieurs tailles de fenêtre. 117

3.5 Surestimation de la hauteur du volume en fonction du SNR dans le cas d'un volume de particules aléatoirement orientées de hauteur allant de 0 à 30 m associé à un coefficient d'extinction moyen égal à 0,5 dB/m (à droite) et 2 dB/m (à gauche). 118
3.6 Représentations spatiale et spectrale (fréquence centrale : f_c, fréquence Doppler : f_d) d'une image SAR à haute et faible résolution. La cellule de résolution est représentées en rouge et la fenêtre d'estimation en bleu. 119
3.7 Illustration de l'effet de la dégradation de la résolution sur l'intervalle d'angles de visée en azimut θ_{Az} et sur la taille de la cellule de résolution dans les deux directions. 120
3.8 Effet du filtrage : filtrage du spectre fréquentiel pour simuler différentes résolutions et estimation sur tous les pixels de la zone. La cellule de résolution est représentées en rouge et la fenêtre d'estimation en bleu. 121
3.9 Effet du fenêtrage : estimation de μ sur l'ensemble des fenêtres dont la taille N_R varie pour simuler différentes résolutions. La cellule de résolution est représentées en rouge et la fenêtre d'estimation en bleu. 122
3.10 Analyse de l'effet de la résolution sur l'anisotropie dans le cas de différentes parcelles de la forêt de Nezer en bande P. La taille des croix diminue lorsque la résolution est dégradée. 123
3.11 Analyse de l'effet de la résolution sur la cohérence associée aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion dans le cas de différentes parcelles de la forêt de Nezer en bande P. 125
3.12 Analyse de l'effet de la résolution sur la cohérence associée aux mécanismes élémentaires de rétrodiffusion dans le cas de différentes parcelles de la forêt de Nezer en bande L. 127
3.13 Analyse de l'effet de la résolution sur la cohérence des canaux polarimétriques HH et HV, dans le cas d'une forêt de pins en bande X. 128
3.14 Erreur sur l'estimation de la hauteur du volume en fonction de l'indicateur de l'effet de la résolution $|\gamma_{res}|$ dans le cas de volumes de particules orientées aléatoirement dont la hauteur varie de 0 à 30 m et dont le coefficient d'extinction moyen est égal à 0,5 dB/m. 129
3.15 Distance verticale maximale mesurée entre les centres de phase polarimétriques sur l'ensemble des parcelles de la forêt de Nezer lorsque la résolution est dégradée (à gauche) et après optimisation temps fréquence (à droite). 130
3.16 Fréquences du signal SAR utilisées pour les applications scientifiques. 130
3.17 Comparaison des propriétés polarimétriques de certaines parcelles basses de la forêt de Nezer entre les bandes L et P. 131
3.18 Comparaison de MNE polarimétriques concernant une partie de la forêt de Nezer. 132
3.19 Comparaison de la profondeur de pénétration des ondes radar dans la canopée à différentes fréquences et représentation qualitative de l'impact sur l'extraction de paramètres. Les cohérences interférométriques du sol et du volume sont localisées dans le plan complexe par un point rouge. 134

Glossaire

DBH : Diameter at Breast Height

MNE : Modèle Numérique d'Élévation

OVoG : Oriented Volume over Ground

PolInSAR : Interférométrie SAR Polarimétrique

RAMSES : RAdar Multi-Spectral pour l'Étude des Signatures

RITAS :Radar Imagerie pour les Thématiques Agricoles et de Sol

RVoG : Random Volume over Ground

SAR : Synthetic Aperture Radar (Radar à Synthèse d'Ouverture)

SNR : Rapport Signal à Bruit

THR : Très Haute Résolution