



Modélisation radar des couverts végétaux Applications à la télédétection de couverts forestiers et agricoles

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 18 octobre 2002

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Paul Sabatier – Toulouse III
(spécialité Télédétection)

par

Ghislain Picard

Composition du jury

Paul Combes	Professeur à l'Université Paul Sabatier, Toulouse	<i>Président</i>
Shaun Quegan	Professeur à l'Université de Sheffield, Royaume-Uni	<i>Rapporteur</i>
Walid Tabbara	Professeur à l'Université de Paris VI	<i>Rapporteur</i>
Marc Saillard	Professeur à l'Université de Marseille I	<i>Examineur</i>
Jean-Pierre Wigner	Chargé de recherche à l'INRA, Bordeaux	<i>Examineur</i>
Thuy Le Toan	Ingénieur de recherche CNRS au CESBIO	<i>Directeur de thèse</i>

Préparée au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO)
13 avenue du Colonel Roche, 31401 TOULOUSE

Remerciements

Cette thèse a été préparée au Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère ; je tiens à ce titre à remercier Jean Claude Menaut, directeur du CESBIO, pour son accueil et sa disponibilité.

Ma recherche a été encadrée par Thuy Le Toan. A sa grande expérience scientifique s'ajoute une capacité de prospection quasiment magique qu'elle m'a fait largement partager. Je la remercie aussi de m'avoir fait découvrir non seulement les aspects scientifiques du travail de recherche mais aussi tous les autres aspects. Enfin, je tiens particulièrement à exprimer mon admiration pour ses qualités humaines.

Je remercie Shaun Quegan et Walid Tabbara, rapporteurs de ma thèse, Marc Saillard et Jean-Pierre Wigneron d'avoir accepté de participer au jury ainsi que Paul Combes de l'avoir présidé.

Un grand merci à Malcolm Davidson et Nicolas Floury pour m'avoir laissé une place dans leur bureau mais surtout de m'avoir fait profiter de leur expérience scientifique et pour m'avoir permis de prendre du recul aux moments où il le fallait.

Merci à Thierry Castel et Yves Caraglio pour les nombreuses maquettes d'arbre issues d'AMAP.

Un grand merci également à Pierre Melon et Philippe Richaume pour les longues pauses café physiques et mathématiques (respectivement).

Merci à l'équipe informatique, Patrick Taberling, Antoine Grossoux et Gabriel Giordano pour m'avoir à de nombreuses reprises sorti des problèmes que savent poser les ordinateurs.

Merci à Laurent Kergoat, Philippe Maisongrande et à tous les membres du CESBIO.

Enfin, un merci particulier à Jen, François, Gaëtan, Sophie, Sarah, Lionel, Sébastien, Géraldine, Nicolas, Denis, Luc, Greg et Stéphane pour les petits coups de main.

Table des matières

Introduction	5
Notations	13
1 Modélisation radar des couverts végétaux	15
1.1 La mesure radar	16
1.2 Modélisation radar	18
1.2.1 Généralités	18
1.2.2 Les voies de modélisation	19
1.2.3 La théorie du transfert radiatif	20
1.2.4 L'approximation de Born modifiée	25
I Couverts forestiers	33
2 Modélisation radar des couverts forestiers	35
2.1 Caractérisation géométrique du milieu forestier	38
2.1.1 Le modèle de croissance AMAP.	39
2.1.2 Adaptation des maquettes AMAP à la modélisation radar.	40
2.2 Diffuseurs du milieu forestier	41
2.2.1 Caractéristiques électromagnétiques.	44
2.2.2 Cylindre fini	45
2.2.3 Cylindre généralisé.	48
2.2.4 Branches coniques	50
2.2.5 Branches courbes.	52
2.2.6 Cylindre hétérogène	53
2.2.7 Disque elliptique	55
2.2.8 Le sol	56

2.3	Modélisation par le transfert radiatif	59
2.3.1	Résolution par la méthode itérative. Modèles RT et RT3D	59
2.3.2	Résolution par la méthode Discrete Ordinate. Modèles DORT	69
2.4	Modélisation par l'approche cohérente	78
2.4.1	Application aux milieux bidimensionnels. Modèle BORN	80
2.4.2	Application aux milieux tridimensionnels. Modèle BORN3D	80
3	Rétrodiffusion des forêts. Interprétation des résultats de modélisation	85
3.1	Les sites d'étude et les jeux de données	88
3.1.1	Site des Landes	88
3.1.2	Site de Lozère	89
3.2	Impact de la structure tridimensionnelle	90
3.2.1	Profils verticaux de rétrodiffusion	90
3.2.2	Interférométrie	98
3.2.3	Coefficient de rétrodiffusion en bande C et L	101
3.3	Impact de la description des arbres	108
3.3.1	Descriptions des troncs	109
3.3.2	Comparaison entre les modèles RT et BORN bidimensionnel	113
3.3.3	Comparaison entre les maquettes	114
3.4	Diffusions multiples	116
3.4.1	Polarisation croisée	116
3.4.2	Copolarisations	123
II	Couvert de blé	127
4	Rétrodiffusion des couverts de blé. Interprétation des résultats de modélisation	129
4.1	Caractéristiques du blé et mesures radar	132
4.1.1	Campagne de Marestaing.	133
4.1.2	Campagne de Matera.	136
4.2	Modèle de premier ordre WheatBorn	141
4.2.1	Les diffuseurs du blé.	141
4.2.2	Description du modèle WheatBorn	143
4.3	Modèle d'ordre supérieur MUSCAT	146
4.3.1	Présentation du problème	147
4.3.2	L'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax	148
4.3.3	Discrétisation. Système linéaire fini	151

4.3.4	Résolution numérique.	153
4.3.5	Simulations	160
5	Analyse des données expérimentales	165
5.1	Atténuation	166
5.1.1	Mise en évidence expérimentale.	167
5.1.2	Atténuation due aux tiges.	168
5.1.3	Atténuation due aux feuilles et aux épis.	175
5.2	Rétrodiffusion	177
5.2.1	Rétrodiffusion en bande C	178
5.2.2	Autres fréquences	185
	Conclusions	189

Introduction

Depuis le lancement dans les années 70 des premiers satellites d'observation de la Terre, la diversité des capteurs s'est considérablement accrue. Aujourd'hui, les satellites observent la Terre sur une large gamme du spectre électromagnétique. Dans cette gamme, les longueurs d'onde centimétriques et décimétriques (micro-ondes) sont particulièrement adaptées à l'observation de la végétation car elles permettent de sonder l'intérieur du couvert végétal, et sont sensibles au contenu en eau et à la géométrie de la cible. Les capteurs micro-ondes actifs ont la capacité d'acquérir des données de jour comme de nuit et quelles que soient les conditions atmosphériques, ce qui constitue un atout pour le suivi temporel. Ces capteurs se déclinent en deux versions, les diffractomètres avec une forte résolution temporelle et une basse résolution spatiale plutôt adapté à l'observation de l'océanosphère et les capteurs radar à synthèse d'ouverture (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) avec une haute résolution spatiale mieux adaptés à l'observation de la biosphère.

Les principaux SARs spatiaux ainsi que leurs caractéristiques sont présentés dans le tableau 1. Les systèmes actuels opèrent en bande C (5.3GHz, 5.6cm de longueur d'onde) et diffèrent par les polarisations d'émission et de réception (horizontale ou verticale) et l'angle d'incidence. A l'avenir tous les systèmes seront polarimétriques et auront une agilité en incidence. Un SAR bande L (1.25GHz, 25cm de longueur d'onde) devrait être à nouveau disponible à partir de 2004. La disponibilité des données est donc assurée pour les prochaines années, et la multiplicité des

	Période	Configuration	Incidence	Résolution
ERS-1	1991-2000	C-VV	23°	25m
JERS-1	1992-1998	L-HH	35°	18m
ERS-2	1995-	C-VV	23°	25m
RADARSAT-1	1995-	C-HH	multiple	10m
ENVISAT/ASAR	2002-	C multipolarisations	multiple	> 10m
ALOS-PALSAR	2004-	L polarimétriques	multiple	> 7m
RADARSAT-2	2003-	C multipolarisations	multiple	> 3m

TAB. 1 – SARs spatiaux des 10 derniers années, et à venir.

configurations à venir est prometteuse. Mais l'utilisation opérationnelle des données issues de ces

capteurs est encore limitée. Les potentialités sont importantes car le contenu en information du signal radar est riche. Cependant, le signal radar résulte de nombreuses interactions complexes entre l'onde et le milieu naturel qu'il convient de bien comprendre avant de transformer les données en informations utiles.

L'objectif de la télédétection par système SAR est d'extraire du signal radar des paramètres de la surface. L'approche la plus largement utilisée est basée sur l'étude statistique des mesures. L'utilisation conjointe d'un jeu de données radar et de mesures sur le terrain permet de déterminer des lois statistiques reliant le signal radar aux paramètres d'intérêt. Mais cette approche pose des problèmes de généralisation. L'application des lois statistiques sur d'autres sites et à d'autres dates d'acquisition conduit, en général, à des erreurs importantes. Ce manque de robustesse est en partie lié à la complexité des mécanismes de diffusion, c'est à dire que le signal radar, quelle que soit la configuration, est sensible à un grand nombre de paramètres. Enfin, cette approche ne permet pas de comprendre les interactions entre l'onde et le milieu. Par conséquent, la généralisation à d'autres configurations radar ou la prospection de configurations mieux adaptées sont quasiment impossibles.

Il n'y a cependant pas d'alternative à l'approche statistique pour inverser le signal radar en paramètres. Toutefois, une approche plus fondamentale basée sur la modélisation physique permet d'améliorer la compréhension des mécanismes d'interaction entre l'onde radar et le milieu. Dans cette approche, l'objectif n'est pas d'inverser un modèle physique du milieu car la complexité et le nombre de paramètres mis en jeu rendent l'inversion pratiquement impossible. L'objectif est d'une part de comprendre les limites des modèles statistiques, et d'autre part de simuler des mesures radar dans des configurations ou conditions nouvelles. La modélisation doit répondre à deux questions fondamentales : *quels sont les paramètres du milieu qui influencent significativement le signal radar, et par quels mécanismes d'interaction ces paramètres interviennent ?* Dans le contexte de l'inversion, ces questions peuvent se reformuler : *quels paramètres peuvent être inversés, avec quelle sensibilité et dans quel cas ?*

L'objectif du travail présenté dans ce manuscrit est d'apporter des éléments de réponses à ces questions. Cependant, la modélisation des milieux végétaux se heurte à deux problèmes. Premièrement, la complexité du milieu pose un problème de mesure ou de caractérisation du milieu. Deuxièmement, le milieu ne peut pas être décrit dans toute sa finesse par les théories électromagnétiques actuelles, c'est à dire que les théories imposent des contraintes sur la caractérisation. Les travaux proposés consistent à allier ces deux aspects.

La description du milieu peut être améliorée, soit en utilisant des mesures différentes, plus riches, plus précises, soit en adaptant les modèles pour mieux prendre en compte des descriptions disponibles. En particulier, le couplage des modèles architecturaux de plantes avec les modèles

électromagnétiques existants suscite beaucoup d'intérêt depuis une dizaine d'années. Les modèles architecturaux développés par les "botanistes" fournissent des descriptions beaucoup plus précises et détaillées que les mesures statistiques réalisées auparavant par les "télé-détecteurs". Cependant, cette nouvelle approche pose le problème de l'adaptation des modèles architecturaux aux besoins de la télé-détection. La collaboration étroite des communautés est nécessaire.

Des théories électromagnétiques adaptées à la modélisation des milieux naturels ont été développées à partir de la fin des années 70. Les travaux de A. Ishimaru, J.A. Kong, L. Tsang, A.K. Fung, M. Karam et K. Sarabandi font référence dans le domaine. Ces travaux portent sur la diffusion des milieux aléatoires en s'appuyant sur deux théories : le transfert radiatif, et la théorie analytique des ondes (*analytical wave theory*). Plus récemment, avec le développement des moyens informatiques, des méthodes numériques "exactes" (méthode des moments, FDTD) ont été appliquées à la diffusion des surfaces (sol, et océan) et à la propagation dans le sol, mais sont encore inadaptées à la modélisation des couverts végétaux réalistes. Les bases théoriques sont donc aujourd'hui bien établies. Les améliorations envisageables actuellement ont pour but de prendre en compte un plus grand nombre d'interactions. Cependant, ces modèles ne répondent pas toujours au besoin de la télé-détection car soit le milieu est décrit trop imprécisément, soit les informations de sortie ne sont pas comparables aux mesures. Une voie intermédiaire entre le développement des théories électromagnétiques et la télé-détection "statistique" est nécessaire.

L'approche suivie dans ce travail repose sur les approches existantes en modélisation, et se propose d'améliorer les modèles selon deux axes, l'électromagnétisme et le réalisme du milieu modélisé, avec pour ambition d'allier les deux aspects. Pour cela, nous avons été conduit à développer ou améliorer plusieurs modèles de diffusion, chaque modèle étant adapté à un milieu (forêt ou blé) et à des situations spécifiques (configuration radar, particularité d'un site d'étude). Cette multiplicité des modèles est un inconvénient pour l'analyse des résultats, mais l'unification n'est pas possible à l'heure actuelle.

Ce travail s'inscrit en particulier dans le cadre de projets nationaux et européens visant à l'amélioration des modèles existants et à la détermination de leur domaine de validité. Le projet national CNES/DGA¹ "Modélisation radar du couvert forestier" terminé en 2001, visait à explorer les voies de modélisation sur une large gamme de fréquence (de la VHF à la bande X). Le projet "RASTA"² de l'Agence Spatiale Européenne terminé en 2002 avait pour but d'explorer les modèles existants pour la forêt, le blé, et le sol nu et d'étudier leur domaine de validité en vue du développement d'algorithmes d'inversion. Enfin, le projet BART³ du DLR (agence spatiale

¹En collaboration avec Supelec et l'Université de Nantes.

²En collaboration avec SCEOS, Université de Sheffield, UK et ITIS-CNR, Italie

³En collaboration avec l'Université de Dresde, Allemagne, et le CIRAD, Montpellier

allemande), en cours, vise à adapter le modèle d'architecture AMAP de pin sylvestre sur une forêt boréale en vue de la modélisation radar.

Au cours de ce travail, deux types de milieu ont été abordés : le milieu forestier tempéré et boréal, et le milieu agricole, plus précisément les couverts de blé. Les problématiques actuelles en modélisation de ces deux milieux sont différentes.

Le milieu forestier a suscité un grand nombre de travaux depuis une vingtaine d'années. Les principes des modèles de forêt sont aujourd'hui bien établis et les avancées actuelles concernent surtout la caractérisation du milieu. Les modèles électromagnétiques sont relativement simples car le milieu est peu dense (le volume de végétation est faible par rapport au volume occupé par le couvert) et le milieu est peu organisé. Pour les bandes de fréquences usuelles (L, C et X), les théories des milieux aléatoires sont donc applicables.

Au contraire, les milieux agricoles sont plus facile à caractériser car ils sont plus organisés. Notamment, l'uniformité des techniques agricoles assure une faible variabilité du milieu. Par contre, les travaux de modélisation sont plus rares. La première raison vient de la spécificité de chaque type de culture. Une plantation de betteraves ne pose pas les mêmes problèmes de modélisation qu'un champ de blé. La deuxième raison vient des caractéristiques du milieu qui imposent des modèles électromagnétiques plus avancées. Par exemple, les diffuseurs tels que les feuilles et les épis ont des formes complexes dont la modélisation nécessite des approximations souvent trop restrictives. Dans le cas du blé et des autres cultures du même type, se pose en plus des problèmes liés à la densité élevée du milieu.

Malgré ces différences, la modélisation des couverts forestiers et agricoles permet par une série d'aller-retour de progresser dans les deux domaines parce qu'une partie des problématiques et des outils est commune. Par exemple, une forêt de troncs appréhendée par un radar VHF ressemble à un couvert de tiges de blé en bande C.

Ce manuscrit se compose d'un chapitre introductif, puis deux parties divisées en quatre chapitres. La première partie aborde les travaux sur le couvert forestier, et la deuxième les travaux sur les couverts de blé. Chaque partie est décomposée en deux chapitres, le premier décrit les modèles développés, et le second présente l'interprétation des résultats des simulations et la comparaison avec des données radar.

Le premier chapitre rappelle brièvement les techniques d'acquisition par système radar, et présente les différentes voies de modélisation des couverts végétaux. La théorie du transfert radiatif et l'approche dite cohérente sont présentées.

Plus précisément, dans le deuxième chapitre, nous aborderons dans un premier temps, les méthodes de description du couvert forestier, et en particulier le modèle d'architecture des plantes

AMAP développé par le CIRAD. L'adaptation des maquettes d'arbres AMAP à la modélisation radar est brièvement discutée. Dans la deuxième section, nous présenterons la modélisation des éléments du couvert, les diffuseurs, en s'attachant particulièrement à montrer l'impact des approximations (approximation de la forme des diffuseurs, et du calcul électromagnétique de la diffusion) sur le signal radar. Cette section concerne tous les types de couverts végétaux, mais les exemples sont limités aux couverts forestiers. La troisième section présente deux méthodes de résolution de l'équation du transfert radiatif : la méthode itérative qui a conduit au développement du modèle RT (*Radiative transfer*) et de sa version tridimensionnelle, le modèle RT3D ; et la méthode *Discret ordinate and eigenvalue method* qui a conduit au modèle DORT (*Discret Ordinate Radiative Transfer*). La dernière section de ce chapitre présente les modèles BORN et BORN3D basés sur l'approche cohérente.

Dans le troisième chapitre, l'interprétation des résultats de modélisation et la comparaison avec les données expérimentales sont organisés selon trois axes. Le premier s'attache à localiser les diffuseurs principaux et à déterminer les mécanismes de diffusion prépondérants en fonction des sites d'étude et des configurations radar. L'accent est mis sur le rôle de la structure du couvert forestier. Le deuxième axe concerne l'impact de la description des arbres sur le signal radar modélisé. Comme la description est étroitement liée au modèle utilisé, les approches cohérente et radiative sont comparées. En particulier les difficultés de modélisation pour certaines configurations radar sont mises en évidence. Le dernier axe traite des résultats du modèle DORT qui prend en compte des mécanismes de diffusion dont le rôle est en général secondaire, mais qui dans certains cas jouent un rôle prépondérant.

Dans le quatrième chapitre, la modélisation des couverts de blé est abordée en commençant par une description des données radar et des mesures terrain collectées au cours de deux campagnes. Ensuite, un modèle cohérent "classique" basé sur l'approximation de Born est présenté, le modèle WheatBorn. L'accent est mis sur la modélisation des diffuseurs du blé. La section suivante aborde un nouveau modèle (le modèle MUSCAT), adapté aux milieux denses, qui prend en compte les diffusions multiples. La formulation est décrite en détail et est suivie de tests pour déterminer la précision de ce modèle.

Dans le dernier chapitre, les modèles sont utilisés pour interpréter les mesures expérimentales de deux sites. La première section aborde l'estimation de l'atténuation par les deux modèles, et montre les effets liés à la forte densité du couvert de blé. Dans la deuxième section, les variations temporelles du signal radar sont analysées et comparées aux estimations des modèles.

Le manuscrit se termine par une synthèse des travaux présentés et une discussion sur les perspectives.

Notes

Une grande partie des travaux présentés dans ce manuscrit est hérité de travaux précédents réalisés par d'autres personnes dans l'équipe de T. Le Toan au CESBIO ou résulte de collaboration. Inversement, une partie des travaux réalisés par l'auteur n'est pas décrite. Cette note a pour but de préciser les contributions respectives.

Forêts

- Le modèle AMAP a été développé par le CIRAD. Les maquettes ont été produites et validées au LCT par Thierry Castel (pin noir), Jean Michel Martinez (pin maritime) et Yves Caraglio (pin sylvestre). En particulier, la collaboration quotidienne avec Thierry Castel et l'encadrement de Nicolas Flourey, ont permis l'adaptation du modèle de transfert radiatif aux maquettes AMAP en 1997 durant le stage de DEA de l'auteur.
- L'extraction des données radar sur les Landes a été réalisée par Jean Claude Souyris (SIRC) et Nicolas Flourey (RADARSAT et ERS). L'extraction des données de Lozère et la correction topographique ont été réalisées au LCT par Thierry Castel.
- Le modèle de transfert radiatif a été développé à l'origine au MIT. Ce modèle a été réécrit et étendu dans le cadre de cette thèse. La méthode de suivi de rayon du modèle RT3D est inspiré de [Sun and Ranson, 1995]. Le modèle DORT est basé sur la méthode *Discret ordinate and eigenvalue method*[Jin, 1993][Tsang et al., 1985]. Cette méthode a été étendue au cas multi-couche et implémentée. Un modèle cohérent a été développé par Nicolas Flourey, mais le modèle BORN a été redéveloppé et adapté au cas tridimensionnel pendant cette thèse.
- Les travaux sur les versions second ordre des modèles RT et RT3D ne sont pas présentes. Le modèle RT2 est remplacé par le modèle DORT. Le modèle RT3D2 a été abandonné car l'adaptation du suivi de rayon pour calculer le second ordre nécessite des approximations importantes dont l'erreur est difficile à quantifier.
- Les travaux sur le projet ECOFOR (évaluation des dégâts de la tempête de décembre 1999) réalisés en collaboration avec Denis Feurer et Géraldine Florsch au CESBIO ne sont pas décrits dans ce document car ils sont trop récents.

Blé

- La campagne de mesures sur le site de Marestaing a été réalisée avec l'aide de Malcolm Davidson et Pierre Melon pendant l'année 2000.
- La campagne de mesures de Matera a été dirigé par Francesco Mattia (ITT, Matera, Italie). Les mesures du diffusiomètre ont été faites par l'équipe du Professeur Posa (Université de

Bari, Italie). L'analyse expérimentale des mesures a été faite en collaboration avec Francesco Mattia.

- Le modèle WheatBorn est inspiré des travaux de [Stiles and Sarabandi, 2000]. La formulation théorique du modèle MUSCAT vient des travaux de [Tsang et al., 1995]. La méthode de résolution a été modifiée et implémentée. Au cours de ce développement, la méthode CGSM d'accélération a été publiée par [Tsang et al., 2000] dans le cas bidimensionnel. Elle a été adaptée pour le modèle MUSCAT.

Sol

- Une méthode des moments pour le calcul de la diffusion d'un sol parfaitement conducteur, bidimensionnel a été développée par le CNES sous la direction de Pascal Richard pour les aspects numériques, et Malcolm Davidson et l'auteur pour les aspects scientifiques.

Notations

Notations mathématiques :

\vec{V}	vecteur.
$\vec{\mathcal{V}}$	vecteur (de grande dimension).
\vec{v}	vecteur de l'espace tridimensionnel.
\hat{v}	vecteur unitaire de l'espace tridimensionnel.
$\overline{\mathbf{M}}$	matrice.
$\overline{\mathcal{M}}$	matrice (de grande dimension).
$\text{diag}[a_1, \dots, a_N]$	matrice $N \times N$ diagonale avec pour éléments diagonaux a_1, \dots, a_N .
δ_i	$\delta_i = 1$ si $i = 0$ sinon vaut 0.

Grandeurs angulaires :

θ	inclinaison par rapport à la verticale.
ϕ	azimut dans le plan horizontal.
(θ, ϕ)	direction d'inclinaison θ et d'azimut ϕ .
$d\Omega$	angle solide élémentaire $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$
β	inclinaison par rapport à la verticale ^(*) .
γ	azimut dans le plan horizontal.

Grandeurs électromagnétiques :

λ	longueur d'onde dans le vide.
k_0	nombre d'onde dans le vide.
\vec{k}	vecteur d'onde.
$\vec{\mathbf{E}}$	champ électrique.

$\overline{\mathbf{E}}_i$	champ électrique incident.
$\overline{\mathbf{E}}_s$	champ électrique diffusé.
$\overline{\mathbf{S}}$	matrice de diffusion.
σ^0	coefficient de rétrodiffusion.
β	atténuation.
p, q	polarisations.

Grandeurs dans les milieux :

ϵ_0	constante diélectrique ou permittivité du vide.
ϵ	constante diélectrique ou permittivité du milieu.
ϵ_r	constante diélectrique relative du milieu. $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$
k_p	nombre d'onde dans le milieu.
M_g	humidité gravimétrique (en g/g).
M_v	humidité volumétrique (en cm^3/cm^3).

(*) dépend du contexte.

Chapitre 1

Modélisation radar des couverts végétaux

Sommaire

1.1	La mesure radar	16
1.2	Modélisation radar	18
1.2.1	Généralités	18
1.2.2	Les voies de modélisation	19
1.2.3	La théorie du transfert radiatif	20
1.2.4	L'approximation de Born modifiée	25

Ce premier chapitre a pour objectif d'introduire des notions de base à la modélisation radar des couverts végétaux. Dans une première partie, le principe des capteurs radar et la dérivation des grandeurs radar sont brièvement présentés. La deuxième partie expose la problématique de la modélisation radar des couverts végétaux et les principales voies de résolution. Ce chapitre n'a pas pour ambition de décrire de façon exhaustive des notions qui par ailleurs sont abordées en détail dans nombreux ouvrages.

1.1 La mesure radar

Dans ce travail, les données de télédétection proviennent de radars diffusiomètres et des radars imageurs à synthèse d'ouverture. Le but de cette section est de décrire brièvement la technique d'acquisition, ainsi que les traitements nécessaires pour en dériver des données utilisables. Des descriptions détaillées sont disponibles dans la littérature [Ulaby et al., 1981].

La technique radar (*RA*dio *D*etection and *R*anging) consiste à émettre une onde électromagnétique et à mesurer l'onde réfléchiée par une cible distante. Le délai entre l'émission et la réception fournit une information sur la distance de la cible et l'intensité de l'onde reçue caractérise la réflectivité de la cible. L'onde émise est quasi-monochromatique et polarisée. Sa longueur d'onde varie typiquement entre 1cm et 1m (domaine des micro-ondes). La polarisation est définie par rapport à la surface terrestre : polarisation horizontale ou verticale. L'onde reçue à la même longueur d'onde, mais sa polarisation peut avoir changée.

Quand l'antenne de réception est au même endroit que l'antenne d'émission, le système radar est dit monostatique et l'onde réfléchiée est dite rétrodiffusée. C'est le cas des systèmes radars embarqués sur satellite ou aéroportés.

Dans cette étude, trois types de radars sont utilisés : un diffusiomètre non sondeur, un diffusiomètre sondeur et des radars à synthèse d'ouverture.

- Les diffusiomètres non sondeur mesurent l'énergie de l'onde rétrodiffusée, mais ne mesurent pas le temps de propagation de l'onde. Des données fournies par un diffusiomètre basé au sol sont utilisées dans l'étude des couverts de blé (section 4.1.2).
- Les diffusiomètres sondeur mesurent l'énergie rétrodiffusée et le temps de propagation de l'onde. Ils permettent donc de localiser la source de rétrodiffusion dans la direction de visée de l'antenne. Des profils verticaux de rétrodiffusion acquis par un diffusiomètre sondeur aéroporté sont présentés à la section 3.2.1.
- Les SARs sont des systèmes imageurs. Ils permettent de localiser les sources de rétrodiffusion sur une surface bidimensionnelle, et donc de constituer une image de rétrodiffusion. En général, l'antenne vise la surface perpendiculairement à l'orbite sous un angle d'inci-

dence donné par rapport à la verticale (entre 20° et 40° pour les SARs spatiaux). Dans cette direction dite en distance (*range*), la position des cellules de résolution est obtenue par mesure du délai entre l'émission et la réception d'après le principe du radar. Dans l'autre direction dite en azimut, la localisation est basé sur le principe de la synthèse d'ouverture. Ce principe consiste à combiner (plus précisément à faire interférer) une série d'acquisition de la même surface vue sous différents angles d'azimut. Ceci permet d'obtenir une antenne fictive de très longue dimension, et donc d'atteindre une résolution spatiale de quelques mètres.

Les valeurs fournies par les radars sont l'amplitude et la phase du champ rétrodiffusé par chaque cellule de résolution. Dans le cas des capteurs polarimétriques, la valeur associée est la matrice de diffusion qui contient les quatre coefficients de rétrodiffusion complexes mesurés pour chaque polarisation émise (H ou V) et chaque polarisation reçue (H ou V).

L'information d'amplitude permet, après calibration, de déduire l'énergie rétrodiffusée par une surface élémentaire. Cette énergie ou intensité s'exprime par la section efficace radar (en m^2). Cette grandeur peut être directement exploitée quand la cellule de résolution contient un diffuseur prépondérant (cible ponctuelle), comme par exemple un coin de réflexion métallique installé en vue de la calibration. Dans le cas des couverts végétaux, au contraire, le nombre de diffuseurs dans une cellule est important et aucun n'est réellement prépondérant (cible étendue). L'énergie rétrodiffusée résulte alors de l'interférence des ondes diffusées par chaque diffuseur. Ce phénomène d'interférence est responsable du bruit appelé chatoiement ou plus communément speckle¹. Pour obtenir une grandeur exploitable, il est nécessaire d'estimer l'énergie rétrodiffusée sur plusieurs cellules de résolution, ou autrement dit de filtrer l'image. L'erreur relative d'estimation est de l'ordre de $\frac{1}{\sqrt{N}}$ où N est le nombre de cellules de résolution utilisées pour l'estimation. Pour $N = 100$, l'erreur est d'environ 10%. La grandeur utilisée en pratique est le coefficient de rétrodiffusion obtenue en normalisant l'énergie rétrodiffusée par l'aire des cellules. Son unité² est le m^2/m^2 et s'exprime en décibels.

L'information de phase est utilisée dans les études polarimétriques et interférométriques. Elle permet, entre autre, de calculer la cohérence polarimétrique (respectivement interférométrique), c'est à dire les coefficients de corrélation entre polarisations (respectivement entre images).

¹Ce n'est pas a proprement parler un bruit car il est fondamentalement lié au principe physique de la mesure. Il n'est pas possible de le réduire par exemple en utilisant un capteur avec de meilleurs composants. En particulier, le speckle contient de l'information physique sur la cible. On l'appelle bruit parce qu'il n'est pas déterministe et dans la plupart des applications, il est une source d'imprécision.

²Le coefficient de rétrodiffusion est donc sans unité, mais il est préférable de conserver l'écriture m^2/m^2 pour exprimer la différence de nature des deux surfaces.

1.2 Modélisation radar

1.2.1 Généralités

La modélisation radar des couverts végétaux consiste à évaluer le coefficient de rétrodiffusion (ou autre grandeur radar) d'un couvert décrit par des paramètres caractéristiques. Le but est d'explicitier les relations entre ces paramètres et le coefficient de rétrodiffusion. En principe, il faudrait donc modéliser l'ensemble de la chaîne : l'émission de l'onde, l'interaction avec le couvert, la mesure du champ rétrodiffusé par le capteur et les traitements numériques qui conduisent finalement au coefficient de rétrodiffusion. En pratique, les différents problèmes peuvent être découplés, et seule l'interaction onde-couvert est considérée.

Les paramètres d'intérêt du couvert pour la modélisation radar sont essentiellement des paramètres qui décrivent la géométrie et les caractéristiques électromagnétiques des éléments du couvert et du sol. En effet, aux longueurs d'onde utilisées, les radars sont principalement sensibles au contenu en eau des diffuseurs (très étroitement lié aux caractéristiques électromagnétiques) et à la forme et la position de ces diffuseurs dans le couvert. L'échelle de grandeur des paramètres géométriques s'étend de la fraction de millimètre (épaisseur des feuilles par exemple) à la dizaine de mètres (taille de la cellule de résolution ou hauteur des arbres). Le contenu en eau des éléments végétaux est relié à la biomasse fraîche (eau+masse végétale sèche). Elle varie de la centaine de grammes par mètre carré à quelques dizaines de kilogrammes. On s'intéresse aussi au volume fractionnel qui mesure le volume de végétaux par rapport au volume occupé par le couvert. Il varie de 0.01% à quelques pour-cent. Les caractéristiques électromagnétiques se résument en général à la permittivité diélectrique car ni les éléments végétaux ni le sol n'ont de propriétés magnétiques significatives. La permittivité diélectrique est principalement liée à l'humidité relative (volumétrique ou gravimétrique) des diffuseurs et à la fréquence. Pour les végétaux, la partie réelle de la constante diélectrique relative varie entre 15 et 30, et la partie imaginaire entre 5 et 10.

La problématique de la modélisation radar des couverts végétaux est triple :

- **Problème de la description du milieu.** Les paramètres doivent permettre de décrire un couvert réaliste.
- **Problème électromagnétique.** Le calcul du coefficient de rétrodiffusion doit être précis, c'est à dire tenir compte des mécanismes importants d'interaction entre l'onde et le milieu.
- **Problème pratique.** Le modèle doit être explicatif, c'est à dire permettre de déterminer les liens entre les phénomènes électromagnétiques et les paramètres du milieu. Il faut aussi tenir compte des ressources informatiques actuellement disponibles.

Ces trois problèmes sont antagonistes. Le travail de modélisation consiste alors à faire des com-

promis qui dépendent du cas étudié. Il n'y a donc pas de solution unique. C'est pourquoi, nous avons été conduit à développer plusieurs modèles dont le domaine d'application est spécifique à un couvert ou une configuration radar (fréquence, polarisation, et incidence).

Dans la section suivante, les différentes voies de modélisation pour résoudre le problème électromagnétique sont abordées. Les problèmes de description du milieu et pratiques sont traités dans les parties spécifiques aux couverts forestiers et de blé.

1.2.2 Les voies de modélisation

On peut distinguer deux voies majeures de modélisations : les modèles exacts et les modèles approchés.

Les modèles exacts consistent à résoudre les équations de Maxwell sous une forme ou une autre sans approximation analytique. Ces modèles permettent, en principe, le calcul exact de la diffusion pour une description aussi détaillée que souhaitée. "Exact" est entendu du point de vue théorique. En pratique, l'implémentation numérique impose une discrétisation du milieu, et la résolution des équations est généralement approchée par itérations successives. Deux méthodes ont été appliqués sur les surfaces naturelles :

- La méthode des moments³ est basée sur une forme intégrale des équations de Maxwell. Le système intégral est transformé par discrétisation en une matrice, dite d'impédance, qui représente les interactions entre les cellules élémentaires du milieu [Poggio and Miller, 1987]. Cette méthode a été appliquée sur le milieu forestier dans le cas des très basses fréquences (VHF) [Angot-Petit, 2000] et est utilisée pour les surfaces rugueuses (océan et sol nu).
- La méthode FDTD (*Finite Difference Time Domain*) consiste à résoudre par pas de temps régulier les équations de Maxwell discrétisées spatialement. Cette méthode a été appliquée à la propagation dans le sol.

Ces modèles sont séduisants, mais souffrent de deux défauts. Premièrement, ils ne sont pas explicatifs, c'est à dire qu'ils ne permettent pas de comprendre quels diffuseurs contribuent au signal et par quels mécanismes d'interactions. En sortie, ils fournissent seulement l'énergie totale diffusée. Deuxièmement, ces modèles demandent des ressources informatiques très importantes. En l'état actuel ils ne sont applicables que dans le cas des milieux surfaciques ou aux basses fréquences.

³La méthode des moments est une méthode générale de résolution d'un système intégral linéaire par discrétisation. C'est un cas particulier de la méthode des éléments finis. Par abus de langage, les modèles électromagnétiques qui utilisent cette méthode sont nommés par le nom de la méthode.

Les modèles approchés apparaissent comme la voie la plus abordable actuellement. Cette approche consiste à appliquer une série d'approximations, dont les hypothèses sont maîtrisées, pour obtenir une formulation simplifiée et intuitive des équations de Maxwell. Ces approximations interviennent à deux niveaux : au niveau électromagnétique en prenant en compte un nombre limité de phénomènes d'interaction, et au niveau de la description du milieu en imposant des simplifications. Ces simplifications, principalement géométriques, s'opèrent à différentes échelles de grandeur : à l'échelle des diffuseurs, et à l'échelle du couvert.

Les premiers modèles de couverts végétaux [Attema and Ulaby, 1978] sont basés sur la théorie du transfert radiatif. Le couvert est représenté par un nuage de gouttelettes d'eau. Ces modèles ont évolué vers une description plus détaillée du milieu modélisé. Ils sont largement utilisés dans la communauté, en grande partie grâce à une formulation simple et intuitive qui peut conduire à des modèles semi-empiriques inversibles.

Plus récemment, des modèles dits "cohérents" basés sur l'approximation de Born modifiée dans le cadre de la théorie analytique des ondes ont été développés. Par rapport à l'approche radiative, cette nouvelle approche permet de prendre en compte les phénomènes d'interférences (effets cohérents). Elle permet de plus de modéliser la statistique du signal rétrodiffusé (le speckle) et les mesures interférométriques.

Enfin, certains modèles ne sont pas *stricto sensu* des modèles radiatifs ou cohérents. Mais, en général, ils sont basés sur l'une des deux approches et visent à repousser telle ou telle limitation trop contraignante pour un milieu dont les caractéristiques sont particulières. Ces modèles s'appliquent de façon spécifique au couvert végétal pour lequel ils ont été développés.

Les théories du transfert radiatif et de l'approximation de Born sont largement décrits dans la littérature [Ishimaru, 1997][Ulaby et al., 1987][Tsang et al., 1985][Fung, 1994][Jin, 1993]. Afin de mettre en évidence les approximations et les différences entre les deux approches, une brève description est présentée dans les deux sections suivantes.

1.2.3 La théorie du transfert radiatif

La théorie du transfert radiatif décrit la propagation de l'énergie électromagnétique dans un milieu qui peut absorber, transmettre, diffuser, ou émettre de l'énergie. Le développement de la théorie est heuristique, et se base sur le principe de la conservation de l'énergie.

Pour dériver l'équation du transfert radiatif, on considère un volume cylindrique de longueur élémentaire ds et d'axe \hat{s} (schéma 1.1). Le bilan énergétique dans le cylindre est établi pour les ondes se propageant dans une direction donnée \hat{s} . On note $I(\vec{r}, \hat{s})$ l'énergie incidente sur le volume dans la direction \hat{s} , On note $I(\vec{r} + ds\hat{s}, \hat{s})$ l'énergie sortant du volume dans la direction \hat{s} .

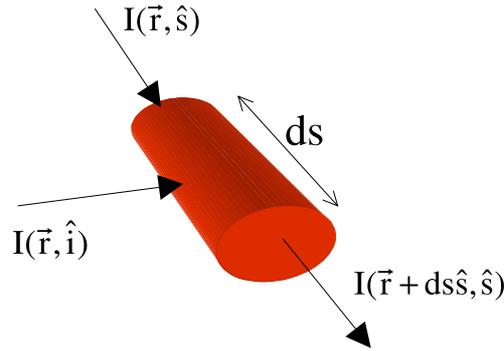


FIG. 1.1 – . Energies entrant et sortant d'un volume élémentaire.

Le bilan énergétique dans le cylindre s'écrit :

$$I(\vec{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} d\Omega_i P(\hat{s}, \hat{i}) ds \cdot I(\hat{i}) + J_e(\hat{s}) ds = I(\vec{r} + ds\hat{s}, \hat{s}) + \kappa_a ds \cdot I(\vec{r}, \hat{s}) + \kappa_s ds \cdot I(\vec{r}, \hat{s}) \quad (1.1)$$

Les termes à gauche du signe égal décrivent l'énergie électromagnétique gagnée par le volume :

- L'énergie qui entre dans la direction \hat{s} .
- L'énergie diffusée par le volume vers la direction \hat{s} . Cette énergie dépend de l'énergie incidente $I(\hat{i})$ sur le volume dans toutes les directions \hat{i} , et de la fonction de phase P . Cette fonction exprime la part d'énergie incidente dans la direction \hat{i} diffusée dans la direction \hat{s} .
- L'énergie électromagnétique émise par le volume dans la direction \hat{s} à partir d'une autre forme d'énergie (typiquement à partir d'énergie thermique).

Les termes à droite du signe égal décrivent l'énergie électromagnétique perdue :

- L'énergie qui sort dans la direction \hat{s} .
- L'énergie absorbée par le volume et transformée en une autre forme d'énergie (typiquement thermique).
- L'énergie perdue par le volume par diffusion.

L'équation du transfert radiatif s'écrit finalement :

$$\frac{dI(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -\kappa_e \cdot I(\vec{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} d\Omega_i P(\hat{s}, \hat{i}) \cdot I(\vec{r}, \hat{i}) + J_e(\hat{s}) \quad (1.2)$$

où $\kappa_e = \kappa_a + \kappa_s$ est la fonction d'extinction.

Le terme d'émission thermique $J_e(\hat{s})$ est en général négligeable devant l'énergie émise par les radars et est donc négligé en télédétection active. Au contraire, ce terme joue le rôle prépondérant en télédétection passive.

La formulation présentée ci-dessus, dite scalaire, ne permet pas de décrire la propagation d'ondes dont la polarisation change. En général, dans le domaine des micro-ondes, la dépolarisation due au milieu est importante. La version polarimétrique du transfert radiative, dite vectorielle, décrit la propagation des vecteurs de Stokes modifié $\bar{\mathbf{I}}$ [Tsang et al., 1985, p 121].

$$\bar{\mathbf{I}} = (I_h, I_v, U, V) \quad (1.3)$$

où I_h et I_v représentent l'énergie qui se propage selon la composante horizontale et verticale de l'onde. U et V représentent la corrélation entre les deux composantes. Les vecteurs de Stokes permettent de décrire complètement les ondes totalement polarisées, partiellement polarisées et non polarisées. L'équation du transfert radiatif vectorielle a la même forme que la version scalaire :

$$\frac{d\bar{\mathbf{I}}(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -\bar{\kappa}_e \cdot \bar{\mathbf{I}}(\vec{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} d\Omega_i \bar{\mathbf{P}}(\hat{s}, \hat{i}) \cdot \bar{\mathbf{I}}(\vec{r}, \hat{i}) + \bar{\mathbf{J}}_e(\hat{s}) \quad (1.4)$$

$\bar{\kappa}_e$ est la matrice d'extinction et $\bar{\mathbf{P}}(\hat{s}, \hat{i})$ la matrice de phase.

Résoudre un problème par l'approche du transfert radiatif se fait en deux étapes :

- Choisir une expression pour la matrice d'extinction et de phase et calculer ces matrices. Ce choix dépend de la nature du milieu, continu ou discret. Dans le cas discret, la plupart des modèles sont basés sur l'approximation des diffuseurs indépendants, c'est à dire que la matrice de phase est la somme des matrices de phase des diffuseurs. Cependant, en fonction de la densité et de la distribution des diffuseurs dans le milieu, il peut être nécessaire de tenir compte (partiellement) des effets cohérents (comme dans le *branching model* [Yueh et al., 1992]), des interactions de champ proche, etc. Dans tous les cas, les matrices d'extinction et de phase sont liées pour assurer la conservation de l'énergie.
- Résoudre l'équation intégral-différentielle. Les méthodes de résolution dépendent de la géométrie et des caractéristiques du milieu : pour les milieux homogènes ou homogènes par couches, la méthode itérative pour les milieux à faible albédo [Ishimaru, 1997, p 168], la méthode *discret ordinate and eigenvalues* [Tsang et al., 1985, p 258], pour les milieux hétérogènes, la méthode *invariant embedding* [Tsang et al., 1985, p 291], la méthode *doubling matrix* [Fung, 1994], les méthodes statistiques de suivi de rayon (*ray tracing*) [Sun and Ranson, 1995][Chuah and Tan, 1989][Chuah and Kung, 1994]

Limitations et avantages.

La théorie du transfert radiatif décrit la propagation de l'énergie, donc ne conserve pas l'information de phase du champ électrique. Plus précisément, les champs diffusés doivent être décorrélés afin que l'énergie de l'ensemble des ondes diffusées soit égale à la somme des énergies de chaque onde. Autrement dit, les phénomènes d'interférence (dits cohérents) ne sont pas pris en compte. Toutes les hypothèses de la théorie en découlent.

- le nombre de diffuseurs est grand ce qui permet la décorrélation des champs diffusés.
- les diffuseurs sont en champ lointain les uns des autres (l'onde diffusée est localement plane).
- les diffuseurs sont loin les uns des autres par rapport à la longueur d'onde ce qui permet la décorrélation des champs diffusés.
- les diffuseurs ne sont pas disposés en structure régulière (pas d'interférence de type réseau).

En général, les milieux forestiers et certains milieux agricoles respectent ces conditions. Par ailleurs, les interférences entre les mécanismes de diffusion, comme les interactions entre la surface et les diffuseurs, ne sont pas prises en compte ce qui constitue une limitation importante (voir la section 1.2.4 à propos du *backscattering enhancement*).

L'attrait pour cette théorie s'explique par sa simplicité conceptuelle et la facilité d'implémenter des méthodes numériques de résolution.

Condition aux limites

Le transfert radiatif est, en général, appliqué à des milieux stratifiés, le plus simple étant une couche d'air au dessus d'une couche de végétation. Les conditions aux limites régissent le transfert de l'énergie au niveau de l'interface par deux mécanismes : la transmission et la réflexion. La formulation des conditions aux limites dépend de la nature de la surface et des propriétés diélectriques de deux couches. En modélisation radar des couverts végétaux, on distingue trois types d'interface : air/végétation, végétation/végétation, et végétation/sol.

En général, les milieux végétaux sont des milieux peu denses : le volume fractionnel est bien inférieur à 1%. La constante diélectrique effective [Jin, 1993, p 77] est proche de celle de l'air. Par conséquent, la réflexion et la réfraction aux interfaces air/végétation et végétation/végétation sont négligeables. Les conditions aux limites sont donc des conditions de continuité en intensité et en direction des rayons incidents. Par contre, la différence entre les indices de réfraction de la végétation et du sol est importante. L'onde transmise dans le sol ne revient pas vers le capteur. Par contre, l'onde réfléchie contribue à la rétrodiffusion totale, soit directement, soit après diffusion dans le volume. D'une manière générale, l'interface sol/végétation est une interface rugueuse.

L'énergie réfléchie est constituée d'une partie *cohérente* réfléchie dans la direction spéculaire et une partie *diffuse* diffusée dans toutes les directions.

La condition à la limite s'écrit pour la partie cohérente :

$$\bar{\mathbf{I}}(\theta, \phi, 0) = \bar{\bar{\mathbf{R}}}(\theta) \cdot \bar{\mathbf{I}}(\pi - \theta, \phi, 0) \quad (1.5)$$

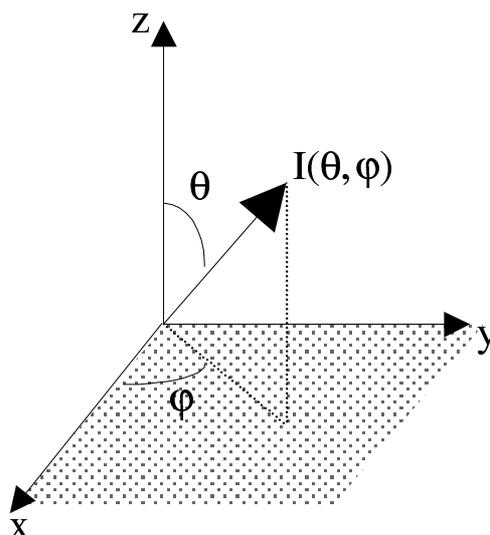


FIG. 1.2 – .

où les angles θ et ϕ sont définis figure 1.2. La matrice $\bar{\bar{\mathbf{R}}}$ est la matrice de réflexion. Dans le cas d'une surface parfaitement lisse, la réflexion est purement spéculaire (cohérente) et est gouvernée par les coefficients de Fresnel. Dans le cas d'une surface rugueuse, la matrice de réflexion dépend du modèle de diffusion adapté à la surface (voir la section 2.2.8).

La partie cohérente est la partie principale pour les surfaces peu rugueuses. Dans la plupart des implémentations du transfert radiatif, la partie diffuse est négligée, en partie parce qu'elle est négligeable (ce point sera modéré à la section 3.4), et en partie parce qu'elle imposerait un coût de calcul important. La condition à la limite pour la partie incohérente s'écrit :

$$\bar{\mathbf{I}}(\theta, \phi, 0) = \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^{\pi/2} \sin \theta' d\theta' \bar{\bar{\mathbf{R}}}^{(inc)}(\theta', \phi') \cdot \bar{\mathbf{I}}(\pi - \theta', \phi', 0) \quad (1.6)$$

où la matrice $\bar{\bar{\mathbf{R}}}^{(inc)}$ ne contient que la réflexion incohérente. Elle s'exprime en fonction des premiers et seconds moments de la matrice de diffusion du sol : $\mathcal{C}_{pq,p'q'} = \langle S_{pq} S_{p'q'}^* \rangle - \langle$

$S_{pq} \gg S_{p'q'}^*$ où p, q, p', q' sont les polarisations h ou v.

$$\overline{\overline{\mathbf{R}}}^{(inc)}(\theta', \phi') = \begin{bmatrix} \mathcal{C}_{vv,vv} & \mathcal{C}_{vh,vh} & \text{Re}\mathcal{C}_{vv,vh} & -\text{Im}\mathcal{C}_{vv,vh} \\ \mathcal{C}_{hv,hv} & \mathcal{C}_{hh,hh} & \text{Re}\mathcal{C}_{hv,hh} & -\text{Im}\mathcal{C}_{hv,hh} \\ 2\text{Re}\mathcal{C}_{vv,hv} & 2\text{Re}\mathcal{C}_{vh,hh} & \text{Re}\mathcal{C}_{vv,hh} + \mathcal{C}_{vh,hv} & -\text{Im}\mathcal{C}_{vv,hh} - \mathcal{C}_{vh,hv} \\ 2\text{Im}\mathcal{C}_{vv,hv} & 2\text{Im}\mathcal{C}_{vh,hh} & \text{Im}\mathcal{C}_{vv,hh} + \mathcal{C}_{vh,hv} & \text{Re}\mathcal{C}_{vv,hh} - \mathcal{C}_{vh,hv} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

En général, les corrélations croisées, à l'exception de la corrélation $\mathcal{C}_{hh,vv}$, sont négligeables. La matrice $\overline{\overline{\mathbf{R}}}^{(inc)}$ s'exprime directement en fonction des coefficients de rétrodiffusion du sol et de la cohérence polarimétrique complexe $\bar{\rho}_{hhvv}$:

$$\overline{\overline{\mathbf{R}}}^{(inc)}(\theta', \phi') \approx \frac{1}{4\pi \cos \theta'} \begin{bmatrix} \sigma_{vv}^0 & \sigma_{vh}^0 & 0 & 0 \\ \sigma_{hv}^0 & \sigma_{hh}^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Re}\bar{\rho}_{hhvv}\sigma_{co}^0 & -\text{Im}\bar{\rho}_{hhvv}\sigma_{co}^0 \\ 0 & 0 & \text{Im}\bar{\rho}_{hhvv}\sigma_{co}^0 & \text{Re}\bar{\rho}_{hhvv}\sigma_{co}^0 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

où σ_{co}^0 est la moyenne géométrique des co-polarisations : $\sigma_{co}^0 = \sqrt{\sigma_{hh}^0 \sigma_{vv}^0}$. La contribution au signal radiométrique du dernier quadrant est souvent négligeable.

1.2.4 L'approximation de Born modifiée

L'approximation de Born modifiée décrit la propagation et la diffusion du champ électrique à travers un milieu. Elle a beaucoup de similitude avec la méthode itérative de résolution du transfert radiatif. Avant de présenter un développement heuristique de cette approche, il convient de préciser le vocabulaire.

- *L'approximation de Born* est la troncature au premier ordre de la série de Born. Elle ne prend en compte que les diffusions simples, ou autrement dit, les diffuseurs n'interagissent pas entre eux.
- *La série de Born* s'obtient par résolution itérative d'une formulation de la diffusion, en supposant les termes de diffusion petits devant les termes de propagation (similaire à la méthode itérative de résolution du transfert radiatif). La formulation dépend de la nature du milieu, en particulier de sa nature continue ou discrète. Dans le cas des milieux végétaux à diffuseurs discrets, la série est basée sur l'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax.
- *modifiée* signifie que la propagation dans le milieu est approximée par la propagation dans un milieu effectif (et fictif) qui se comporte en moyenne comme le milieu considéré. Contrairement à l'approximation de Born, la version *modifiée* est une approche statistique et donc requiert un milieu aléatoire (avec un grand nombre de diffuseurs s'il est discret,

avec des fluctuations de propriétés électromagnétiques s'il est continu). En général, pour la modélisation micro-onde de la végétation (milieu discret), l'approximation de Foldy-Lax est utilisée pour modéliser la propagation dans le milieu effectif.

- *L'approximation de Foldy-Lax*, ou *approximation du champ effectif* (EFA) est la troncature au premier ordre de l'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax, ce qui implique que les diffuseurs atténuent l'onde incidente comme s'ils étaient indépendants (les diffuseurs n'interagissent pas entre eux).

Le développement de l'équation de diffusion multiple est présenté dans [Tsang et al., 1985, p 439]. L'objectif est de calculer le champ diffusé par N diffuseurs illuminés par une onde incidente.

Le champ électrique total⁴ \bar{E} s'écrit en fonction du champ incident \bar{E}_{inc} et les champs diffusés \bar{E}_{dj} par les diffuseurs.

$$\bar{E} = \bar{E}_{inc} + \sum_{j=1}^N \bar{E}_{dj} \quad (1.9)$$

Le champ diffusé par un diffuseur dépend de la géométrie et des propriétés électromagnétiques du diffuseur (caractérisé par l'opérateur de transition \bar{T}_j qui est une généralisation de la matrice de diffusion) et du champ qui l'excite \bar{E}_{ej} :

$$\bar{E}_{dj} = \bar{T}_j \bar{E}_{ej} \quad (1.10)$$

On suppose que le champ qui excite le diffuseur j est le champ total moins le champ diffusé par le diffuseur j, ou autrement dit, le champ incident plus les champs diffusés par tous les autres diffuseurs :

$$\bar{E}_{ej} = \bar{E}_{inc} + \sum_{l \neq j}^N \bar{T}_l \bar{E}_{el} \quad (1.11)$$

Ce système de N équations à N champs d'excitation inconnus est l'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax. Cette équation est à la base du modèle MUSCAT développé pour les couverts de blé (voir section 4.3). Une fois résolu, le champ diffusé par les N diffuseurs est simplement donné

⁴Le développement présenté a pour but de montrer la dérivation de l'approximation de Born modifiée pour mettre en évidence les approximations sous-jacentes, et n'est pas un développement rigoureux. Cependant, on peut noter que dans cette section les champs sont en fait des états, au sens quantique, c'est à dire que le champ électrique physique s'écrit $\vec{E}(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \bar{E} \rangle$. Voir [Cohen-Tannoudji et al., 1994] pour une introduction à ce formalisme.

par :

$$\bar{E}_s = \sum_{j=1}^N \bar{T}_j \bar{E}_{ej} \quad (1.12)$$

La méthode de Born consiste à résoudre l'équation (1.11) par itération en supposant le terme de diffusion (le second terme) faible devant le champ incident (le premier terme). La solution au premier ordre (approximation de Born), est obtenue en négligeant le terme de diffusion. Dans la version *modifiée*, le champ incident est remplacé par le champ effectif. En supposant de plus que les diffuseurs sont en champ lointain les uns des autres, l'opérateur de transition s'exprime en fonction de la dyade de Green du milieu effectif et la matrice de diffusion. Le champ diffusé sous l'approximation de Born modifiée s'écrit alors :

$$\bar{E}_s = \sum_{j=1}^N \bar{G}_{eff} \bar{S}_j \bar{E}_{eff} \quad (1.13)$$

Le champ diffusé est l'addition cohérente des champs diffusés par chaque diffuseur.

Le calcul du champ effectif se fait sous l'approximation de Foldy-Lax [Tsang et al., 1985, p 458]. En remplaçant les champs d'excitation par le champ effectif dans l'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax (1.11), et en prenant la moyenne sur les états des diffuseurs (orientation, taille, position), on obtient l'équation qui gouverne le champ effectif. Cette équation admet deux solutions $\alpha = 1, 2$ de la forme⁵ :

$$\vec{E}_{\alpha eff}(\vec{r}) = \vec{E}_{\alpha 0} e^{i\vec{k}_{\alpha eff} \cdot \vec{r}} \quad (1.14)$$

Dans le cas d'un milieu à symétrie azimutale, les deux modes de propagation se résument aux modes vertical et horizontal $\alpha = h, v$ avec :

$$\vec{k}_{heff} = \left(k_0 + \frac{2\pi n_0}{k_0} \langle S_{jhh}(\hat{k}_i, \hat{k}_i) \rangle_j\right) \cdot \hat{k}_i \quad (1.15)$$

$$\vec{k}_{veff} = \left(k_0 + \frac{2\pi n_0}{k_0} \langle S_{jvv}(\hat{k}_i, \hat{k}_i) \rangle_j\right) \cdot \hat{k}_i \quad (1.16)$$

où \hat{k}_i est la direction de l'onde incidente et n_0 la densité volumique de diffuseurs. Cette formulation conduit aux mêmes résultats que le théorème optique [Tsang et al., 1985, p 135], elle stipule que l'atténuation dans le milieu est proportionnelle aux nombres de diffuseurs et à la partie imaginaire de la matrice de diffusion dans la direction de propagation (*forward*).

⁵Dans le cas d'un milieu homogène infini sans limite

En résumé, l'approximation de Born modifiée requiert que :

- les diffuseurs soient en champ lointain les uns des autres.
- les diffuseurs n'interagissent pas entre eux (sinon via l'atténuation), c'est à dire que le milieu soit peu dense, et que les diffusions multiples soient négligeables.
- pour le calcul du champ effectif, le milieu soit aléatoire, c'est à dire que le nombre de diffuseurs soit important, et homogène (sans structure particulière à l'échelle de quelques longueurs d'onde : pas d'agglomération, pas de "réseau").

Le développement de l'équation de l'approximation de Born modifiée (1.13) est général et ne dépend pas de la géométrie du milieu. On s'intéresse maintenant au cas, adapté à la modélisation des couverts végétaux, d'un milieu limité par une surface réfléchissante. La présence de la surface intervient à deux niveaux : (i) le champ effectif est composé du champ incident atténué et du champ réfléchi atténué, (ii) la dyade de Green (qui est la réponse impulsionnelle du milieu) est la somme de deux termes [Tsang et al., 1985, p 34]. L'équation (1.13) s'écrit alors :

$$\bar{E}_s = \sum_{j=1}^N (\bar{G}_{eff}^{inc} + \bar{G}_{eff}^{refl}) \bar{S}_j (\bar{E}_{eff}^{inc} + \bar{E}_{eff}^{refl}) \quad (1.17)$$

En développant cette équation, on obtient 4 termes différents : diffusion de volume, surface-volume, volume-surface, et surface-volume-surface (voir figure 1.3). En exprimant la dyade de Green, le champ effectif et la matrice de diffusion ⁶, on déduit [Lin and Sarabandi, 1999] :

$$\bar{E}_s = \frac{e^{ikr}}{r} \bar{S} \cdot \bar{E}_{inc} \quad (1.18)$$

$$\bar{S} = \sum_{j=1}^N \bar{S}_{jv} + \bar{S}_{j sv} + \bar{S}_{j vs} + \bar{S}_{j svs} \quad (1.19)$$

$$\bar{S}_{jv} = \bar{T}_j^i \cdot \bar{S}_j(-\hat{k}_i, \hat{k}_i) \cdot \bar{T}_j^i \quad (1.20)$$

$$\bar{S}_{j sv} = \bar{T}_j^i \cdot \bar{S}_j(-\hat{k}_i, \hat{k}_r) \cdot \bar{T}_j^r \bar{R}(\hat{k}_i) \bar{T}_j^0 \quad (1.21)$$

$$\bar{S}_{j vs} = \bar{T}_j^0 \bar{R}(\hat{k}_i) \bar{T}_j^r \cdot \bar{S}_j(-\hat{k}_r, \hat{k}_i) \cdot \bar{T}_j^i \quad (1.22)$$

$$\bar{S}_{j svs} = \bar{T}_j^0 \bar{R}(\hat{k}_i) \bar{T}_j^r \cdot \bar{S}_j(-\hat{k}_r, \hat{k}_r) \cdot \bar{T}_j^r \bar{R}(\hat{k}_i) \bar{T}_j^0 \quad (1.23)$$

La direction \hat{k}_r est la direction de l'onde réfléchie dans le spéculaire ($\hat{k}_r = \hat{k}_i - 2\hat{z}(\hat{k}_i \cdot \hat{z})$). Les matrices \bar{T}_j^i et \bar{T}_j^r sont les matrices de transmission de l'onde du haut du milieu jusqu'au diffuseur j et du sol jusqu'au diffuseur respectivement, elles prennent en compte l'atténuation et

⁶On repasse en écriture physique des champs

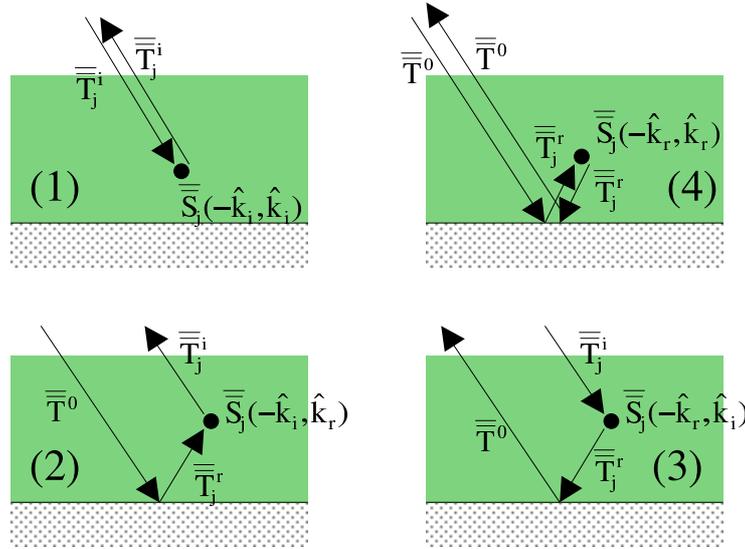


FIG. 1.3 – Illustration du calcul cohérent des mécanismes de diffusion de volume (1), surface-volume (2), volume-surface (3) et surface-volume-surface (4).

le changement de phase lié à la propagation. La matrice $\overline{\overline{\mathbf{T}}}_j^0$ est la matrice de transmission du haut du milieu jusqu'au sol, et la matrice $\overline{\overline{\mathbf{R}}}$ la matrice de réflexion spéculaire du sol.

Dérivation du coefficient de rétrodiffusion

Les équations (1.18) permettent de calculer le champ rétrodiffusé par une scène constituée de diffuseurs. Il est possible alors de calculer l'énergie rétrodiffusée par cette scène. Mais, comme pour une image SAR, pour obtenir le coefficient de rétrodiffusion, il est nécessaire de moyenner les énergies rétrodiffusées par plusieurs scènes. En effet, le calcul cohérent du champ diffusé sous l'approximation de Born est, comme la mesure radar, sujet au speckle. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les modèles cohérents permettent d'étudier la statistique du signal radar [Floury, 1999].

La dérivation du coefficient de rétrodiffusion est donc basée sur la méthode de Monte-Carlo. On considère, un ensemble de N réalisations d'un milieu aléatoire, soit N scènes. Le coefficient de rétrodiffusion de ce milieu est alors donné par :

$$\sigma_{vég\ pq}^0 = 4\pi \frac{\langle |S_{pq}|^2 \rangle - |\langle S_{pq} \rangle|^2}{A} \quad pq = hh, vv, hv, \text{ ou } vh \quad (1.24)$$

où $\langle \cdot \rangle$ est la moyenne sur l'ensemble des scènes et A est l'aire des scènes. L'erreur relative \mathcal{E}

d'estimation sur le coefficient de rétrodiffusion est alors de l'ordre de :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (1.25)$$

En pratique, une centaine de réalisations est nécessaire pour obtenir une précision de $\pm 1\text{dB}$.

Le coefficient de rétrodiffusion $\sigma_{v\acute{e}g}^0$ ne contient pas la rétrodiffusion atténuée du sol (l'indice v signifie ici végétation). Pour prendre en compte cette source de diffusion significative dans la plupart des cas, une solution serait de considérer le sol comme un diffuseur au même titre que les diffuseurs du couvert. Il faudrait alors calculer le champ diffusé par N réalisations d'un sol aléatoire. Mais ce calcul est lourd et numériquement difficile⁷. La solution alternative employée dans tous les modèles présentés dans la littérature consiste à ajouter de façon *ad hoc* l'énergie rétrodiffusée par le sol. Cette méthode se justifie par l'indépendance statistique du sol et de la végétation. Si on note $E_{v\acute{e}g}$ le champ diffusé par la végétation et E_{sol} le champ diffusé par le sol, le champ total diffusé E est la somme des champs (on considère ici une polarisation H ou V du champ électrique). L'énergie diffusée est proportionnelle au second moments du champ total :

$$\langle |E|^2 \rangle = \langle |E_{v\acute{e}g}|^2 \rangle + \langle |E_{sol}|^2 \rangle + 2\text{Re} \langle E_{v\acute{e}g} E_{sol}^* \rangle \quad (1.26)$$

où la moyenne $\langle \cdot \rangle$ est la moyenne sur l'ensemble des réalisations du sol \mathcal{E}_{sol} , et l'ensemble des réalisations du couvert végétal $\mathcal{E}_{v\acute{e}g}$, c'est à dire $\langle \cdot \rangle_{\mathcal{E}_{sol} \times \mathcal{E}_{v\acute{e}g}}$. En admettant que les réalisations du sol soient indépendantes des réalisations du couvert (ce qui est une hypothèse tout à fait raisonnable), la moyenne sur le terme croisé se découple :

$$\langle |E|^2 \rangle_{\mathcal{E}_{sol} \times \mathcal{E}_{v\acute{e}g}} = \langle |E_{v\acute{e}g}|^2 \rangle_{\mathcal{E}_{v\acute{e}g}} + \langle |E_{sol}|^2 \rangle_{\mathcal{E}_{sol}} + 2\text{Re} \langle E_{v\acute{e}g} \rangle_{\mathcal{E}_{v\acute{e}g}} \langle E_{sol}^* \rangle_{\mathcal{E}_{sol}} \quad (1.27)$$

Comme la diffusion du sol est incohérente, on a de plus $\langle E_{sol} \rangle_{\mathcal{E}_{sol}} = 0$. D'où, en passant aux coefficients de rétrodiffusion :

$$\sigma^0 = \sigma_{v\acute{e}g}^0 + \sigma_{sol}^0 \quad (1.28)$$

Dans le cas du sol sous le couvert, la rétrodiffusion du sol est atténuée, mais le principe de la

⁷Même dans le cas simple du modèle de Kirchoff, il faut calculer et intégrer les champs de surface sur la surface entière. La difficulté numérique vient du fait que la partie cohérente de l'onde réfléchie (pas seulement dans la direction spéculaire car la surface est d'extension finie) est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à la partie incohérente. L'énergie rétrodiffusée est alors noyée dans le "bruit numérique" produit par la partie cohérente. Dans le cas du modèle IEM, l'intégrale sur la surface est double, ce qui augmente encore plus le temps de calcul et probablement l'instabilité numérique.

démonstration reste le même.

Backscattering Enhancement

Le *backscattering enhancement* est un phénomène purement cohérent qui n'apparaît pas dans la théorie de transfert radiatif. Pourtant, il peut affecter significativement le coefficient de rétro-diffusion. Ce phénomène augmente de 3dB le signal rétrodiffusé par les mécanismes qui suivent le même trajet optique et en sens opposé, c'est à dire les mécanismes de diffusions multiples (volume-volume ou volume-surface).

Dans le cadre de l'approximation de Born, le *backscattering enhancement* intervient sur les mécanismes de double rebond : surface-volume et volume-surface. Avec les notations utilisées ci-dessus, la matrice de diffusion $\overline{\overline{S}}_{jDB}$ des deux mécanismes de double rebond pour le diffuseur j s'écrit :

$$\overline{\overline{S}}_{jDB} = \overline{\overline{S}}_{j \text{ vol-surf}} + \overline{\overline{S}}_{j \text{ surf-vol}} \quad (1.29)$$

En prenant la moyenne quadratique (les polarisations sont entendues), on obtient :

$$\begin{aligned} \langle |S_{jDB}|^2 \rangle &= \langle |S_{j \text{ vol-surf}}|^2 \rangle + \langle |S_{j \text{ surf-vol}}|^2 \rangle \\ &+ 2\text{Re} \langle S_{j \text{ vol-surf}} \cdot S_{j \text{ surf-vol}}^* \rangle \end{aligned} \quad (1.30)$$

D'après le principe du chemin inverse, les deux mécanismes ont la même amplitude et la même phase, c'est à dire que :

$$S_{j \text{ vol-surf}} = S_{j \text{ surf-vol}} \quad (1.31)$$

D'où

$$\langle |S_{jDB}|^2 \rangle = 4 \langle |S_{j \text{ vol-surf}}|^2 \rangle \quad (1.32)$$

Dans le cadre de la théorie du transfert radiatif, l'addition des termes surface-volume et volume-surface prévoit un 2 à la place du 4, c'est à dire une différence de 3dB. Il est possible d'ajouter de façon *ad hoc* les 3dB aux termes de double rebond dans les modèles de transfert radiatif, à condition bien sûr que les contributions des différents mécanismes soient séparées.

Première partie

Couverts forestiers

Chapitre 2

Modélisation radar des couverts forestiers

Sommaire

2.1	Caractérisation géométrique du milieu forestier	38
2.1.1	Le modèle de croissance AMAP.	39
2.1.2	Adaptation des maquettes AMAP à la modélisation radar.	40
2.2	Diffuseurs du milieu forestier	41
2.2.1	Caractéristiques électromagnétiques.	44
2.2.2	Cylindre fini	45
2.2.3	Cylindre généralisé.	48
2.2.4	Branches coniques	50
2.2.5	Branches courbes.	52
2.2.6	Cylindre hétérogène	53
2.2.7	Disque elliptique	55
2.2.8	Le sol	56
2.3	Modélisation par le transfert radiatif	59
2.3.1	Résolution par la méthode itérative. Modèles RT et RT3D	59
2.3.2	Résolution par la méthode Discrete Ordinate. Modèles DORT	69
2.4	Modélisation par l'approche cohérente	78
2.4.1	Application aux milieux bidimensionnels. Modèle BORN	80
2.4.2	Application aux milieux tridimensionnels. Modèle BORN3D	80

Améliorer la modélisation radar des couverts forestiers consiste à modéliser le milieu de façon plus réaliste, et à prendre en compte un plus grand nombre d'interactions électromagnétiques. L'utilisation de modèles architecturaux d'arbre a permis d'améliorer la caractérisation du milieu forestier. Mais, dans les modèles électromagnétiques, cette description doit être adaptée en simplifiant d'une part la forme et la composition des éléments végétaux (troncs, branches, etc) et d'autre part la géométrie du couvert. Ces aspects sont abordés dans les sections sur les méthodes de caractérisation, les diffuseurs élémentaires et les modèles "tridimensionnels" (modèles RT3D et BORN3D). Plusieurs modèles de couvert forestier sont abordés dans ce travail. Les premiers sont basés sur l'approche radiative et diffèrent par la méthode de résolution. L'utilisation d'une méthode plus performante que la méthode itérative classique a permis de prendre en compte les mécanismes de diffusions multiples. Les seconds sont basés sur l'approche cohérente qui permet non seulement d'intégrer les phénomènes d'interférence, ou effet "cohérents", mais aussi d'accepter une description plus détaillée des arbres.

Le développement d'un modèle de rétrodiffusion radar d'un milieu végétal consiste à choisir une description du milieu et une théorie électromagnétique. Ces deux aspects doivent être adaptés d'une part au type de couvert et d'autre part aux données radar à modéliser. Il paraît clair qu'un modèle unique ne peut répondre à ces exigences, tant la variété de couverts et la gamme des mesures radar est vaste. Il a été nécessaire de restreindre le cadre d'étude.

Pour l'aspect radar, l'objectif est d'étudier les configurations des SARs actuellement dans l'espace ou prévus dans un proche avenir. Les bandes de fréquences concernées sont la bande C, actuellement la seule en orbite, la bande L, disponible dans un proche avenir, et la bande X, déjà présente dans l'espace lors des missions X-SAR et SRTM, et en cours d'étude pour l'avenir. Les modèles doivent donc couvrir la gamme 1-10GHz.

Le type de couvert étudié dans cette partie est le milieu forestier. Mais la variété des écosystèmes forestiers est suffisamment importante pour qu'un modèle adapté aux forêts denses et multi-espèces des zones tropicales ne conviennent pas aux forêts peu denses des latitudes boréales. Cette étude se limite aux forêts en zones tempérée et boréale et plus particulièrement aux plantations de conifères. Ce cas d'étude a l'avantage d'être relativement simple car la caractérisation botanique des conifères est plus aisée que celle des feuillus et les plantations de conifères sont en général monospécifiques. Par ailleurs, ces espèces couvrent la majeure partie des forêts dans les zones considérées.

Même dans le cadre restreint de cette étude, plusieurs modèles peuvent être envisagés, ou même sont nécessaires pour certaines configurations radar. Ces modèles décrivent tous le milieu forestier comme une collection de diffuseurs élémentaires. Ils diffèrent par la théorie électromagnétique utilisée (transfert radiatif ou approche cohérente), par la description du milieu, et par la méthode de résolution (dans le cas du transfert radiatif).

Chacun de ces modèles correspond à un compromis entre les trois problèmes de la modélisation présentés dans la partie précédente : la qualité de la description du milieu, la qualité du calcul électromagnétique et la facilité d'utilisation. La figure 2.1 montre schématiquement le classement des modèles développés dans ce travail selon les deux premiers axes (la qualité de la description du milieu et la qualité du calcul électromagnétique).

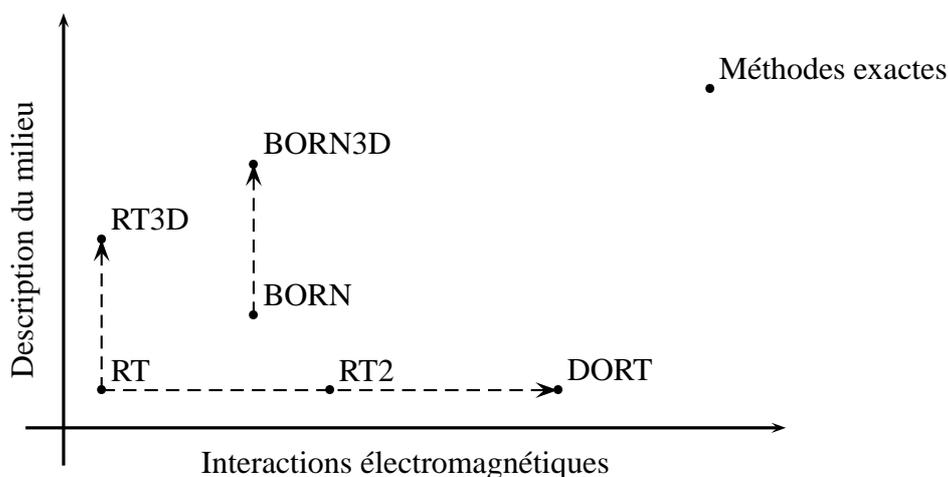


FIG. 2.1 – Classement schématique des modèles selon la complexité électromagnétique et la précision de la description du milieu.

- Le modèle RT est basé sur la résolution itérative du transfert radiatif. Il est similaire à de nombreux modèles décrits dans la littérature. Ce modèle est relativement simple du point de vue électromagnétique et de la description du milieu. Il a l'avantage de fournir une décomposition détaillée des mécanismes d'interaction.
- Le modèle RT3D est une adaptation du précédent pour prendre en compte la structure tridimensionnelle du couvert forestier. Il a été développé à l'origine pour expliquer les profils de rétrodiffusion.
- Le modèle RT2 (transfert radiatif au second ordre) est intermédiaire entre les modèles RT et DORT. Ce modèle n'est pas décrit dans ce manuscrit.
- Le modèle DORT est basé sur une méthode de résolution plus avancée que la méthode itérative. Il permet de prendre en compte les diffusions multiples et les interactions incohérentes avec le sol au prix d'un calcul lourd, et d'une décomposition limitée en mécanismes.

Il a été développé initialement pour modéliser la polarisation croisée.

- Le modèle BORN est un modèle cohérent et permet de modéliser les arbres avec plus de détail que les modèles de transfert radiatif. Il calcule les mêmes mécanismes que le modèle RT, mais avec un coût de calcul est plus important.
- Le modèle BORN3D est la version tridimensionnelle du précédent. Ce modèle a été développé pour étudier l'impact de la structure du couvert sur les mesures interférométriques.

Ce chapitre est organisé en quatre sections principales. Dans la première section, la caractérisation géométrique du milieu est abordée. Dans la deuxième section, les différentes solutions pour la modélisation des diffuseurs élémentaires du couvert sont présentées. Dans la troisième section, deux méthodes de résolution de l'équation du transfert radiatif sont décrites ainsi que les modèles auxquels elles ont conduit. Enfin, la dernière section présente le modèle BORN basé sur l'approche cohérente.

2.1 Caractérisation géométrique du milieu forestier

La complexité du milieu forestier rend sa caractérisation difficile et coûteuse en mesures. Le travail de caractérisation est un compromis entre le besoin en fidélité (fidélité de la description par rapport au milieu) et la possibilité de caractérisation le milieu forestier du point de vue théorique, technique, et économique :

- Le besoin dépend de la longueur d'onde du radar. Du point de vue général, on a besoin de décrire précisément la forme, la taille, l'orientation, et la position des éléments qui interagissent avec l'onde, c'est à dire les petits éléments du couvert aux hautes fréquences (les feuilles, les aiguilles, les petites branches, en bande X et C), et les éléments de grande taille au basses fréquences (les grandes branches et les troncs en bande L, P, et en VHF). Plus précisément, les mesures et l'échelle à laquelle elles sont réalisées doivent être adaptées à la longueur d'onde. Aux hautes fréquences, on caractérisera plutôt la forme et la taille des éléments du haut du couvert et on négligera l'orientation et la position précise. Aux plus basses fréquences, le milieu est moins aléatoire (moins de diffuseurs interagissent avec l'onde), l'orientation et la position des diffuseurs sont nécessaires à grande échelle.
- La caractérisation peut poser des problèmes d'échantillonnage pour prendre en compte la variabilité des arbres, du sous-bois et du sol.

Plusieurs techniques de description de l'arbre ont été utilisées en modélisation radar avec chacune leurs avantages et inconvénients.

- Caractérisation dendrométrique. Cette méthode n'a pas pour objectif de reconstruire géo-

métriquement l'arbre, mais de fournir les valeurs moyennes (voire les écart-types) des paramètres d'entrée des modèles comme par exemple la longueur et le rayon des branches. Les mesures sont réalisées dans des parcelles (espèce d'arbre et âge donné) sur un échantillon d'arbres. Elles permettent de déduire des relations allométriques qui relient les paramètres entre eux ou à l'âge. En supposant ces relations générales, les paramètres des parcelles d'âge intermédiaire qui n'ont pas été mesurées peuvent être estimés. Il est aussi possible, mais avec une précision dégradée d'appliquer ces relations sur des sites différents. Cette méthode est bien adaptée à la modélisation, mais elle est très coûteuse en mesures et conduit en général à une caractérisation trop simple.

- Vectorisation. Cette méthode consiste à reconstruire récursivement l'arbre à partir de mesures tridimensionnelles locales. Elle n'est pas fondée sur des bases botaniques et ne permet pas de suivre la croissance des arbres.
- Modèles mathématiques fractals. Cette approche consiste à construire des arbres fractals à partir des systèmes de Lyndenmayer. Le L-système est choisi empiriquement afin que l'arbre ressemble visuellement à la réalité. L'application successive du L-système simule la croissance. Cette approche est séduisante car elle donne des résultats avec peu de paramètres de contrôle, donc peu de mesures, mais elle n'a aucune base botanique.
- Modèles architecturaux de croissance. Ces modèles fondés sur des bases botaniques regroupent les meilleures idées des trois approches précédentes : description géométrique tridimensionnelle locale, modèles mathématiques adaptés pour décrire la similitude (l'aspect fractal des arbres), et les mesures dendométriques pour la calibration précise.

Ces techniques, en particulier les trois dernières, sont focalisées sur l'arbre sorti de son contexte, le milieu forestier. Des travaux sont nécessaires pour améliorer la description globale du milieu, comme par exemple :

- La répartition des individus, en particulier, des dominants par rapport aux dominés.
- L'évolution de la densité d'arbre sur les sites naturels, et surtout sur les sites cultivés.
- La description du sous-bois et son évolution.
- La caractérisation des sols.

2.1.1 Le modèle de croissance AMAP.

Le modèle de croissance Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes a été développé par le CIRAD à Montpellier [Reffye de, 1981] à l'origine pour le caféier. L'approche a été adaptée aux pins et se décompose en trois étapes :

1. **Analyse architecturale.** Cette analyse consiste à classer l'architecture et l'évolution de l'architecture de l'arbre selon les stratégies connues de croissance. Cette étape dépend

principalement de l'espèce et peu du site d'étude.

2. **Calibration.** A partir de mesures dendrométriques aux âges clés de la croissance, le modèle est calibré pour reproduire des individus ayant les bonnes dimensions, orientation et forme des branches. Cette étape dépend du site d'étude, elle inclue *in facto* la compétition entre individus, la composition du sol, les conditions climatiques, etc.
3. **Simulation.** Cette étape consiste à faire pousser *numériquement* un individu à partir d'une graine aléatoire. Différentes graines produisent différents individus en respectant la variabilité réelle. La simulation produit un fichier (une maquette) constitué d'une liste de cylindres (dans le cas des pins). Pour chaque cylindre, des paramètres géométriques et deux paramètres de connection sont donnés. Les paramètres géométriques sont le rayon, la longueur, l'inclinaison, l'azimut, et la position dans l'espace. Le premier paramètre de connection est un nombre qui permet d'identifier la branche à laquelle le cylindre appartient (une branche peut être constituée de plusieurs cylindres). Le deuxième est l'ordre de la branche. Les branches d'ordre 1, ou branches primaires sont les branches connectées au tronc. Les branches secondaires sont connectées aux branches primaires, etc.

AMAP fournit des descriptions bien plus précises que les autres techniques décrites ci-dessus. Les mesures pour la calibration sont coûteuses, mais ce coût est compensé par la possibilité de décrire tous les stades de croissance, et par l'utilisation des maquettes dans d'autres domaines que la modélisation électromagnétique des arbres.

Les maquettes actuellement disponibles au CESBIO sont les pins maritimes sur le site des Landes, les pins noirs sur le site de Lozère, et les pins sylvestres. La calibration des maquettes de pins maritimes et de pins noirs sur les sites d'études sont de bonne qualité, mais ne représente pas la variabilité réelle.

2.1.2 Adaptation des maquettes AMAP à la modélisation radar.

Les maquettes AMAP sont parfaitement adaptées à la modélisation cohérente, car elles permettent de générer des scènes aléatoirement où la position de chaque diffuseurs est connue, c'est à dire que les maquettes peuvent être des paramètres d'entrée bruts. Au contraire, la modélisation par le transfert radiatif nécessite une description simplifiée et statistique des diffuseurs. La procédure complète d'adaptation est détaillée dans [Floury, 1999] et dans [Castel, 1998]. Seul l'essentiel est rappelé ici. L'adaptation se fait en deux étapes :

- Les branches courbes sont simplifiées¹ en cylindres équivalents de même volume, de rayon égal au rayon moyen et d'orientation égale à l'orientation moyenne de la branche.

¹La forme conique ou courbée peut être réintroduite *a posteriori* dans la modélisation.

- Les moyennes des paramètres (longueur, rayon, inclinaison pour chaque ordre de branche) sont calculées sur l'ensemble des diffuseurs dans une même couche horizontale et sur l'ensemble des maquettes de même âge. On obtient alors une description statistique d'un arbre moyen. Le choix de l'épaisseur des couches est un compromis pour respecter l'hétérogénéité verticale du couvert, et assurer la validité de la moyenne. Une épaisseur de l'ordre du mètre est un bon compromis.

A partir de la description statistique, il est possible de générer des maquettes d'arbres afin de les utilisées dans les modèles cohérents.

La figure 2.2 montre une maquette originale et le résultat des deux étapes. Il est important de noter que la maquette du milieu est la simplification de la maquette originale de gauche, mais la maquette de droite est construite à partir d'une description statistique réalisée sur l'ensemble des maquettes de 40 ans (10 maquettes). Après la première étape, les branches sont droites et la connection entre les branches d'un ordre et l'ordre supérieur n'est plus assurée. Ceci ne pose pas de réel problème pour la modélisation car la diffusion est calculée comme si les diffuseurs étaient en champ lointain les uns des autres. L'aspect de l'arbre est relativement bien conservé par la première étape, mais pas par la seconde. Du point de vue de la modélisation, cette détérioration affecte peu les estimations de l'énergie rétrodiffusée (cf section 3.3.3) car les paramètres essentiels (le volume, le rayon, et l'orientation des branches) sont conservés par les deux transformations. Par contre, il est possible que la localisation des sources de diffusion (interférométrie, ou sondage vertical du couvert) soit imprécise. L'erreur ne devrait pas dépasser l'épaisseur des couches utilisées pour la moyenne.

2.2 Diffuseurs du milieu forestier

Dans la plupart des modèles, les éléments végétaux sont modélisés soit par des cylindres pour les branches, les tiges ou les aiguilles soit par des disques ou des ellipsoïdes plats pour les feuilles.

La modélisation électromagnétique des éléments végétaux d'un couvert conduit à simplifier leur forme et leurs propriétés électromagnétiques pour 3 raisons :

1. les mesures disponibles ne permettent généralement pas de caractériser précisément les éléments.
2. la matrice de diffusion de la forme réelle des éléments n'est pas connue, même approximativement, ou le coût en temps de calcul est trop élevé.
3. les caractéristiques simplifiées donnent une bonne approximation de la diffusion de l'élément.



FIG. 2.2 – Pin maritime de 40 ans. De gauche à droite : maquette AMAP originale, maquette simplifiée, maquette reconstruite.

L'objet de cette partie est double. Premièrement, il s'agit de revoir de façon critique les approximations utilisées dans la littérature pour calculer les matrices de diffusion de différents éléments végétaux. Cette revue se limite au cadre des couverts forestiers et montre l'impact des approximations sur la rétrodiffusion de l'ensemble du milieu. Le deuxième objectif est d'étudier des diffuseurs de forme ou constitution plus réaliste que celle du cylindre homogène. En particulier, cette étude est une première étape pour déterminer l'impact de la description détaillée fournie par les maquettes d'arbre AMAP.

Dans un premier temps, on s'intéressera à la caractérisation électromagnétique, essentiellement la constante diélectrique. Ensuite, on étudiera les formes de diffuseurs : le cylindre fini, le cylindre généralisé (c'est à dire à base non circulaire), le cylindre courbe, le cône, le cylindre hétérogène, le disque et l'ellipsoïde. On précisera pour chaque diffuseur les approximations requises pour le calcul de la matrice de diffusion, et le comportement électromagnétique de ces diffuseurs dans le milieu.

Pour cela, on choisit d'étudier la rétrodiffusion d'un milieu simple avant d'aborder dans le chapitre suivant la rétrodiffusion d'un milieu forestier réel. Le milieu utilisé dans cette étude est une couche de hauteur infinie contenant des diffuseurs orientés uniformément mais qui ont tous la même forme et la même taille (voir figure 2.3). Le coefficient de rétrodiffusion est donné au

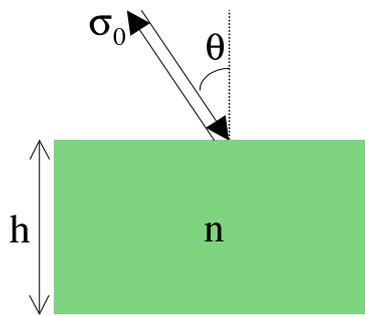


FIG. 2.3 – . Milieu constitué d'une couche homogène semi-infinie ($h \rightarrow \infty$).

premier ordre par :

$$\sigma^0(\theta) = 4\pi \cos \theta \frac{\langle \sigma \rangle}{2 \langle \beta \rangle} \quad (2.1)$$

où θ est l'angle d'incidence, σ est la surface équivalente radar (*radar cross section*, RCS) d'un diffuseur, et β est la surface équivalente d'extinction (*extinct cross section*). Les moyennes $\langle \cdot \rangle$ opèrent sur l'ensemble des orientations des diffuseurs.

σ et β sont reliées à la fonction de diffusion par :

$$\sigma = |f(-\hat{i}, \hat{i})|^2 \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{4\pi}{k_0} \text{Im} f(\hat{i}, \hat{i}) \quad (2.3)$$

Ce cas élémentaire correspond à une forêt homogène avec un seul type de diffuseur sans orientation particulière, et où la contribution du sol est négligeable.

2.2.1 Caractéristiques électromagnétiques.

Les propriétés électromagnétiques des diffuseurs sont : la constante diélectrique relative ϵ_r (ou permittivité électrique) et la perméabilité magnétique relative μ_r .

Par rapport au cas général des milieux électromagnétiques, les éléments végétaux sont plus simples :

- les végétaux n’ont pas de propriétés magnétiques, donc la perméabilité magnétique relative vaut 1.
- les végétaux sont constitué d’un milieu linéaire, c’est à dire que la constante diélectrique ne dépend pas de l’intensité du champ électrique.
- les végétaux sont constitué d’un milieu isotrope, la constante diélectrique est donc scalaire. Ceci n’est qu’une approximation car les fibres provoquent des anisotropies. En modélisation radar, cet effet est négligé par rapport aux autres approximations et incertitudes. La mesure de l’anisotropie est de toute manière difficile.

La constante diélectrique dans les fréquences radar dépend principalement du contenu en eau des végétaux et dans une moindre mesure des végétaux eux-mêmes. La mesure de la constante diélectrique demande une lourde expérimentation [Helbert et al., 2001]. Ulaby and El-Rayes [1987] ont développé un modèle semi-empirique largement utilisé par la communauté micro-ondes. Ce modèle est basé sur le mélange de trois composantes : l’eau libre, l’eau liée, et le tissu végétal. L’eau liée est l’eau contenue dans les tissus qui, à cause des fortes liaisons chimiques, a une constante diélectrique inférieure à l’eau libre.

Les sources d’incertitude de ce modèle sont multiples :

- La quantité de minéraux dans l’eau libre affecte la partie imaginaire de la constante diélectrique. Cette quantité dépend des végétaux. Cet effet est significatif pour les fréquences inférieures à 5GHz.
- La loi de dispersion de l’eau liée n’est pas connue de façon théorique. Le modèle utilise un ajustement semi-empirique sur un jeu limité de mesures.
- Les volumes respectifs des deux formes d’eau ne peuvent être déterminés par la mesure du contenu en eau du végétal.

Les auteurs estiment une erreur de 20% sur la constante diélectrique calculée à partir de l’humidité gravimétrique Mg , et seulement 5% si on connaît l’humidité volumique Mv (c’est à dire si on connaît Mg et ρ la masse volumique du végétal).

Par ailleurs, la constante diélectrique dépend de la température. En particulier, lorsque l’eau se solidifie la constante diélectrique chute. L’effet sur le signal radar est observable pour détecter les périodes de gel en forêt boréale [Rignot and Way, 1994][Rignot et al., 1994]

2.2.2 Cylindre fini

Matrice de diffusion et approximations.

Le cylindre de longueur fini est largement utilisé pour modéliser des éléments végétaux. Cependant, il n'existe pas d'expression exacte de la matrice de diffusion pour un cylindre de rayon a et de longueur l quelconques. Des expressions sont connues dans les cas limites du disque $l \ll a$, et du cylindre long $l \gg a$. Le cylindre long permet de modéliser les tiges, les troncs, les branches et les aiguilles car la longueur est en général supérieure à 10 fois le rayon.

L'approximation du cylindre long fini consiste à supposer que le champ interne est le même que celui d'un cylindre infiniment long éclairé par le même champ incident. Ceci revient à négliger l'effet des extrémités sur la distribution du champ interne. Pour cela, il faut que $l \gg a$ et que $k_0 l \sin \theta$ soit différent de l'unité (où $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde dans le vide et θ l'angle d'incidence sur le cylindre, par rapport à l'axe du cylindre), c'est à dire que $k_0 l \sin \theta \ll 1$ ou $k_0 l \sin \theta \gg 1$. Il a cependant été démontré [Stiles et al., 1996] que lorsque le diffuseur est un diffuseur de Gans-Rayleigh (une de ces dimensions est très inférieure à la longueur d'onde) la contrainte sur $k_0 l \sin \theta$ est relaxée². En pratique, ces hypothèses sont vérifiées (voir le tableau 2.1).

	l/a	$k_0 l$	$k_0 a$
Condition de validité de l'approximation du cylindre fini	$\gg 1$	$k_0 l \sin \theta \neq 1$	$\ll 1$ si $k_0 l \sin \theta \approx 1$, sinon aucune
Tronc en bande P	≈ 100	≈ 80	$= 1$
Branches primaires en bande L	> 60	> 25	≤ 1
Branches secondaires en bande L	> 30	> 8	≤ 0.2
Branches secondaires en bande C	> 30	> 30	≤ 1
Aiguilles en bande C	> 10	> 16	≈ 0.5

TAB. 2.1 – Vérification de l'approximation du cylindre fini pour les diffuseurs des couverts de pins maritimes et de pins noirs.

Le champ interne est déterminé en utilisant la continuité des champs électriques et magnétiques transversaux à la surface du cylindre. Le formalisme dépend des auteurs, mais les résultats sont identiques. Par contre, les méthodes divergent pour le calcul du champ diffusé. La première école [Karam and Fung, 1986] [Sarabandi et al., 1993] utilise l'intégrale de volume, tandis que

²Dans ce cas, le champ interne est uniforme et il ne peut y avoir de modes longitudinaux dans le cylindre.

la deuxième école [Tsang et al., 1992] [Kolawole, 1992] utilise le principe de Huygens, c'est à dire l'intégrale de surface. Ces deux méthodes seraient équivalentes si la surface utilisée englobait tout le volume du cylindre. Mais, l'intégrale sur les extrémités des cylindres est négligée en pratique. Il s'ensuit que les diagrammes de diffusion pour les deux méthodes diffèrent. La différence est significative pour les directions de diffusion proches de l'axe du cylindre (voir la figure 2.4). Aucune des deux méthodes ne peut être privilégiée car le champ interne au voisinage des extrémités est de toute façon mal décrit dans l'approximation du cylindre fini.

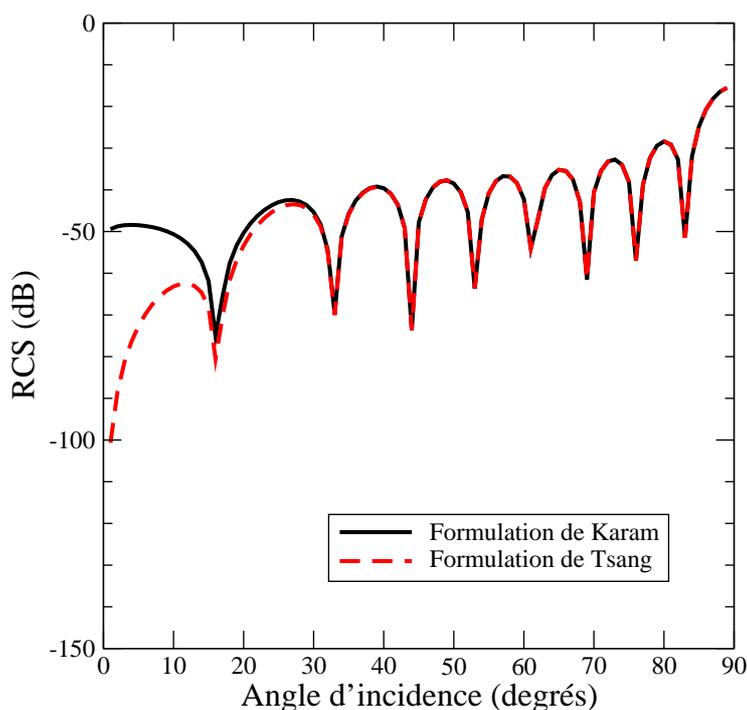


FIG. 2.4 – Diagramme de rétrodiffusion du cylindre fini selon les formulations de Karam and Fung [1986] et Tsang et al. [1992]. L'angle d'incidence est donné par rapport à l'axe du cylindre. Cylindre de 5cm de rayon et 1m de long. Bande L, polarisation HH.

Cependant, l'impact de cette approximation sur la modélisation d'un arbre entier est négligeable. La rétrodiffusion d'un cylindre dans les directions proches de son axe est de plusieurs ordres de grandeur plus faible que la rétrodiffusion dans les directions perpendiculaires à l'axe (proche du spéculaire). Donc, seuls les cylindres perpendiculaires à l'onde incidente contribuent significativement au signal rétrodiffusé. Dans le cas d'une couche semi-infinie de cylindre, la différence est inférieure à 1% quel que soit le rayon.

L'approximation du cylindre fini présente un autre défaut. La matrice de diffusion ne respecte pas le principe de réciprocité, ou principe du chemin inverse en bistatique [Tsang et al., 1992]. Ce défaut intervient lors du calcul de diffusions multiples, et n'affecte donc pas la rétrodiffusion

au premier ordre. De plus, les configurations les plus affectées ($\theta_i \neq \theta_s$) ont des contributions mineures par rapport aux configurations spéculaires ($\theta_i \approx \theta_s$).

Les diffuseurs cylindriques dans le milieu

Dans le cas d'une couche semi-infinie, le coefficient de rétrodiffusion dépend des trois paramètres du cylindre, dans l'ordre d'importance :

1. le rayon.
2. la constante diélectrique.
3. la longueur.

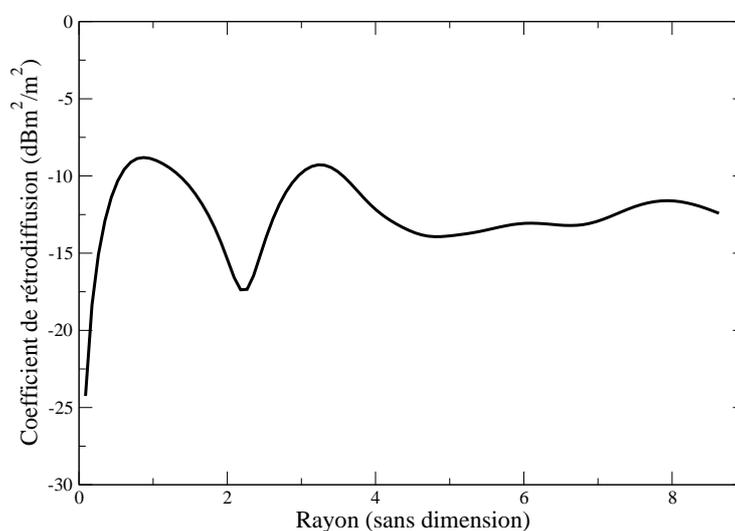


FIG. 2.5 – Rétrodiffusion d'une couche semi-infinie de cylindres orientés aléatoirement en fonction du rayon (plus précisément en fonction du rapport entre le périmètre et la longueur d'onde à l'intérieur des diffuseurs, soit $k_p a$ avec $k_p = \sqrt{\epsilon_r} k_0$).

Le rayon La figure 2.5 donne le comportement d'une couche semi-infinie contenant des cylindres en fonction de leur rayon. Le rayon est exprimé sans dimension en prenant le rapport entre le périmètre et la longueur d'onde à l'intérieur du diffuseur ou de façon équivalente le produit entre le nombre d'onde à l'intérieur du diffuseurs et le rayon : $k_p a$ avec $k_p = \sqrt{\epsilon_r} k_0$.

On peut distinguer trois régions :

1. La région de Rayleigh ($k_p a \ll 1$). En général dans les milieux réels, ces diffuseurs contribuent peu à la rétrodiffusion par rapport au sol ou à des diffuseurs plus gros.

2. La région de résonance ($k_p a \approx 1$). C'est la région d'intérêt pour la forêt, car les diffuseurs prépondérants appartiennent à ces régions (cf la table 2.1). Le coefficient de rétrodiffusion est très sensible au rayon du cylindre.
3. La région optique ($k_p a \gg 1$). Les cylindres dans cette région diffusent fortement et atténuent fortement. C'est le cas par exemple en bande C et X des grosses branches primaires, au bas de la couronne. Mais, en général, ces branches sont cachées par les diffuseurs plus petits mais plus nombreux, comme les branches secondaires et les aiguilles.

La sensibilité du coefficient de rétrodiffusion au rayon dans la région de résonance impose en pratique une mesure précise des rayons des diffuseurs. Cependant, cette résonance est peut être due à la simplification de la forme réelle des diffuseurs. Ce point a motivé l'étude de diffuseurs plus complexes qui fera l'objet des sections ci-dessous.

La constante diélectrique et la longueur Le coefficient de rétrodiffusion d'une couche semi-infinie de cylindre est peu sensible à la constante diélectrique ou à la longueur. En effet, le coefficient de rétrodiffusion est le rapport de la diffusion sur l'atténuation (cf équation 2.1). Qualitativement, un cylindre plus humide, ou un cylindre plus long, diffuse plus et atténue plus. Le coefficient de rétrodiffusion reste donc inchangé. Dans le cas d'un cylindre très long par rapport à la longueur d'onde ($kl \gg 1$), la diffusion et l'atténuation sont directement proportionnelles à la longueur, le coefficient de rétrodiffusion ne dépend donc pas de la longueur.

2.2.3 Cylindre généralisé.

Calcul de la matrice de diffusion

Le cylindre à section non circulaire permet de modéliser :

- les aiguilles de pins par des cylindres à section hémicirculaire.
- les feuilles longues, comme celles du blé, par un cylindre à section elliptique plate.

La matrice de diffusion d'un cylindre généralisé est théoriquement connue pour les sections elliptiques uniquement (et sous l'approximation du cylindre fini) [Ruck et al., 1970]. Dans les autres cas, la matrice de diffusion est calculée numériquement par une méthode des moments [Peterson et al., 1997, pp76-80]. Pour l'étude des aiguilles et des feuilles, la méthode décrite dans [Sarabandi and Senior, 1990] a été appliquée. Cette méthode est limitée aux diffuseurs de Gans-Rayleigh (les dimensions de la section sont faibles devant la longueur d'onde).

La méthode générale des moments requière l'inversion d'une matrice d'impédance pour le calcul de chaque matrice de diffusion. Dans la méthode simplifiée, la matrice de diffusion est

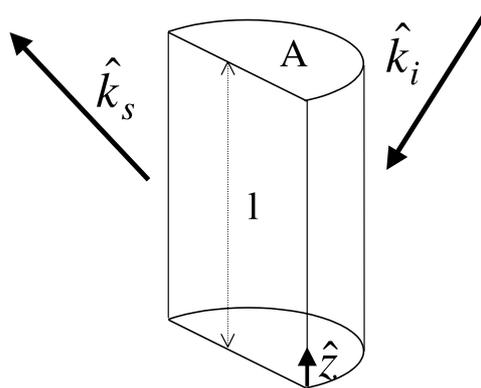


FIG. 2.6 – Cylindre généralisé.

calculée par :

$$\mathbf{S} = -\frac{k_0^2}{4\pi} \hat{k}_s \times \hat{k}_s [Al \frac{\mathbf{P}}{A} \cdot \hat{a}] \text{sinc}(U) \quad (2.4)$$

où A est l'aire de la section, l la longueur du cylindre, et $U = \frac{k_0 l}{2} (\hat{k}_s \cdot \hat{z} - \hat{k}_i \cdot \hat{z})$. Les vecteurs et les paramètres sont représentés figure 2.6. La matrice \mathbf{P} est la matrice de polarisabilité et est déterminée par une méthode des moments. L'intérêt de cette méthode simplifiée est que le rapport $\frac{\mathbf{P}}{A}$ ne dépend ni de la taille de la section, ni des directions d'incidence et de diffusion. Elle ne dépend que de la forme de la section et de la constante diélectrique. Elle est donc calculée une seule fois. Le détail du calcul est présenté dans [Sarabandi and Senior, 1990] et ne pose pas de problème particulier d'implémentation.

Les diffuseurs dans le milieu.

L'objectif de ce paragraphe est de montrer l'apport de la modélisation des aiguilles en cylindres hémicylindriques au lieu de cylindres circulaires. La figure 2.7 montre la rétrodiffusion en bande C d'une couche semi-infinie d'aiguilles hémicylindriques et pour comparaison la rétrodiffusion d'une couche de cylindres. Le cylindre circulaire est calculé sous l'hypothèse de Rayleigh et de façon exacte pour montrer que l'hypothèse de Rayleigh est valide pour les rayons considérés. La figure montre que la rétrodiffusion des aiguilles est similaire à celle des cylindres. L'écart entre les deux est constant et vaut -3.18dB. La différence de -3dB s'explique par le facteur 2 entre le volume du cylindre hémicylindrique et le volume du cylindre circulaire. Donc, en modélisant les aiguilles par un cylindre circulaire de même volume, l'erreur est de seulement 0.18dB et est négligeable. Pour un rayon d'aiguilles mesuré a , le rayon du cylindre équivalent

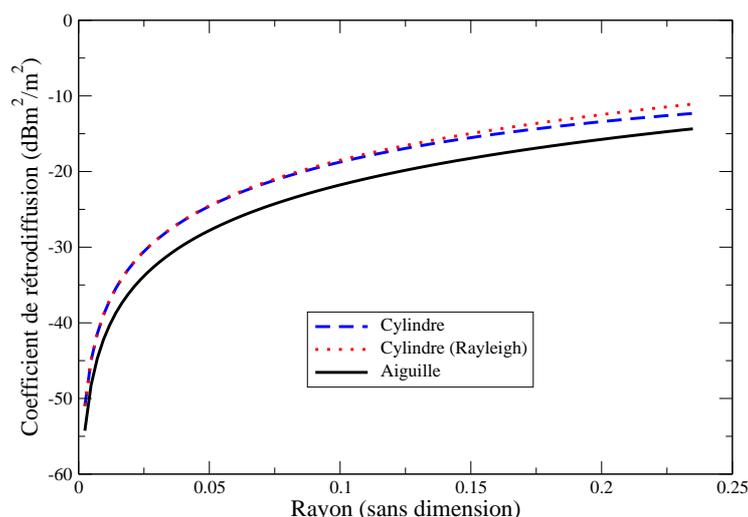


FIG. 2.7 – Rétrodiffusion d’une couche semi-infinie d’aiguilles aléatoirement orientées en fonction du rayon adimensionné.

est donc de $\frac{a}{\sqrt{2}}$ ³.

2.2.4 Branches coniques

Matrice de diffusion.

La matrice de diffusion d’un tronc de cône n’est pas connue analytiquement. Seules des méthodes numériques 3D telles que la méthode des moments permettent le calcul exact sans approximation. Mais, ces méthodes sont difficiles à mettre en œuvre et sont lourdes en temps de calcul. Pour des troncs de cône faiblement coniques, le cône peut être approximé par une succession de cylindres de rayon variable $a(h)$ en fonction de la hauteur h . Cette approximation est similaire à l’approximation du cylindre fini. Il faut en effet que le rayon varie peu, c’est à dire la variation de rayon δa pour une variation de hauteur δh vérifie $\delta a \ll \delta h$. En pratique, cette méthode de calcul donne seulement une estimation de la diffusion d’un cône.

Cône dans le milieu.

La figure 2.8 montre la rétrodiffusion d’une couche semi-infinie de diffuseurs coniques⁴ pour un rapport de 2 entre les rayons des deux extrémités. Pour comparaison, sont représentées la rétrodiffusion d’une couche de cylindre, ainsi que la rétrodiffusion d’une couche constituée de

³On peut remarquer toutefois que le nombre moyen d’aiguilles par arbre est difficile à mesurer et qu’une erreur de 40% est tout à fait possible.

⁴Les cônes sont décomposés en 10 cylindres. Un nombre plus élevé n’apporte pas de différences notables.

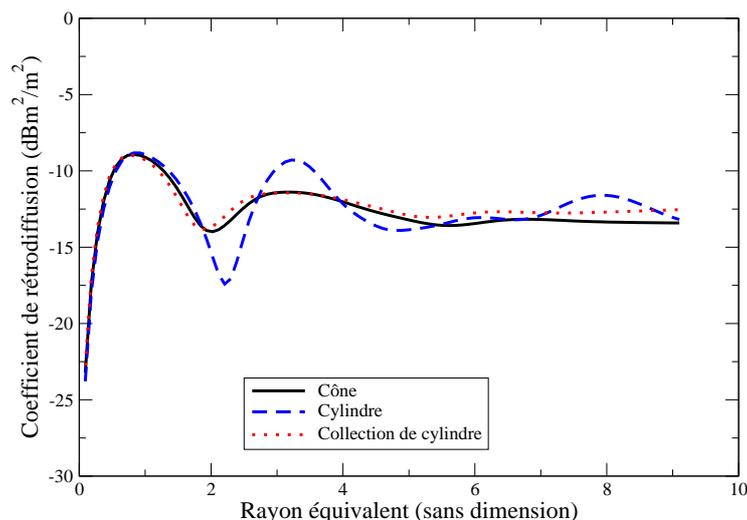


FIG. 2.8 – Rétrodiffusion d’une couche semi-infinie de cônes en fonction du rayon équivalent adimensionné.

cylindres de rayon variant dans la même gamme que le cône. Le coefficient de rétrodiffusion est tracé en fonction du rayon équivalent du cône, c’est à dire le rayon d’un cylindre qui aurait le même volume. Le rayon est adimensionné comme dans le cas de la couche de cylindres. Les résultats montrent que :

- le cône se comporte comme une moyenne de cylindres de rayon variable. La forme particulière du cône a peu d’influence. C’est la variation du rayon qui joue le rôle principal.
- le cône donne des résultats significativement différents du cylindre dans le région de Rayleigh et surtout autour de la résonance ($k_p a_{eq} \approx 1$). L’écart est de l’ordre de 4dB pour une conicité relativement faible.

En pratique, modéliser les branches par des cônes apporte des différences significatives lorsque le rayon des branches est autour de la résonance. C’est le cas, par exemple, des branches primaires en bande L. Il est probable que pour les éléments végétaux réels, la résonance soit encore moins accentuée que dans le cas du cône. Cependant, mesurer la conicité des branches n’est pas toujours possible. De plus, la distribution naturelle du rayon moyen des branches est au moins du même ordre de grandeur que la variation du rayon sur une branche. Par conséquent, modéliser une distribution de branches cylindriques de rayon variable donne des résultats tout à fait satisfaisants.

Dans les modèles RT et RT3D, les branches sont cylindriques ou coniques au choix de l’utilisateur, mais les simulations présentées dans ce document ont été réalisées avec des branches cylindriques. Ce choix s’explique par le fait que les modèles cohérents BORN et BORN3D sont mieux adaptés pour prendre en compte une description détaillée des arbres.

2.2.5 Branches courbes.

L'orientation des branches primaires a un impact important sur les variations du signal avec l'angle d'incidence. La courbure des branches intervient de façon similaire car elle influence le diagramme de rétrodiffusion [Floury, 1999][Picard, 1997].

Les effets de la courbure ont été peu étudiés auparavant car la courbure est difficile à mesurer sur le terrain. Mais, avec l'utilisation des maquettes AMAP, la situation a changé. En effet, le modèle AMAP calcule la courbure de manière semi-empirique en tenant compte de la pesanteur et de mesures d'angle d'insertion, d'affaissement et de redressement des extrémités.

Matrice de diffusion.

Comme dans le cas du cône, les branches courbes sont modélisées par une succession de cylindres dont l'orientation varie. Cette approximation suffisante pour une première analyse dès lors que la courbure est faible. La seule alternative est la méthode des moments, coûteuse en temps et en développement.

Diffuseurs dans le milieu.

Le milieu de référence utilisé précédemment ne permet pas d'étudier l'impact de la courbure car les diffuseurs sont orientés aléatoirement. On considère plutôt un milieu de diffuseurs inclinés d'un angle entre $\beta = 70^\circ$ et 50° par rapport à la verticale. Ce milieu décrit de manière simplifiée les branches primaires.

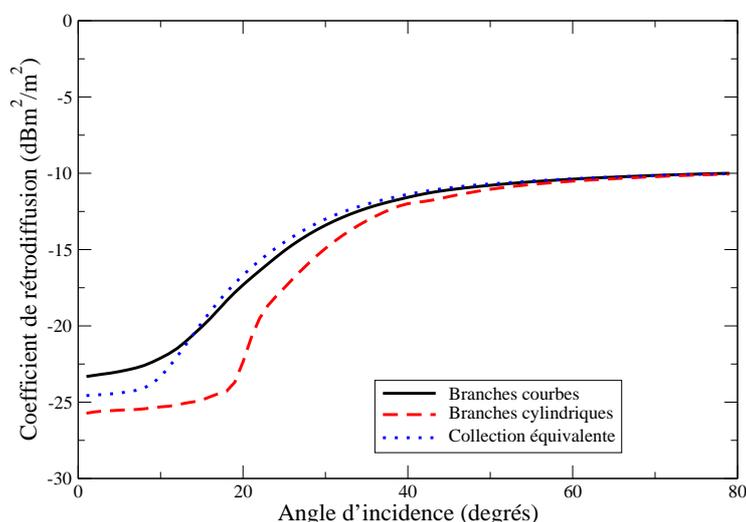


FIG. 2.9 – Rétrodiffusion d'une couche de branches courbées et de branches cylindriques en fonction de l'angle d'incidence.

La figure 2.9 montre la rétrodiffusion en bande L d'une couche de branches primaires courbes en fonction de l'angle d'incidence ainsi que la rétrodiffusion d'une couche de branches cylindriques (non courbées). Les coefficients de rétrodiffusion d'une couche constituée d'une collection de branches cylindriques qui ont la même distribution d'orientation que les segments des branches courbes ont été tracés pour comparaison. La forte variation du coefficient de rétrodiffusion pour les branches cylindriques autour de 20° s'explique par l'orientation relative des diffuseurs par rapport à l'onde incidente. Les branches sont des diffuseurs longs par rapport à la longueur d'onde. Leur diagramme de rétrodiffusion présente donc un maximum autour de la direction perpendiculaire à l'axe du cylindre (voir la figure 2.4 page 46). Par conséquent, la rétrodiffusion est significative si au moins une partie des branches est orientée perpendiculairement à l'onde incidente [Picard, 1997]. Cette condition est vérifiée si l'angle d'incidence θ_0 est supérieur au complémentaire de l'angle d'inclinaison des branches β , soit $\theta_0 > 90^\circ - \beta$. Dans le cas des branches courbes ou de la collection de branches cylindriques, la variation est moins brutale car l'inclinaison des branches ou des segments de branches est répartie sur une plus large gamme.

A partir de 15° , la rétrodiffusion des branches courbes et celle de la collection équivalente sont voisines. Ce résultat montre que la courbure joue un rôle similaire à l'orientation des branches. En pratique, la courbure peut donc être modélisée plus simplement par une collection de branches cylindriques, ayant des orientations adaptées. Ceci implique que la courbure peut être négligée si l'orientation est quasi-uniforme. C'est le cas des branches secondaires, tertiaires et les aiguilles. Par contre, la courbure des branches primaires peut avoir un impact sur les variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence. Cet impact est significatif quand les branches primaires sont les diffuseurs principaux, comme en bande L.

Dans les modèles RT et RT3D, les branches primaires sont modélisées par des cylindres dont l'orientation varie de $\pm 5^\circ$ autour de la moyenne. Ceci permet de tenir compte simplement de la variabilité de l'orientation et de la courbure. Dans les modèles cohérents BORN et BORN3D, la forme des branches dépend de la description utilisée. La description la plus détaillée est obtenue avec les maquettes AMAP complètes. Elle inclue à la fois la courbure et la conicité.

2.2.6 Cylindre hétérogène

Le cylindre hétérogène permet de modéliser la variabilité de la constante diélectrique à l'intérieur du bois. En effet, la composition du bois varie radialement dans le tronc et les branches. On distingue deux échelles de variation :

- **la variation à l'intérieur des cernes, ou variation annuelle.** Le bois de printemps contient plus de vaisseaux pour faire circuler la sève alors que le bois d'été est moins irrigué mais plus résistant mécaniquement.

- **la variation entre le centre et la périphérie.** La sève s'écoule à la périphérie de l'arbre et est donc plus humide que le centre qui devient inactif au bout d'une dizaine d'année.

La deuxième variation est la plus importante du point de vue électromagnétique car la constante diélectrique dépend principalement de la teneur en eau et parce que l'échelle de la variation annuelle est petite par rapport aux longueurs d'onde radar.

La surface du tronc ou des branches peut être de nature différente du bois :

- après une pluie, l'écorce peut être gorgée d'eau, formant ainsi une fine pellicule d'eau libre, de constante diélectrique très élevée.
- la neige fixée sur les branches joue un rôle important en augmentant le rayon visible de la branche. L'effet dépend de la teneur en eau de la neige et est maximal à la fonte.

Ces hétérogénéités peuvent être modélisées par un cylindre dont la constante diélectrique varie radialement.

Matrice de diffusion.

Le calcul de la matrice de diffusion sous l'approximation du cylindre fini est donné dans [Kolawole, 1992].

Diffuseurs dans le milieu

Afin de modéliser l'écoulement de la sève en périphérie, on considère des cylindres contenant 50% d'humidité à l'intérieur (sur 90% du rayon) et une humidité de 90% à la périphérie (sur les 10% du rayon restant).

La figure 2.10 montre la rétrodiffusion d'un milieu semi-infini constitué de tels diffuseurs, et pour comparaison le cas de cylindres homogènes contenant 50% et 90% d'humidité. Pour les faibles rayons, le cylindre hétérogène se comporte comme s'il n'y avait pas de couche périphérique. En effet, l'onde pénètre à l'intérieur du diffuseur et "voit" essentiellement une humidité de 50%. Au contraire, pour les rayons importants ($k_p a > 5$ soit $a > 4\text{cm}$ en bande L), la diffusion est principalement gouvernée par la surface du cylindre, et donc par la couche plus humide.

La pénétration d'une onde dans un milieu dépend de l'épaisseur de peau δ [Jackson, 1962, p 298]. Elle est donnée par :

$$k_p \delta = \frac{2\text{Re}\epsilon_r}{\text{Im}\epsilon_r} \quad (2.5)$$

soit environ 7 en bande L (1.2GHz) et pour une humidité de 90%.

Ces résultats montrent que lorsque l'épaisseur de la couche périphérique dépasse environ $\frac{0.5}{7} \approx 0.07$ fois l'épaisseur de peau, le cylindre se comporte comme si l'ensemble du cylindre

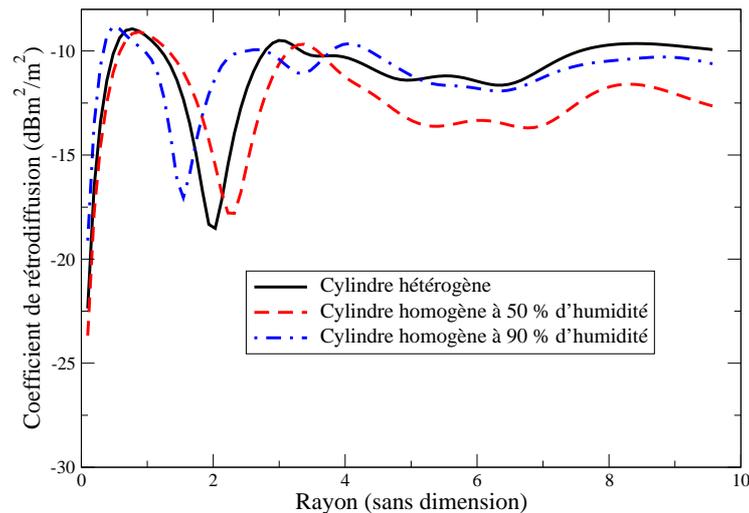


FIG. 2.10 – Rétrodiffusion d'une couche semi-infinie de cylindres hétérogène en fonction du rayon adimensionné.

était composé comme sa couche externe. En pratique, c'est le cas pour le tronc en bande L. En bande C, les branches secondaires sont les diffuseurs principaux, et sont trop petites pour être affectées significativement par ce phénomène.

Les cylindres hétérogènes n'ont pas été utilisés dans les modèles développés lors de ce travail car les variations radiales de la constante diélectrique n'étaient pas disponibles. L'impact de cette simplification est difficile à déterminer car d'une manière générale, les mesures de constante diélectrique (même moyenne) sont imprécises.

2.2.7 Disque elliptique

Les disques ou les ellipsoïdes permettent de modéliser les feuilles. Le calcul de la matrice de diffusion se fait sous l'approximation de Rayleigh-Gans qui est valide pour les diffuseurs dont au moins une des dimensions est petite devant la longueur d'onde [Karam and Fung, 1989]⁵. Cette hypothèse est largement vérifiée jusqu'en bande X. Dans les travaux présentés dans ce manuscrit, les forêts de feuillus ne sont pas abordées, c'est pourquoi ces diffuseurs n'ont pas été étudiés en détail. La modélisation des feuilles de blé sera abordée à la section 4.2.1.

⁵Il y a des erreurs de typographie dans ce papier. Se référer à [Abramowitz and Stegun, 1972] pour le calcul des fonctions gamma.

2.2.8 Le sol

Le rôle du sol dans la rétrodiffusion des milieux végétaux est fondamental. Le sol intervient dans la rétrodiffusion par deux mécanismes : la rétrodiffusion directe de l'onde incidente (à travers les trouées ou après atténuation par le couvert) et la diffusion par interaction sol-végétation, dite double rebond (*double bounce*). En fonction des configurations du capteur (fréquence, incidence, polarisation), l'un ou l'autre des mécanismes peut être dominant. Il est donc primordial de s'intéresser à la modélisation du sol, et plus généralement à la modélisation du sous-bois.

La modélisation des sols est un domaine de recherche à part entière, qui s'intéresse essentiellement aux sols agricoles, dont l'objectif thématique est de mesurer l'humidité et la rugosité des surfaces. La problématique de la modélisation est similaire à la modélisation des couverts forestiers : caractérisation et modélisation électromagnétique.

La diffusion des sols est un problème de diffusion de surface dans le domaine des micro-ondes pour les sols assez humides ($M_v > 5\%$) car la pénétration de l'onde est inférieure à une dizaine de centimètres. Les sols sont caractérisés par des paramètres statistiques qui décrivent la géométrie de la surface (la rugosité) et par la constante diélectrique déduite de l'humidité relative (M_v humidité relative volumique)[Hallikainen et al., 1985]. Dans les modèles classiques, la surface est caractérisée par la hauteur quadratique moyenne, la longueur de corrélation, et la forme de la fonction d'autocorrélation (gaussienne ou exponentielle). Des travaux récents ont montré qu'une description fractale pouvait être mieux adaptée dans certains cas [Mattia and Le Toan, 1999][Mattia et al., 2001b]. D'autres travaux [Davidson et al., 2000] ont mis en évidence les difficultés expérimentales de l'estimation de la longueur de corrélation. Dans le cas des couverts forestiers, s'ajoutent des problèmes propres liés à l'hétérogénéité du milieu (hétérogénéité de la rugosité, de l'humidité et de la nature du sol, du micro-relief et de la présence de racines, cailloux, rochers, etc)⁶ et à l'accès pour réaliser les mesures expérimentales (les mesures de la rugosité en présence de sous-bois est impossible).

La modélisation électromagnétique des surfaces rugueuses est le sujet de nombreux travaux. Trois types de modèles peuvent être distingués :

- Les modèles "exacts" qui résolvent numériquement des équations de Maxwell par la méthode des moments [Soriano and Saillard, 2001] ou par FDTD (*Finite Difference Time Domain*)[Bourgeois and Smith, 1996][Hastings et al., 1995]. Ces méthodes, très coûteuses en temps de calcul et difficiles à mettre en oeuvre, sont développées à des fins de recherche, en particulier pour vérifier les domaines d'applications des modèles approchés. Il ne peuvent être utilisés directement dans un modèle de couvert végétal.

⁶Le travail des surfaces agricoles les rend homogènes. De plus, en fonction de l'opération réalisée (labour, hersage, roulage), on peut avoir une bonne idée de la rugosité.

- Les modèles approchés ou asymptotiques qui résolvent analytiquement les équations de Maxwell ou plus souvent une formulation intégrale équivalente, sous des hypothèses simplificatrices. Ces modèles ont donc un domaine de validité (souvent mal connu). On peut citer : *Small Perturbation Model* (SPM), *Small Slope Approximation* (SSA) [Voronovich, 1994], *Kirchoff Approximation* (KA) déclinée en deux versions *Physical optics* (KA-PO) ou *Geometrical optics* (KA-GO), et *Integral Equation Model* (IEM) [Fung et al., 1992] [Fung, 1994]. Ces modèles sont bien adaptés à la modélisation radar des sol sous couverts végétaux. Le modèle IEM est le modèle le plus employé car son domaine de validité couvre la gamme des valeurs usuelles des paramètres.
- Les modèles semi-empiriques. Ces modèles sont plutôt adaptés aux algorithmes d'inversion car ils sont gouvernés par un nombre restreint de paramètres et décrivent correctement le comportement moyen des sols. On peut citer *Michigan Empirical Model* (MEM) [Oh et al., 1992].

L'énergie diffusée par une surface rugueuse infinie est composée de deux parties : une partie cohérente qui se propage dans la direction spéculaire uniquement, et une partie diffuse qui se propage dans toutes les directions. Un sol parfaitement lisse ne diffuse que dans le spéculaire, alors qu'une surface très rugueuse diffuse dans toutes les directions. En télédétection des sols, on ne s'intéresse qu'à la deuxième partie car elle est responsable de la rétrodiffusion. Au contraire, en modélisation des couverts, les deux parties jouent un rôle important.

Diffusion cohérente du sol. Interaction sol-végétation.

Comme la partie cohérente de la diffusion du sol ne se propage que dans la direction spéculaire, elle ne contribue pas directement à la rétrodiffusion, mais indirectement après interaction avec la végétation (voir la section 1.2.3 à propos des mécanismes de diffusion du premier ordre). La diffusion spéculaire est dite cohérente car la phase de l'onde réfléchi est liée à la phase de l'onde incidente. Cette propriété peut induire des effets cohérents comme par exemple le *backscattering enhancement* (cf section 1.2.4).

Le champ réfléchi⁷ est lié linéairement au champ incident. Pour une onde incidente d'angle d'incidence θ , la relation s'écrit :

$$\bar{\mathbf{E}}_r(\theta) = \bar{\mathbf{R}}(\theta) \cdot \bar{\mathbf{E}}_i(\pi - \theta) = \begin{bmatrix} R_{hh}(\theta) & 0 \\ 0 & R_{vv}(\theta) \end{bmatrix} \bar{\mathbf{E}}_i(\pi - \theta) \quad (2.6)$$

où $\bar{\mathbf{R}}$ est la matrice de réflexion (on considère que le sol est un milieu isotrope à symétrie azi-

⁷Pour une surface rugueuse, c'est le champ réfléchi moyen.

mutale, donc les termes croisés sont nuls). Dans le cas d'une surface parfaitement lisse, les coefficients R_{hh} et R_{vv} sont les coefficients de Fresnel (TE et TM respectivement). Dans le cas d'une surface rugueuse, les coefficients de Fresnel sont corrigés par un facteur de perte (*loss factor*) [Ishimaru, 1997, p 480]. Ce facteur de perte dépend des caractéristiques de la surface et du modèle de diffusion utilisé. Dans le cas d'une distribution gaussienne des hauteurs⁸ et sous l'approximation de Kirchoff, la diffusion cohérente s'écrit :

$$\overline{\mathbf{E}}_r(\theta) = e^{-2k_0^2\sigma^2 \cos^2\theta} \overline{\mathbf{F}}(\theta) \cdot \overline{\mathbf{E}}_i(\pi - \theta) \quad (2.7)$$

où σ est la hauteur quadratique moyenne de la surface, et $\overline{\mathbf{F}}$ est la matrice des coefficients de Fresnel.

La figure 2.11 montre les variations des coefficients de réflexion (en énergie) en polarisations horizontale et verticale pour une surface lisse, et pour une surface faiblement rugueuse ($\sigma = 1.6\text{cm}$ en bande L) contenant 20% d'humidité (ce sont les valeurs utilisées pour les simulations sur le site des Landes).

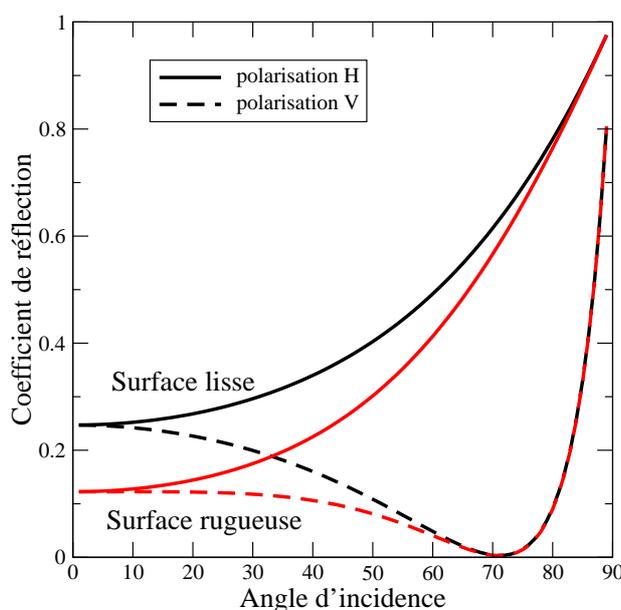


FIG. 2.11 – Coefficient de réflexion énergétique en fonction de l'angle d'incidence pour une surface lisse et une surface rugueuse (rms de 1.6cm).

Le facteur de perte est d'environ 0.5 à incidence verticale. La polarisation verticale s'annule à l'angle de Brewster. La grande différence entre les deux polarisations autour de cet angle a une influence importante sur les mécanismes prépondérants d'interaction (voir les sections 3.2.3 et

⁸Ce point resterait à vérifier pour un sol dans une forêt.

3.3.1).

En bande C, le facteur de perte est bien plus faible, environ 0.006 à incidence verticale. Le mécanisme de double rebond est en général négligeable.

Diffusion incohérente du sol. Rétrodiffusion.

La diffusion incohérente est due aux variations aléatoires de la hauteur de la surface. Les phases de l'onde incidente et l'onde réfléchie sont totalement décorrélées. Pour une onde incidente, un sol rugueux diffuse dans toutes les directions. Il faut cependant distinguer l'énergie rétrodiffusée qui contribue directement à la rétrodiffusion totale (ordre 0 du transfert radiatif) de l'énergie diffusée dans les autres directions qui contribue indirectement (ordre 1 du transfert radiatif, voir section 1.2.3) et est, en général, faible devant la réflexion cohérente (en forêt, le sol est en général peu rugueux).

2.3 Modélisation par le transfert radiatif

De nombreux modèles de transfert radiatif appliqués aux couverts forestiers ont été développés. Ces modèles se distinguent principalement par la méthode de résolution de l'équation du transfert radiatif et par la géométrie du milieu modélisé. La méthode itérative est la méthode la plus utilisée, mais elle ne prend en compte qu'un nombre restreint de mécanismes. Le milieu est souvent décrit en couches horizontales homogènes c'est à dire que les hétérogénéités horizontales ne sont pas prises en compte. Les travaux présentés dans la suite, ont consisté à améliorer ces deux aspects.

Cette partie est organisée en deux sections. Dans une première section, les modèles RT et RT3D basés sur la méthode itérative sont décrits. Dans la seconde section, la méthode *discrete ordinate and eigenvalue* qui est la base du modèle DORT est présentée.

2.3.1 Résolution par la méthode itérative. Modèles RT et RT3D

Principe

La méthode consiste à supposer que le terme de diffusion est faible devant le terme d'extinction, c'est à dire que l'albédo $\omega = \frac{\kappa_s}{\kappa_a + \kappa_s}$ du milieu est faible. La solution est alors une série :

$$\bar{\mathbf{I}} = \sum_{n=0}^{\infty} \omega^n \bar{\mathcal{I}}^{(n)} \quad (2.8)$$

où chaque terme $\bar{\mathbf{I}}^{(n)} = \omega^n \bar{\mathbf{I}}^{(n)}$ est d'ordre $O(\omega^n)$. Quand l'albédo est faible, la série converge rapidement, et seuls les premiers ordres sont calculés. En pratique, les ordres 0, 1, voire 2 sont conservés⁹.

Le bénéfice de cette approche est de fournir la contribution séparée de différents mécanismes d'interaction. L'ordre 0 représente la propagation de l'onde incidente dans le milieu sans diffusion dans le volume. Il s'écrit :

$$\frac{d\bar{\mathbf{I}}^{(0)}(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -\bar{\bar{k}}_e \cdot \bar{\mathbf{I}}^{(0)}(\vec{r}, \hat{s}) \quad (2.9)$$

Dans un milieu limité par une surface réfléchissante (le sol) l'ordre 0 est composé de l'onde incidente (descendante) et de l'onde réfléchie (montante). Si la surface est rugueuse, une partie de l'onde réfléchie revient vers le capteur après avoir traversé le volume. C'est le mécanisme de rétrodiffusion atténuée du sol. Voir figure 2.12.

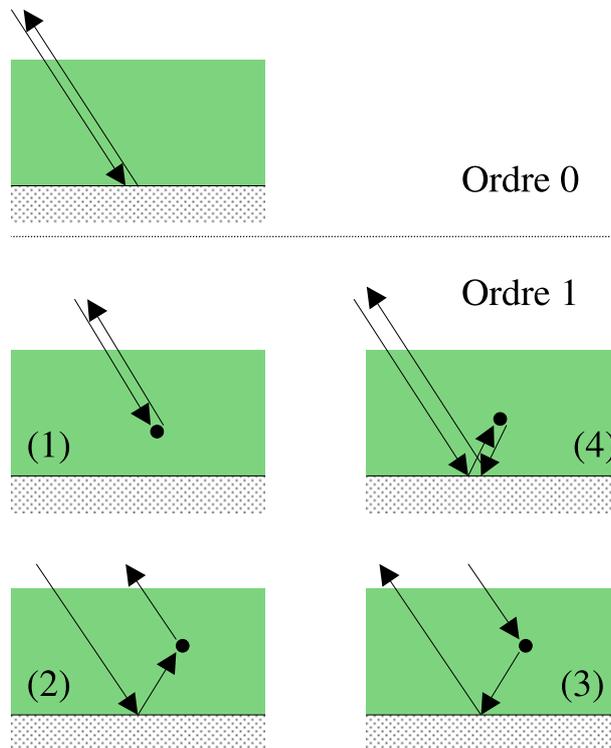


FIG. 2.12 – Mécanismes d'interaction d'ordre 0 et d'ordre 1.

⁹La solution à l'ordre 3 n'a jamais été implémentée dans les modèles car, contrairement aux ordres inférieurs, elle requiert le calcul de la matrice de phase dans toutes les directions incidentes et diffusées, c'est à dire qu'elle a le même coût de calcul que les méthodes "exactes" telles la *doubling matrix* ou *discrete ordinate and eigenvalues method*.

En injectant l'ordre 0 dans le terme de diffusion de l'équation du transfert radiatif, on obtient l'ordre 1 qui représente les mécanismes où l'onde diffuse une seule fois dans le volume :

$$\frac{d\bar{\mathbf{I}}^{(1)}(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -\bar{\kappa}_e \bar{\mathbf{I}}^{(1)}(\vec{r}, \hat{s}) + \int_{4\pi} d\Omega_i \bar{\mathbf{P}}(\hat{s}, \hat{i}) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{(0)}(\vec{r}, \hat{i}) \quad (2.10)$$

L'ordre 1 est constitué de quatre mécanismes : $\bar{\mathbf{I}}^{(1)} = \bar{\mathbf{I}}_v^{(1)} + \bar{\mathbf{I}}_{vs}^{(1)} + \bar{\mathbf{I}}_{sv}^{(1)} + \bar{\mathbf{I}}_{svs}^{(1)}$

1. rétrodiffusion simple de volume.
2. diffusion surface-volume (double rebond).
3. diffusion volume-surface (double rebond).
4. diffusion surface-volume-surface, souvent négligeable par rapport aux trois précédents mécanismes.

Dans le cas d'une surface rugueuse, la réflexion au niveau de la surface est en partie cohérente (dans la direction spéculaire uniquement), et en partie incohérente (cf section 2.2.8). La théorie du transfert radiatif, de part sa nature incohérente, ne fait pas la distinction entre ces deux types de réflexion. Pourtant cette distinction est importante car la réflexion cohérente est la cause du phénomène de *backscattering enhancement*. En effet, les mécanismes de diffusion surface-volume et volume-surface ont, d'après le principe du chemin inverse, la même amplitude¹⁰ et, dans le cas où la réflexion est cohérente, la même phase. Par conséquent, ces deux mécanismes s'ajoutent de façon cohérente, et non incohérente comme le prévoit l'approche radiative. Afin de tenir compte de ce phénomène, il faut ajouter artificiellement un facteur 2 à ces mécanismes complémentaires. Cette solution a été appliquée aux modèles RT et RT3D.

Dans la suite, on utilisera les expressions de "diffusion cohérente surface-volume", et de "diffusion incohérente surface-volume" pour les distinguer. Si ce n'est pas précisé, "diffusion cohérente" est sous-entendue.

L'ordre 2 est obtenu en injectant les quatre termes de l'ordre 1 dans l'équation du transfert radiatif. Il est constitué de 16 termes, faisant intervenir deux diffusions de volume, et entre 0 et 3 diffusions de surfaces.

Application au milieu forestier.

L'application de la méthode décrite ci-dessus dépend de la géométrie du milieu. Les équations (2.9) et (2.10) ne peuvent être résolues analytiquement que dans un nombre de cas limité. Dans

¹⁰Cette propriété doit être vérifiée par les modèles et dans le cas contraire indique une erreur d'implémentation.

la plupart des travaux de modélisation par la méthode itérative de résolution du transfert radiatif, les couverts végétaux sont modélisés par un milieu stratifié, c'est à dire un milieu de N couches d'extension horizontale infinie, et dont les propriétés électromagnétiques (les matrices de phase et d'extinction) sont homogènes dans chaque couche. La géométrie du milieu est représentée figure 2.13.

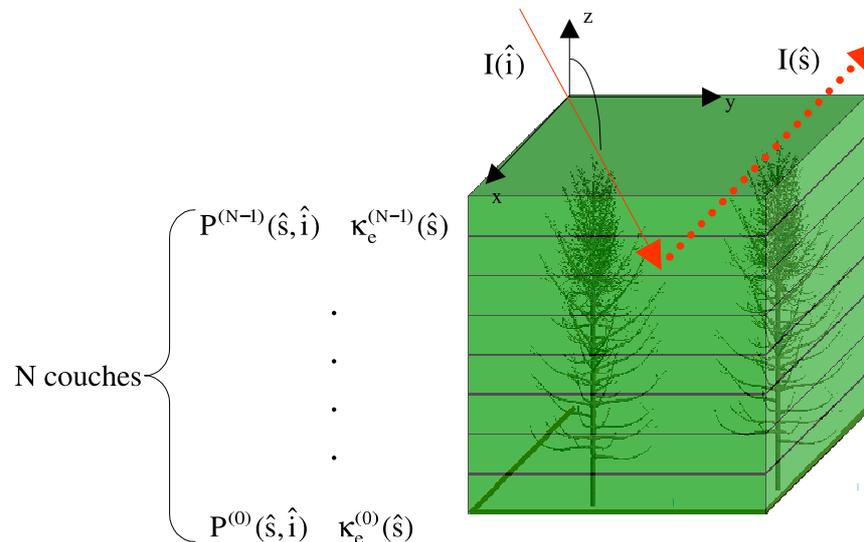


FIG. 2.13 – Géométrie d'un milieu de N couches d'extension horizontale infinie.

Cette description allie :

- **une bonne représentation du milieu végétal.** Comme les végétaux poussent verticalement, la variation des propriétés électromagnétiques est principalement verticale. Cet argument sera modéré dans la section 2.3.1. La description bidimensionnelle implique la symétrie azimutale du milieu, largement vérifiée par les végétaux.
- **une résolution simple des équations aux différents ordres.** Les matrices de phase et d'extinction ne dépendent pas de la cote z à l'intérieur des couches. L'équation (2.10) devient donc une équation différentielle linéaire (à coefficients constants) du premier ordre. La résolution est décrite dans [Tsang et al., 1985, pp 241 à 244]

Les différentes implémentations de cette méthode se distinguent principalement par le nombre de couches, et par l'ordre de résolution (ordre 1 ou ordre 2).

Du point de vue théorique, les solutions analytiques sont données par différents auteurs : Pour un milieu constitué d'une couche limitée par une surface lisse, la solution au premier ordre est donnée dans [Tsang et al., 1985, p 244], la solution au second ordre est donnée dans [Tsang et al., 1992]. Pour un milieu constitué de plusieurs couches, le principe du calcul reste le même, le premier ordre est donné dans [Hsu et al., 1994]. De nombreuses autres références sont dispo-

nibles avec des notations différentes [Ulaby et al., 1987, p 1094][Fung, 1994][Ishimaru, 1997, p 169].

Les principaux modèles sont résumés dans le tableau 2.2.

Modèle	Caractéristiques principales	Observations
Modèle du nuage d'eau [Attema and Ulaby, 1978]	1 ^{er} ordre, 2 couches	
MIMICS [Ulaby et al., 1990]	1 ^{er} ordre, 4 couches	Le plus utilisé dans la communauté. Disponible sur internet.
Karam et Fung [Karam et al., 1992]	2 nd ordre, 4 couches	
MIT/CESBIO [Hsu, 1996]	2 nd ordre, 4 couches	Inclut le <i>branching model</i> [Yueh et al., 1992].
Santa Barbara [Wang et al., 1993]	1 ^{er} ordre	
RT2 [Saich et al., 1995]	2 nd ordre	Résolution statistique du 2 nd ordre.
Chuah [Chuah and Tan, 1989]	diffusions multiples	Résolution statistique.

TAB. 2.2 – Principaux modèles de transfert radiatif basés sur la résolution itérative de l'équation du transfert radiatif.

Le modèle développé dans le cadre de la collaboration entre le Massachusetts Institute of Technology (MIT) et le Centre d'Étude Spatiale de Biosphère (modèle MIT/CESBIO) est la base de développements ultérieurs. Au cours des thèses de Nicolas Floury [Floury, 1999][Floury et al., 1997] et de Thierry Castel (Laboratoire Commun de Télédétection) [Castel, 1998][Castel et al., 1997] et du stage de DEA [Picard, 1997], le modèle de transfert radiatif a été couplé avec le modèle d'architecture des plantes (AMAP). Le modèle utilisé dans ce travail, le modèle RT, a été totalement réécrit. C'est un modèle multi-couches de premier ordre¹¹. Les réflexions incohérentes au niveau du sol sont négligées, c'est à dire que les mécanismes 2, 3 et 4 (voir figure 2.12) ne prennent en compte que la réflexion cohérente du sol.

¹¹Le modèle MIT/CESBIO calcule le second ordre, mais dans un cadre limité à la bande P : seules les interactions de second ordre entre les branches et le tronc sont prises en compte. Cette limitation a été réduite dans le modèle RT. Il peut calculer les interactions de second ordre entre tous les diffuseurs, mais sans réflexion sur le sol (interaction volume-volume uniquement). Dans ce manuscrit, le second ordre n'est pas utilisé car il a été avantageusement remplacé par le modèle DORT.

Transfert radiatif tridimensionnel.

Dans certains cas, la modélisation en couches horizontales homogènes est inadaptée à la modélisation des couverts forestiers. L'hétérogénéité horizontale des forêts est importante quand la densité d'arbres est faible (présence de trouées dans le couvert), et/ou lorsque la distribution des arbres est hétérogène (présence de clairières). La structure tridimensionnelle des forêts peut avoir un impact significatif sur le signal radar à faible angle d'incidence ou en interférométrie.

Une approche simple consiste à corriger la rétrodiffusion estimée par un modèle bidimensionnel, en ajoutant la rétrodiffusion du sol vu directement par le radar :

$$\sigma^0 = \alpha\sigma_v^0 + (1 - \alpha)\sigma_s^0 \quad (2.11)$$

où σ_v^0 est le coefficient de rétrodiffusion de la forêt et σ_s^0 le coefficient de rétrodiffusion du sol. α est un paramètre empirique qui représente le taux de couverture de la forêt, mais dépend aussi, entre autre, de l'angle d'incidence. Cette approche est limitée parce qu'elle n'est pas explicative (le paramètre α est empirique) et parce qu'elle est linéaire (en réalité, les variations de densité de diffuseurs interviennent non linéairement sur l'atténuation de l'onde). Des approches non linéaires, sont proposées dans [Floury, 1999, annexe B.6] et dans [Martinez et al., 2000], mais elles restent limitées car ce sont des corrections de modèles bidimensionnels.

Le développement d'un modèle de transfert radiatif tridimensionnel est nécessaire pour tenir compte correctement de la structure du couvert forestier et ainsi de s'affranchir de paramètres empiriques. Les travaux de Sun et al. [1991], de Wang et al. [1993], et [Mc Donald and Ulaby, 1993] (MIMICS2) présentent des modèles tridimensionnels avec une description statistique de la forêt. La position (et la taille et la forme des couronnes dans le modèle MIMICS2) sont des variables aléatoires. L'équation du transfert radiatif est résolue analytiquement, au prix d'approximations et de restrictions importantes sur les distributions des variables aléatoires. Pour s'affranchir de ces contraintes, Sun and Ranson [1995] proposent de coupler la méthode de résolution itérative du transfert radiatif avec une méthode de Monte-Carlo de lancer de rayon (*Ray Tracing*). Cette approche permet une grande liberté quant au positionnement des arbres, comme par exemple le positionnement à partir de mesures GPS sur le terrain. Cependant, les couronnes sont modélisées par des formes géométriques élémentaires (cône, ellipsoïde). De plus, les propriétés électromagnétiques (matrices de phase et d'extinction) sont uniformes à l'intérieur de la couronne, c'est à dire que l'hétérogénéité verticale n'est pas prise en compte.

Afin d'allier les travaux sur l'hétérogénéité verticale de Floury [1999] et les travaux de Sun and Ranson [1995] sur la structure horizontale du couvert, un modèle de transfert radiatif tridimensionnel couplé avec la description AMAP des arbres a été développé. Ce modèle est décrit

ci-dessous.

Modélisation du milieu. Par rapport à la modélisation bidimensionnelle, la modélisation tridimensionnelle d'un couvert forestier nécessite des informations supplémentaires : la position et le type des arbres, et la forme des couronnes.

- Les positions et les types d'arbre sont des paramètres d'entrée explicites du modèle. Les positions peuvent être générées aléatoirement selon une distribution donnée (uniforme, uniforme avec un volume d'exclusion, en rangée, etc) ou issues de mesures de position sur le terrain. Par type d'arbre est entendu l'ensemble des paramètres géométriques et propriétés diélectriques qui constitue la description d'un arbre (ou d'un ensemble d'arbre). Les arbres peuvent être d'espèces différentes (peuplement hétérogène), d'âges différents (comme sur les sites naturels), de tailles différentes (dominants/dominés) ou identiques (au sens du transfert radiatif bidimensionnel, c'est à dire un arbre moyen).
- Les couches homogènes d'extension infinie de la modélisation bidimensionnelle sont remplacées par des cellules homogènes d'extension finie. Ces cellules forment les couronnes. Pour respecter à la fois la variabilité verticale et la symétrie azimutale des couronnes, les cellules sont des cylindres de hauteur choisie par l'utilisateur (comme la hauteur des couches dans le transfert radiatif bidimensionnel) et de rayon adapté à l'extension horizontale de la couronne (les cellules englobent les branches primaires). Le schéma 2.14 montre, plus clairement, la structure des cellules pour un pin noir de 40 ans.

La figure 2.15 montre un peuplement de pins maritimes de 40 ans avec des rangées espacées de 6m.

Cette description du milieu impose deux modifications au modèle de transfert radiatif bidimensionnel :

- La densité des diffuseurs est supérieure dans les cellules que dans les couches infinies, car le même nombre de diffuseurs est dans un volume plus restreint. Par contre, les matrices de phase et d'extinction de chaque cellule sont calculées de la même manière.
- La résolution de l'équation du transfert radiatif est basée sur la méthode itérative, mais adaptée à la géométrie du milieu. La méthode de lancer de rayon est décrite dans la section suivante.

Méthode de lancer de rayon. La méthode de lancer de rayon consiste à propager et diffuser des rayons incidents à travers les cellules et les trouées du couvert afin de calculer l'énergie rétrodiffusée.

Chaque cellule est caractérisée par un opérateur de propagation (qui dépend de l'atténuation) $\overline{\mathbf{A}}_n$ et par des opérateurs de diffusion $\overline{\mathbf{Q}}_n^{rétro}$ pour la rétrodiffusion et $\overline{\mathbf{Q}}_n^{spec}$ pour la diffusion



FIG. 2.14 – Structure des cellules pour un pin maritime de 40 ans.

spéculaire. Pour les trouées, il n’y a ni atténuation ni diffusion ($\overline{\mathbf{Q}} = 0$ et $\overline{\mathbf{A}} = \overline{\mathbf{I}}$). La solution au premier ordre obtenue dans le cas d’un milieu bidimensionnel reste formellement valable dans le cas tridimensionnel – sous les hypothèses discutées dans la partie suivante – à condition d’utiliser les opérateurs des cellules, respectivement des trouées, quand le rayon traverse une cellule, respectivement une trouée. Par exemple, l’énergie rétrodiffusion pour un rayon incident par le mécanisme de rétrodiffusion du volume s’écrit :

$$\overline{\mathbf{I}} = \sum_n \overline{\mathbf{A}}_0 \cdots \overline{\mathbf{A}}_{n-1} \cdot \overline{\mathbf{Q}}_n^{rétro} \cdot \overline{\mathbf{A}}_{n-1} \cdots \overline{\mathbf{A}}_0 \cdot \overline{\mathbf{I}}_0 \quad (2.12)$$

où la somme en n s’étend sur toutes les couches. Le suivi de rayon permet de déterminer dans chaque couche si le rayon est dans une cellule (et laquelle) ou dans une trouée.

Le principe de la méthode du lancer de rayon est le suivant : on considère un rayon incident au sommet du couvert en une position choisie aléatoirement. Le rayon est propagé à l’intérieur du couvert de couche en couche. Quand le rayon intercepte une cellule, le rayon est :

- rétrodiffusé et propagé vers le capteur (diffusion de volume, terme 1, équation 2.12).
- diffusé dans la direction spéculaire, propagé vers le sol, réfléchi puis propagé vers le capteur (diffusion volume-surface, terme 3).
- propagé vers le bas dans la couche suivante.

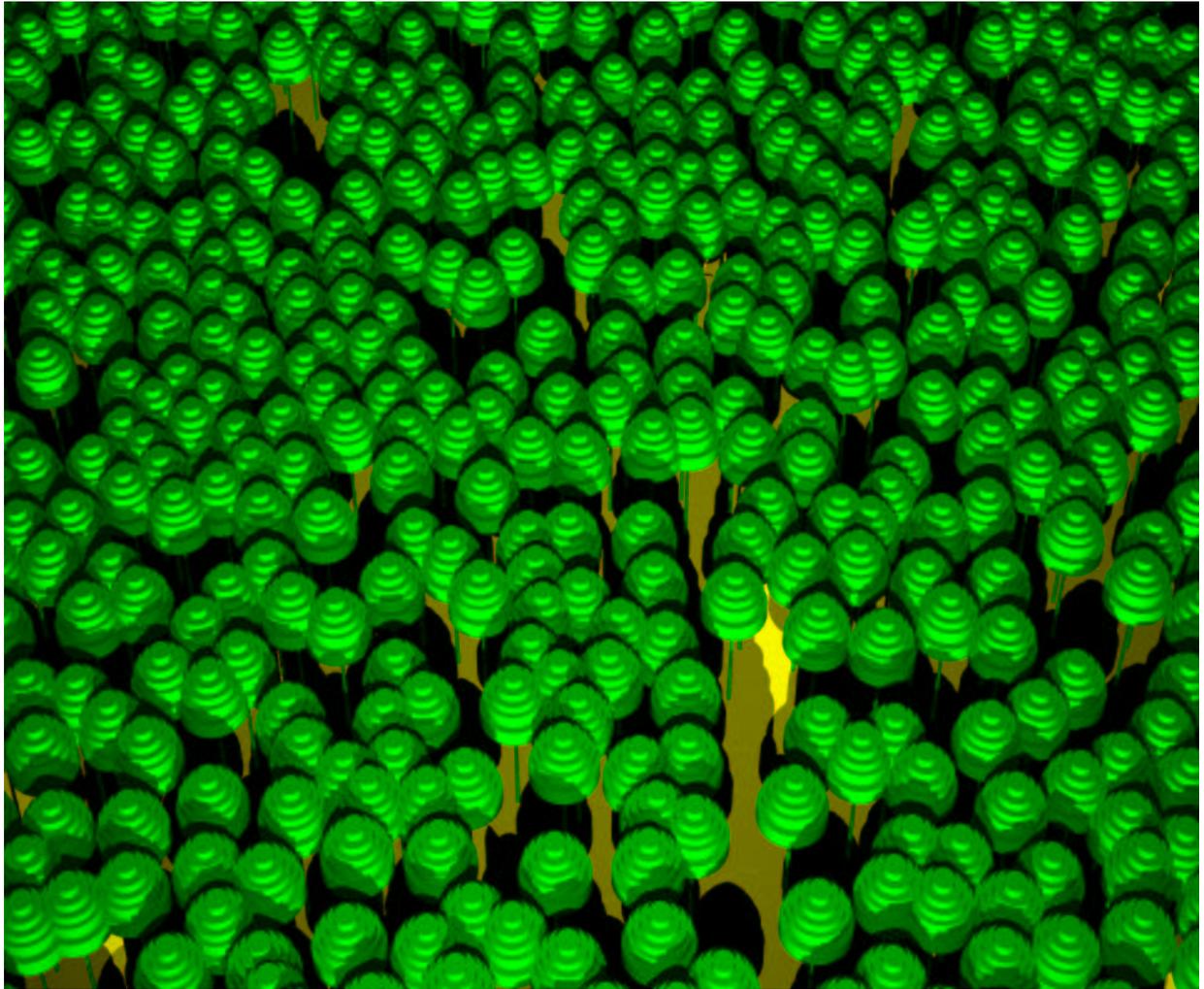


FIG. 2.15 – Plantation de pins maritimes de 40 ans vue par le modèle RT3D.

Ce processus est itéré jusqu'à ce que le rayon atteigne le sol. Le rayon est alors réfléchi, et à nouveau propagé vers le haut dans le couvert couche par couche. Quand le rayon intercepte une cellule, le rayon est :

- diffusé dans la direction spéculaire et propagé vers le capteur (diffusion surface-volume, terme 2).
- rétrodiffusé et propagé vers le sol, réfléchi puis propagé vers le capteur (diffusion surface-volume-surface, terme 4).
- propagé vers le haut dans la couche suivante.

Ce processus est itéré jusqu'à ce que le rayon sorte du couvert.

La figure 2.16 montre schématiquement la propagation et la diffusion d'un rayon. Les flèches larges représentent l'application d'un opérateur de diffusion (rétrodiffusion ou diffusion spécu-

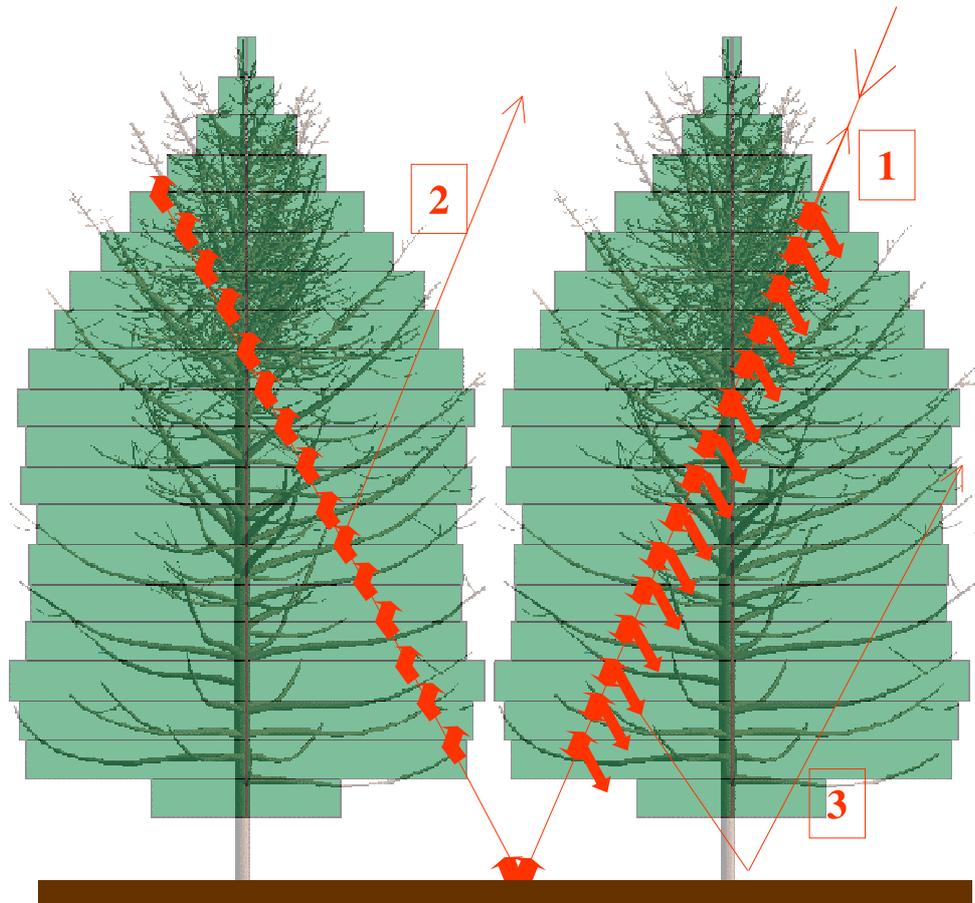


FIG. 2.16 – Principe de la méthode de suivi de rayon.

laire). La réfraction et la réflexion sur les couches sont négligées car l'indice de réfraction est toujours faible (de l'ordre de 1.004 pour un volume fractionnel de 0.1%).

La propagation d'un seul rayon incident fournit l'énergie rétrodiffusée "localement"¹². Pour obtenir le coefficients de rétrodiffusion moyen de la plantation, il est nécessaire de moyenner les énergies rétrodiffusées par un grand nombre (typiquement quelques centaines) de rayons incidents en des positions aléatoires de la plantation.

Limitations. Les limitations de l'approche tridimensionnelle présentée ci-dessus sont de deux natures : une théorique, liée à l'application du lancer de rayon aux micro-ondes, et l'autre liée à la description du milieu :

1. Le cadre d'application du lancer de rayon est l'optique géométrique. Les phénomènes

¹²cette énergie ne correspond pas physiquement à la mesure d'un pixel de l'image, car il n'est pas sujet au speckle

d'optique physique, interférence, diffraction ne peuvent pas être pris en compte¹³. Il faut donc que la taille des cellules soit très supérieure par rapport à la longueur d'onde. En bande X ($\lambda = 3cm$) et en bande C ($\lambda = 5.6cm$), cette hypothèse est bien vérifiée avec des cellules de diamètre de l'ordre du mètre. Par contre à plus basse fréquence, en bande L ($\lambda = 25cm$) et bande P ($\lambda = 75cm$), les couches du haut de la couronne pour les grands arbres, et toutes les couches pour les jeunes arbres posent problème (ce problème reste relativement mineur car ces couches contribuent peu à la rétrodiffusion). Toutefois, même si l'hypothèse n'est pas respectée, le modèle ne donne pas de résultats aberrants.

2. La description du recouvrement des couronnes est une difficulté de la modélisation tridimensionnelle. En effet, dans les forêts denses, comme par exemple sur le site de Lozère, les branches d'arbres distincts peuvent se recouvrir partiellement. Pour des pins noirs de 40 ans, la surface de la couronne projetée sur le sol est d'environ $24m^2$. La densité de tiges peut atteindre 800 tiges/ha, c'est à dire que chaque arbre dispose de $12m^2$ seulement au sol. Il y a donc un recouvrement important entre les arbres. Modéliser ce phénomène est difficile car il faudrait disposer d'une description non pas à l'échelle de l'arbre, mais à l'échelle de la parcelle de forêt, et en particulier connaître l'agencement des arbres dominants par rapport aux arbres dominés. Pour gérer cette difficulté dans le modèle tridimensionnel, les couches qui présentent un fort recouvrement (la surface de la couronne moyenne est supérieure à la surface dont dispose un arbre) sont modélisées comme par une couche horizontale infinie comme dans le modèle bidimensionnel. Cette solution, approximative, assure que lorsque la densité devient grande – la description bidimensionnelle est réaliste – le modèle tridimensionnel tend vers le modèle bidimensionnel.

2.3.2 Résolution par la méthode Discrete Ordinate. Modèles DORT

Principe de la méthode.

Dans une couche homogène, un rayon qui se propage dans la direction (θ, ϕ) est régi par l'équation du transfert radiatif :

$$\begin{aligned} \mu \frac{d\bar{\mathbf{I}}(\mu, \phi, z)}{dz} &= -\bar{\kappa}_e(\mu, \phi, z) \cdot \bar{\mathbf{I}}(\mu, \phi, z) \\ &+ \int_{-1}^1 d\mu' \int_0^{2\pi} d\phi' \cdot \bar{\mathbf{P}}(\mu, \phi, \mu', \phi', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}(\mu', \phi', z) \end{aligned} \quad (2.13)$$

¹³Cette limitation est imposée au niveau des cellules, pas au niveau des diffuseurs.

où $\mu = \cos \theta$, $\overline{\overline{\mathbf{P}}}(\mu, \phi, \mu', \phi')$ est la matrice de phase de la direction (μ', ϕ') vers (μ, ϕ) et $\overline{\overline{\mathbf{K}}}_e(\mu, \phi)$ la matrice d'extinction dans la direction (μ, ϕ) . Les matrices de phase et d'extinction dépendent de la couche, mais sont uniformes à l'intérieur de la couche (la dépendance en z est une dépendance à la couche).

Le problème consiste à résoudre l'équation (2.13) pour toutes les directions (θ, ϕ) dans toutes les couches en tenant compte des conditions aux limites. Ce problème se résout en deux étapes :

1. Détermination des solutions générales des équations différentielles dans chaque couche.
2. Application des conditions aux limites entre les couches.

Solutions générales dans chaque couche.

La résolution numérique des équations (2.13) pour toutes directions nécessite de discrétiser les deux intégrales :

1. L'intégrale en ϕ' est discrétisée par développement en série harmonique car l'intégrande est 2π -périodique.
2. L'intégrale en μ' est discrétisée par quadrature de Gauss.

On obtient ainsi un système d'équations différentielles linéaires du premier ordre solvable analytiquement.

Décomposition en série harmonique. L'intensité est décomposée en harmoniques :

$$\overline{\mathbf{I}}(\mu, \phi, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \overline{\mathbf{I}}^{mc}(\mu, z) \cos(m\phi) + \overline{\mathbf{I}}^{ms}(\mu, z) \sin(m\phi) \quad (2.14)$$

En supposant que le milieu respecte la symétrie azimutale, la matrice d'extinction ne dépend pas de ϕ et la matrice de phase ne dépend que de $\phi' - \phi$. La matrice de phase s'écrit :

$$\overline{\overline{\mathbf{P}}}(\mu, \phi, \mu', \phi', z) = \sum_{m=0}^{\infty} \overline{\overline{\mathbf{P}}}^{mc}(\mu, \mu', z) \cos[m(\phi - \phi')] + \overline{\overline{\mathbf{P}}}^{ms}(\mu, \mu', z) \sin[m(\phi - \phi')] \quad (2.15)$$

En injectant ces deux relations dans l'équation du transfert radiatif, on obtient :

$$\mu \frac{d\bar{\mathbf{I}}^{mc}(\mu, z)}{dz} = -\bar{\kappa}_e(\mu, z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{mc}(\mu, z) \quad (2.16)$$

$$+ (1 + \delta_m) \pi \int_{-1}^1 d\mu' [\bar{\mathbf{P}}^{mc}(\mu, \mu', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{mc}(\mu', z) - \bar{\mathbf{P}}^{ms}(\mu, \mu', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{ms}(\mu', z)]$$

$$\mu \frac{d\bar{\mathbf{I}}^{ms}(\mu, z)}{dz} = -\bar{\kappa}_e(\mu, z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{ms}(\mu, z) \quad (2.17)$$

$$+ (1 + \delta_m) \pi \int_{-1}^1 d\mu' [\bar{\mathbf{P}}^{ms}(\mu, \mu', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{mc}(\mu', z) + \bar{\mathbf{P}}^{mc}(\mu, \mu', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^{ms}(\mu', z)]$$

Ce système d'équations couplées peut être réduit par des considérations de symétrie. La symétrie azimutale implique la symétrie réflexive par rapport à tout plan vertical (quelque soit son azimut) : le champ électrique polarisé verticalement est invariant, alors que le champ électrique polarisé horizontalement est de même amplitude, de même direction, mais de sens opposé (voir figure 2.17). On en déduit que :

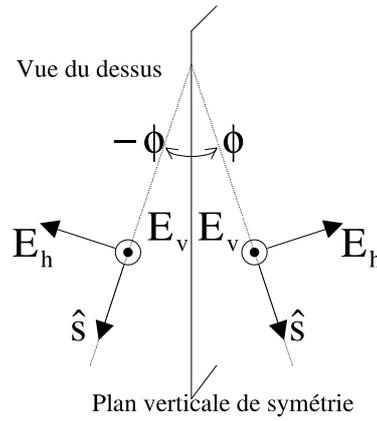


FIG. 2.17 – Effet d'une réflexion par rapport à un plan vertical sur les champs électriques polarisés verticalement et horizontalement.

$$\bar{\mathbf{I}}^{mc} = \begin{bmatrix} I_v^{mc} \\ I_h^{mc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{\mathbf{I}}^{ms} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U^{ms} \\ V^{ms} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

En posant :

$$\bar{\mathbf{I}}^m = \begin{bmatrix} I_v^{mc} \\ I_h^{mc} \\ U^{ms} \\ V^{ms} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{\mathbf{P}}^m = \begin{bmatrix} P_{11}^{mc} & P_{12}^{mc} & -P_{13}^{ms} & -P_{14}^{ms} \\ P_{21}^{mc} & P_{22}^{mc} & -P_{23}^{ms} & -P_{24}^{ms} \\ P_{31}^{ms} & P_{32}^{ms} & P_{33}^{mc} & P_{34}^{mc} \\ P_{41}^{ms} & P_{42}^{ms} & P_{43}^{mc} & P_{44}^{mc} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

les équations couplées (2.16) se simplifient en une équation :

$$\mu \frac{d\bar{\mathbf{I}}^m(\mu, z)}{dz} = -\bar{\kappa}_e(\mu, z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^m(\mu, z) + (1 + \delta_m) \pi \int_{-1}^1 d\mu' \bar{\mathbf{P}}^m(\mu, \mu', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^m(\mu', z) \quad (2.20)$$

Cette équation décrit la propagation du mode m . Le mode $m = 0$ est un cas particulier car les coefficients de la décomposition en sinus sont nuls : $\bar{\mathbf{P}}^{0s} = 0$ et $\bar{\mathbf{I}}^{0s} = 0$. On pose alors :

$$\bar{\mathbf{I}}^0 = \begin{bmatrix} I_v^{0c} \\ I_h^{0c} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{\mathbf{P}}^m = \begin{bmatrix} P_{11}^{mc} & P_{12}^{mc} \\ P_{21}^{mc} & P_{22}^{mc} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dans la suite, on ne distinguera pas le mode $m = 0$ des autres modes dans l'écriture des équations.

Quadrature de Gauss de l'intégrale en θ' La quadrature de Gauss consiste à approximer l'intégrale sur μ' par une somme discrète pondérée [Jin, 1993, p 97] :

$$\int_{-1}^1 d\mu' \bar{\mathbf{P}}^m(\mu, \mu', z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^m(\mu', z) \approx \sum_{i=1}^N w_i [\bar{\mathbf{P}}^m(\mu, \mu_i, z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^m(\mu_i, z) + \bar{\mathbf{P}}^m(\mu, -\mu_i, z) \cdot \bar{\mathbf{I}}^m(-\mu_i, z)] \quad (2.22)$$

Comme, la suite du développement est essentiellement algébrique, il est avantageux de passer en notation vectorielle/matricielle. On définit le vecteur des intensités $\bar{\mathcal{I}}^m$ du mode m . Ce vecteur est composé de quatre blocs contenant les quatre composantes de Stokes. Dans chaque bloc, les

directions μ varient de μ_1 à μ_N puis de μ_{-1} à μ_{-N} .

$$\bar{\mathcal{I}}^m(z) = \begin{bmatrix} I_v^{mc}(+\mu_1, z) \\ \vdots \\ I_v^{mc}(+\mu_N, z) \\ I_v^{mc}(-\mu_1, z) \\ \vdots \\ I_v^{mc}(-\mu_N, z) \\ I_h^{mc}(+\mu_1, z) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

La matrice d'extinction est formée de 16 blocs :

$$\bar{\bar{\kappa}}_e(z) = \begin{bmatrix} [\kappa_{e11}(z)] & [\kappa_{e12}(z)] & [\kappa_{e13}(z)] & [\kappa_{e14}(z)] \\ [\kappa_{e21}(z)] & [\kappa_{e22}(z)] & [\kappa_{e23}(z)] & [\kappa_{e24}(z)] \\ [\kappa_{e31}(z)] & [\kappa_{e32}(z)] & [\kappa_{e33}(z)] & [\kappa_{e34}(z)] \\ [\kappa_{e41}(z)] & [\kappa_{e42}(z)] & [\kappa_{e43}(z)] & [\kappa_{e44}(z)] \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

où chaque bloc est donné par :

$$[\kappa_{epq}(z)] = \text{diag}_{2N}(\kappa_{epq}(\mu_1, z), \dots, \kappa_{epq}(\mu_N, z), \kappa_{epq}(-\mu_1, z), \dots, \kappa_{epq}(-\mu_N, z)) \quad (2.25)$$

La matrice de phase s'écrit :

$$\bar{\bar{\mathcal{P}}}^m(z) = \begin{bmatrix} [P_{11}^{mc}(z)] & [P_{12}^{mc}(z)] & [-P_{13}^{ms}(z)] & [-P_{14}^{ms}(z)] \\ [P_{21}^{mc}(z)] & [P_{22}^{mc}(z)] & [-P_{23}^{ms}(z)] & [-P_{24}^{ms}(z)] \\ [P_{31}^{ms}(z)] & [P_{32}^{ms}(z)] & [P_{33}^{mc}(z)] & [P_{34}^{mc}(z)] \\ [P_{41}^{ms}(z)] & [P_{42}^{ms}(z)] & [P_{43}^{mc}(z)] & [P_{44}^{mc}(z)] \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

où chaque bloc $[P_{pq}^{m\gamma}(z)]$ s'écrit :

$$\begin{bmatrix} P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_1, +\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_1, \mu_N) & P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_1, -\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_1, -\mu_N) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_N, +\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_N, \mu_N) & P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_N, -\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(+\mu_N, -\mu_N) \\ P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_1, +\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_1, \mu_N) & P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_1, -\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_1, -\mu_N) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_N, +\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_N, \mu_N) & P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_N, -\mu_1) & \cdots & P_{pq}^{m\gamma}(-\mu_N, -\mu_N) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

La dépendance en z est implicite pour éclaircir un minimum l'écriture. $p, q = 1, \dots, 4$, et $\gamma = c, s$
Enfin, la matrice de poids est donné par :

$$\overline{\overline{w}} = \text{diag}_{8N}(w_1, \dots, w_N, w_1, \dots, w_N, \dots) \quad (2.28)$$

et la matrice des cosinus :

$$\overline{\overline{\mu}} = \text{diag}_{8N}(\mu_1, \dots, \mu_N, \mu_{-1}, \dots, \mu_{-N}, \dots) \quad (2.29)$$

En appliquant l'équation (2.20) aux directions μ_i et $-\mu_i$ pour $i = 1 \dots N$, on obtient alors le système d'équations différentielles :

$$\frac{d\overline{\overline{T}}^m(z)}{dz} = -\overline{\overline{A}}(z) \cdot \overline{\overline{T}}^m(z) \quad \text{avec} \quad \overline{\overline{A}}(z) = [\overline{\overline{\mu}}^{-1} \overline{\overline{\kappa}}_e(z) - (1 + \delta_m) \pi \overline{\overline{\mu}}^{-1} \overline{\overline{P}}^m(z) \cdot \overline{\overline{w}}] \quad (2.30)$$

A l'intérieur d'une couche homogène, la matrice $\overline{\overline{A}}$ ne dépend pas de z (Pour ne pas alourdir les notations, on distinguera plus loin les différentes couches). Dans chaque couche, le système est donc un système d'équations différentielles du premier ordre à coefficients constants. La solution générale est obtenue après diagonalisation de $\overline{\overline{A}}$. On note β_j les $8N$ valeurs propres¹⁴ ($4N$ pour le mode $m = 0$), $\overline{\overline{\mathcal{E}}}$ la matrice des vecteurs propres, et $\overline{\overline{T}}(z) = \text{diag}(e^{\beta_1 z} \dots e^{\beta_{8N} z})$. La solution générale de l'équation s'écrit :

$$\overline{\overline{T}}^m(z) = \overline{\overline{\mathcal{E}}}^m \cdot \overline{\overline{T}}^m(z - z_0) \cdot \overline{\overline{x}}^m \quad (2.31)$$

où $\overline{\overline{x}}^m$ sont les constantes inconnues à déterminer à partir des conditions aux limites. Le choix de l'origine z_0 est libre, puisque $\overline{\overline{x}}^m$ est à déterminer (dans la suite, on prendra le haut de chaque couche comme origine).

Résolution pour un milieu multi-couches

On considère un milieu constitué de L couches horizontales infinies. Le problème consiste à déterminer les constantes inconnues $\overline{\overline{x}}^{(l)m}$ de chaque couche l ($l = 0 \dots L - 1$), soit $8NL$ inconnues. Pour cela, on utilise les conditions aux limites qui assurent la conservation de l'énergie de l'onde incidente au sommet du couvert ($4N$ équations), entre les couches ($8N(L - 1)$ équations)

¹⁴Les valeurs propres sont couplées deux à deux. De même amplitude, une exprime la propagation vers le bas (celle de partie réelle positive) et l'autre vers le haut (celle de partie réelle négative). Cette propriété n'est pas utilisée, sinon pour vérifier l'implémentation du modèle.

et de l'onde réfléchie au niveau du sol ($4N$ équations) :

1. L'onde incidente d'intensité $\bar{\mathbf{I}}_0$ entre dans le milieu avec un angle θ_0 par rapport à la verticale¹⁵. L'intensité incidente s'écrit :

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{I}}(\mu, \phi) &= \bar{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu + \cos \theta_0) \delta(\phi) \\ &= \bar{\mathbf{I}}_0 \delta(\mu + \cos \theta_0) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(1 + \delta_m)\pi} \cos(m\phi)\end{aligned}\quad (2.32)$$

La fonction δ est discrétisée de telle façon que l'énergie soit conservée : on définit i_0 l'indice tel que $\mu_{i_0} \approx \cos \theta_0$. Le terme $\delta(\mu + \cos \theta_0)$ est alors remplacé par $\frac{\delta_{i_0}}{w_{i_0}}$. La condition à la limite supérieure s'écrit alors pour les rayons se propageant vers le bas :

$$\{\bar{\mathcal{E}}^{(L)m} \cdot \bar{x}^{(L)m}\}_{i, \mu_i < 0} = \frac{\delta_{i_0}}{w_{i_0}} \frac{1}{(1 + \delta_m)\pi} \bar{\mathbf{I}}_0 \quad (2.33)$$

2. La continuité de l'intensité entre chaque couche s'écrit :

$$\bar{\mathcal{E}}^{(l)m} \cdot \bar{\mathcal{T}}^{(l)m}(-h_l) \cdot \bar{x}^{(l)m} = \bar{\mathcal{E}}^{(l-1)m} \cdot \bar{x}^{(l-1)m} \quad \text{pour } l = 1 \dots L \quad (2.34)$$

3. Au niveau du sol, les rayons descendants ($\mu_i < 0$) sont réfléchis. La continuité avec les rayons montants ($\mu_i > 0$) s'écrit :

$$\{\bar{\mathcal{E}}^{(0)m} \cdot \bar{\mathcal{T}}^{(0)m}(-h_0) \cdot \bar{x}^{(0)m}\}_{\mu_i > 0} = \bar{\mathcal{R}}^m \{\bar{\mathcal{E}}^{(0)m} \cdot \bar{\mathcal{T}}^{(0)m}(-h_0) \cdot \bar{x}^{(0)m}\}_{\mu_i < 0} \quad (2.35)$$

La matrice $\bar{\mathcal{R}}^m$ est une matrice $4N \times 4N$ ($2N \times 2N$ pour le mode $m = 0$) contenant les coefficients de réflexion bistatique du sol (sa structure est similaire à la structure des matrices de phase $\bar{\mathcal{P}}^m$, sauf que seules les directions descendantes ($\mu_j < 0$) interviennent en colonne, et les directions montantes ($\mu_i > 0$) interviennent en ligne). Si on ne considère que la réflexion spéculaire du sol, la matrice $\bar{\mathcal{R}}^m$ est constituée de 4×4 blocs diagonaux.

L'ensemble des conditions (1) et (3), et des conditions (2) pour les $L - 1$ interfaces entre les couches constituent un système linéaire de $8NL$ équations ($4NL$ pour le mode $m = 0$). L'équation suivante montre la structure du système pour un milieu à 4 couches.

¹⁵On considère son azimut nul, sans perte de généralité car le milieu a une symétrie azimutale.

la partie diffuse de la partie cohérente de l'onde diffusée. Pour cela, on pose :

$$\bar{\bar{\mathcal{I}}} = \bar{\bar{\mathcal{I}}}^{[d]} + \bar{\bar{\mathcal{I}}}^{[c]} \quad (2.38)$$

La partie cohérente $\bar{\bar{\mathcal{I}}}^{[c]}$ est solution du système (2.36) lorsqu'il n'y a pas de diffusion, c'est à dire lorsque $\bar{\bar{\mathcal{P}}}^{(l)m} = 0$. On distingue cette solution de la solution complète par un $[c]$ en exposant¹⁹. L'intensité diffuse s'écrit finalement :

$$\bar{\bar{\mathcal{I}}}^{[d]}(\phi) = \sum_{m=0}^M [\bar{\bar{\mathcal{E}}}^{(L)m} \cdot \bar{\bar{x}}^{(L)m} - \bar{\bar{\mathcal{E}}}^{(L)[c]} \cdot \bar{\bar{x}}^{(L)[c]m}] \cdot \bar{\bar{\mathcal{C}}}(m\phi) \quad (2.39)$$

où M est le nombre de modes calculés.

Implémentation du modèle DORT.

La méthode *Discret ordinate and eigenvalue method* est peu utilisée pour la modélisation radar des couverts végétaux, même dans sa version mono-couche, en partie pour des raisons de performance. Le coût de calcul vient principalement du calcul des matrices de phase, mais l'inversion du système (2.36) n'est pas négligeable non plus. Pour que le temps de calcul soit raisonnable, il est nécessaire d'optimiser le modèle à deux niveaux : au niveau du nombre de matrices de phase à calculer, c'est à dire que les discrétisations en azimuth et en inclinaison doivent être adaptées au niveau des choix numériques et informatiques.

La discrétisation de l'azimut et de l'inclinaison dépend du diagramme de diffusion du milieu. Plus le milieu diffuse dans des directions particulières, plus la discrétisation doit être fine. Au contraire, plus un milieu est lambertien, moins il requiert de termes. La discrétisation dépend par conséquent de la fréquence du radar : en bande C ou X, le milieu diffuse dans toutes les directions, alors qu'en bande L, le diagramme de diffusion est plus piqué. Les valeurs $M = 32$ et $N = 24$ ont été utilisées dans tous les cas²⁰

Le schéma 2.18 montre l'algorithme du modèle DORT. L'optimisation du calcul des matrices de phase se fait par stockage des matrices de phase intermédiaires des diffuseurs, ce qui requiert beaucoup de mémoire (plusieurs centaines de Mo). Les matrices de phases de chaque couche sont stockées sur disque pour une utilisation ultérieure. On peut en effet remarquer que l'angle d'incidence du capteur n'intervient qu'au moment de l'inversion du système (2.36) et donc que

¹⁹La matrice des vecteurs propres ne dépend pas de m , et les vecteurs solution $\bar{\bar{x}}^{(L)m}$ sont seulement proportionnels à $\frac{1}{1+\delta_m}$.

²⁰Les valeurs retenues ne sont pas optimales, elles pourraient être plus faibles, mais elles assurent que la discrétisation n'est en aucun cas une source d'imprécision.

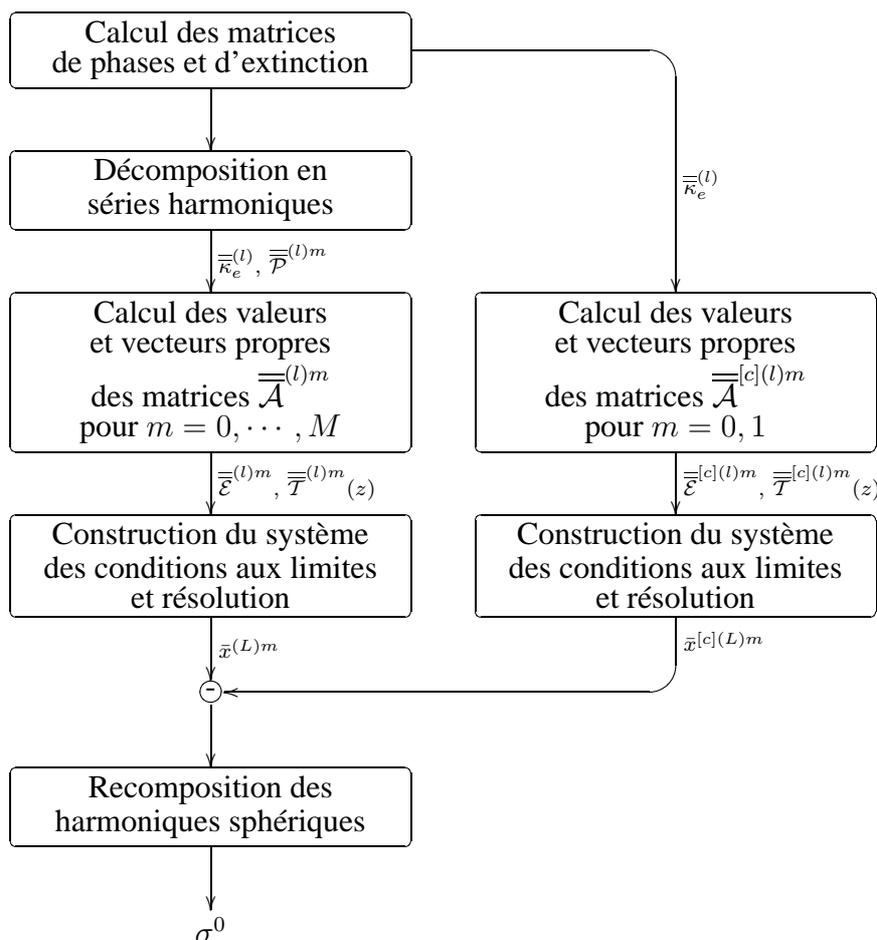


FIG. 2.18 – Algorithme du modèle DORT.

les matrices de phase sont “réutilisables”.

Le système (2.36) doit être résolu pour chaque polarisation (2 polarisations pour les 4 coefficients de rétrodiffusion HH, VV, HV, VH, ou 4 polarisations pour la matrice de Müller complète) et chaque angle d’incidence du capteur. Ce système peut atteindre quelques milliers d’inconnus. Sa forme “quasi bloc diagonal” permet d’utiliser un algorithme *Almost block diagonal system* plus performant que la méthode de Gauss ou une méthode itérative pour système creux.

2.4 Modélisation par l’approche cohérente

L’approche cohérente basée sur l’approximation de Born a été récemment appliquée à la modélisation des couverts forestiers [Lin and Sarabandi, 1999][Floury, 1999]. La motivation de ces travaux est d’obtenir la phase absolue du signal radar afin de simuler les données interféromé-

triques et d'étudier la statistique du signal radar. Mais les différences entre les deux approches ne se limitent pas à ce point.

La différence fondamentale entre les modèles de transfert radiatif et les modèles cohérents est que la moyenne sur l'ensemble des réalisations du milieu aléatoire est réalisée au niveau des diffuseurs dans l'approche radiative²¹, et au niveau de la scène entière dans l'approche cohérente. La première approche opère donc sur un milieu aléatoire, alors que la deuxième opère sur un couvert déterministe. De là, découlent les avantages et inconvénients des modèles cohérents par rapport au modèle de transfert radiatif.

Les avantages qui ont motivé le développement d'un modèle cohérent pour couverts forestiers sont les suivants :

- La description des arbres peut être plus détaillée. En particulier, les éléments végétaux (troncs, branches) des maquettes AMAP sont décomposés en cylindres élémentaires. Sous les hypothèses discutées aux sections 2.2.4 et 2.2.5, le principe du calcul de la matrice de diffusion de ces éléments est compatible avec l'approximation de Born.
- Les diffuseurs peuvent être plus grands que la hauteur des couches ou autrement dit plus grands que l'échelle caractéristique des hétérogénéités. Ce point sera détaillé dans la section sur les troncs dans le chapitre suivant (section 3.3.1) et dans la partie sur le blé (la section 4.2).
- Les phénomènes d'interférence comme le *backscattering enhancement* et les effets de "cluster" sont pris en compte. Ces deux phénomènes peuvent être ajoutés, plus ou moins précisément à l'approche radiative en ajoutant 3dB sur les termes couplés pour le premier, et en utilisant le *branching model*[Yueh et al., 1992] pour le second.

Par contre, la modélisation cohérente a quelques inconvénients :

- Le calcul numérique est plus lourd car il est proportionnel au nombre de diffuseurs présents dans une scène et proportionnel au nombre de réalisations nécessaires à l'obtention d'un coefficient de rétrodiffusion précis. C'est la raison pour laquelle, cette approche est plus récente que l'approche radiative.
- Les diffusions d'ordre supérieur (diffusions multiples) ne peuvent être calculées sans développement théoriques importants. De plus, le temps de calcul serait beaucoup plus important (proportionnel au carré du nombre de diffuseurs pour calculer les diffusions doubles).
- L'aspect numérique de la méthode interdit la dérivation de modèles semi-empiriques.

²¹Les matrices de phase et d'extinction expriment les propriétés moyennes des diffuseurs.

Le cadre théorique de l'approximation de Born a été présenté dans la section 1.2.4. Dans la suite, le modèle cohérent pour les couverts forestiers, dénommé BORN, est décrit. Ce modèle se décline en deux versions. La première, bidimensionnelle, est la suite des travaux de Floury [1999]. La seconde, tridimensionnelle est une amélioration similaire au modèle RT3D.

2.4.1 Application aux milieux bidimensionnels. Modèle BORN

L'application de la théorie de Born à un milieu particulier consiste à choisir une méthode de calcul de l'atténuation. En effet, le calcul de la diffusion est simple et ne pose pas de problème spécifique à un milieu.

Le calcul de l'atténuation requiert le découpage du milieu en zones homogènes. Les modèles développés par Lin and Sarabandi [1999] et Floury [1999] sont bidimensionnels, c'est à dire, que la scène est décomposée en couches horizontales infinies. Le choix de l'épaisseur des couches est un compromis entre le respect de l'hétérogénéité verticale des arbres et un nombre suffisant de diffuseurs dans la couche pour calculer la moyenne des matrices de diffusion dans la direction de propagation (*forward scattering*). Dans le modèle BORN, cette hauteur est choisie de la même manière que pour le modèle RT.

Mais, la décomposition en couches n'est pas toujours adaptée à la description du couvert forestier comme il a été souligné dans la section 2.3.1 à propos de la modélisation par le transfert radiatif. L'approche cohérente a été adaptée à la structure tridimensionnelle de la forêt.

2.4.2 Application aux milieux tridimensionnels. Modèle BORN3D

Dans le modèle RT3D, la couronne est décomposée en cylindres pour respecter la symétrie azimutale. Cette forme est, par ailleurs, imposée par le calcul des matrices de diffusion et d'extinction. Pour le modèle cohérent, un autre découpage a été choisi : le milieu est découpé en volumes cubiques ou *voxels*. Ce découpage est mieux adapté aux paramètres d'entrée des modèles cohérents, en l'occurrence les positions des diffuseurs indépendamment les uns des autres. Cette différence n'est pas fondamentale.

La figure 2.19 montre un arbre vu par le modèle cohérent tridimensionnel BORN3D.

La matrice de diffusion du milieu est calculée de la même façon que dans le cas bidimensionnel par l'équation (1.18). Les matrices de transmission prennent en compte l'atténuation de l'onde à travers le milieu tridimensionnel, c'est à dire qu'elles résultent de la transmission à travers chaque voxel rencontré par l'onde au cours de sa propagation. La figure 2.20 montre schématiquement le principe du calcul du terme de diffusion surface-volume²².

²²Dans un voxel, l'atténuation est calculée en moyennant les matrices de diffusion des diffuseurs contenus dans

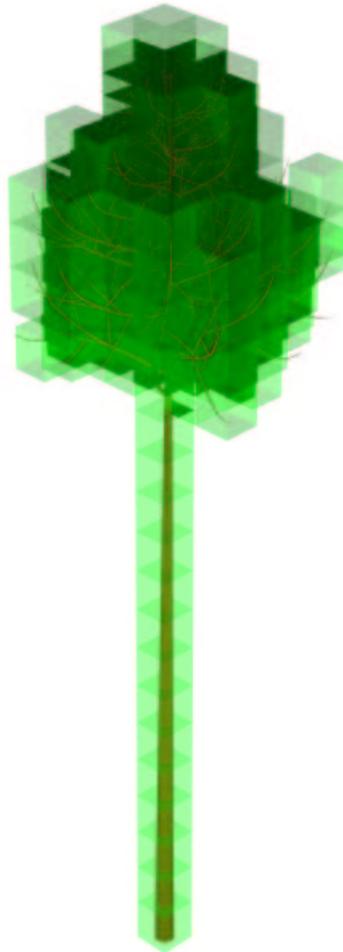


FIG. 2.19 – Pin maritime de 40 ans vu par le modèle BORN3D. Le découpage en voxels ne sert qu'au calcul de l'atténuation.

Le modèle BORN3D admet trois descriptions d'arbres différentes (cf section 2.1.2) :

- *Une description statistique* comme celle entrée dans le modèle de transfert radiatif²³. Les arbres sont alors (re)générés. Cette solution conduit à des arbres simplifiés, et sert essentiellement à comparer l'approche radiative avec l'approche cohérente.
- *Les maquettes AMAP simplifiées* (chaque branche est réduite à un cylindre). Cette solution intermédiaire permet de réduire les temps de calcul.
- *Les maquettes AMAP complètes*. Cette solution offre la description la plus fine des arbres, mais demande un grand nombre de calculs car chaque branche est décomposée en cylindres de 1cm.

le voxel et ses voxel voisins afin d'éviter les variations brutales (non réalistes) d'atténuation.

²³Les fichiers paramètres sont compatibles pour les deux modèles.

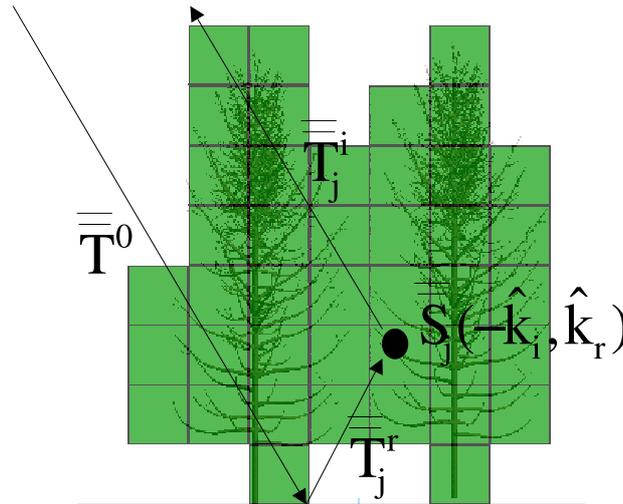


FIG. 2.20 – Principe du calcul du mécanisme de diffusion surface-volume. La méthode de lancer de rayon permet d'évaluer les matrices de transmission.

La comparaison entre ces trois descriptions est abordée à la section 3.3.3.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE

La modélisation des couverts forestiers se fait en deux étapes abordées successivement dans ce chapitre. Dans une première étape, il s'agit de décrire les constituants du milieu et de calculer leur propriété de diffusion. Les modèles d'architecture fournissent la géométrie détaillée des arbres. Le calcul de la matrice de diffusion est dans tous les cas approché et il dépend de la forme et de la constitution des diffuseurs. Les résultats montrent que le cylindre homogène est en général suffisant, sous réserve d'adapter la taille ou l'orientation de ces cylindres par rapport aux éléments réels. La deuxième étape consiste à choisir une théorie électromagnétique et à résoudre le problème de la rétrodiffusion en adaptant la description du milieu. La variété des choix conduits au développement de modèles qui se distinguent par les améliorations de tel ou tel aspect. Les versions tridimensionnelles des modèles RT et BORN prennent en compte l'hétérogénéité du couvert ou structure tridimensionnel du couvert. Les modèles cohérents par rapport aux modèles de transfert radiatif permettent de prendre en compte les effets cohérents et une description plus précise des arbres, en particulier les maquettes d'arbre AMAP. Le modèle DORT par

rapport aux modèles de premier ordre RT et BORN, permet de calculer les diffusions multiples et la diffusion incohérente avec le sol.

Chapitre 3

Rétrodiffusion des forêts. Interprétation des résultats de modélisation

Sommaire

3.1	Les sites d'étude et les jeux de données	88
3.1.1	Site des Landes	88
3.1.2	Site de Lozère	89
3.2	Impact de la structure tridimensionnelle	90
3.2.1	Profils verticaux de rétrodiffusion	90
3.2.2	Interférométrie	98
3.2.3	Coefficient de rétrodiffusion en bande C et L	101
3.3	Impact de la description des arbres	108
3.3.1	Descriptions des troncs	109
3.3.2	Comparaison entre les modèles RT et BORN bidimensionnel	113
3.3.3	Comparaison entre les maquettes	114
3.4	Diffusions multiples	116
3.4.1	Polarisation croisée	116
3.4.2	Copolarisations	123

Dans ce chapitre, les résultats des modèles sont comparés avec les données radar en bande L, C et X. Les objectifs sont d'une part de mettre en évidence l'impact des améliorations présentées dans le chapitre précédent, et d'autre part de déterminer les mécanismes et diffuseurs prépondérants en fonction de la fréquence, de la polarisation et de l'angle d'incidence. Les principaux points abordés sont les suivants :

- *L'influence de la structure tridimensionnelle sur les profils de rétrodiffusion, les estimations par interférométrie de la hauteur du couvert et les coefficients de rétrodiffusion total.*
- *L'apport du modèle BORN par rapport au modèle RT quant à la précision de la description des arbres, ou autrement dit l'influence de la dégradation des maquettes AMAP.*
- *L'apport du modèle DORT par rapport au modèle RT, c'est à dire le rôle des diffusions multiples et des diffusions incohérentes entre le couvert et le sol.*

Les capteurs SAR qu'ils soient aéroportés ou embarqués sur des satellites, fournissent une large variété de mesures. Ces mesures se distinguent principalement par la fréquence de l'onde radar utilisée. Les fréquences actuellement disponibles vont de la bande VHF (20-80MHz) à la bande X (9.5GHz) en passant par la bande P (400MHz), la bande L (1.2GHz) et la bande C (5.3GHz). Le choix de la fréquence en fonction de l'application envisagée est fondamental car la fréquence détermine la taille des diffuseurs qui jouent un rôle prépondérant dans le signal. Les mesures se distinguent aussi par le type d'informations fournies par le radar :

- Les mesures radiométriques caractérisent l'énergie rétrodiffusée par la cible. Elles sont exprimées par le coefficient de rétrodiffusion pour les co-polarisations HH, et VV, et la polarisation croisée HV.
- Les mesures polarimétriques fournissent la phase relative entre les polarisations. Elles permettent d'estimer les mécanismes de rétrodiffusion principaux.
- Les mesures interférométriques sont obtenues à partir de plusieurs images de la même scène, avec une faible variation de la prise de vue (variation spatiale et dans certains cas temporelle). Elles permettent de déterminer la position des diffuseurs principaux. Seuls les modèles cohérents permettent de simuler l'information interférométrique.

D'autres caractéristiques des capteurs ont un impact sur les applications opérationnelles : la répétitivité, la résolution spatiale et le mode d'acquisition (standart, SCANSAR, spotlight).

Parmi cette variété de mesures, seule une gamme restreinte est disponible ou sera disponible dans un proche avenir dans l'espace. Les capteurs actuels opèrent en bande C et ne sont pas

polarimétriques¹. En 2004, avec le lancement de ALOS/PALSAR, un capteur bande L polarimétrique sera dans l'espace. Le projet TerraSAR prévoit à l'horizon 2010, la mise en orbite d'un capteur bande X à haute résolution. L'interférométrie multitemporelle à 1 jour d'intervalle n'est plus disponible depuis l'arrêt de ERS-1. Dans ce contexte, nous nous intéresserons essentiellement aux données radiométriques en bande C et en bande L. Une courte digression sera faite sur la bande X et sur l'interférométrie. La polarimétrie ne sera pas abordée pour deux raisons : premièrement, plusieurs travaux ont montré que la polarimétrie apportait peu d'information sur les milieux forestiers [Melon, 2002]. Deuxièmement, les modèles ne sont pas assez fiables pour fournir l'information de phase relative entre les polarisations².

Le milieu forestier est complexe et ne peut être caractérisé précisément que par un nombre très important de paramètres. Pour les applications, certains paramètres ont de l'intérêt, ce sont les paramètres synthétiques comme la biomasse, le volume par hectare de tronc, l'espèce, l'âge, la hauteur, la densité d'arbres (exprimée en tiges/ha), le volume fractionnel, les paramètres du sol ou la pente locale. Par ailleurs, le coefficient de rétrodiffusion est une mesure intégrante, c'est à dire qu'en première approximation, il ne dépend que des paramètres synthétiques. Mais, même dans ce cadre simplifié, la relation entre le signal radar et les paramètres est complexe car la rétrodiffusion résulte de plusieurs mécanismes de diffusion mettant en jeu plusieurs types de diffuseurs. Chacun de ces mécanismes est lié aux paramètres par une relation, croissante, décroissante ou même complexe avec une sensibilité plus ou moins importante. La modélisation a pour objectif de séparer les contributions des mécanismes et d'explicitier les relations qui les lient aux paramètres. Cependant, la modélisation n'est pas un outil parfait, pour plusieurs raisons :

- Le domaine de validité des modèles est peu étendu. Il faut utiliser plusieurs modèles pour comprendre les mesures, même dans la gamme limitée des mesures radiométriques en bandes L, C et X.
- La validation des modèles et la détermination précise de leur domaine de validité n'est pas possible, en partie à cause du nombre important de paramètres comparé au nombre de mesures disponibles et de sites étudiés.
- Les paramètres d'entrée des modèles sont connus avec une précision plus ou moins grande.

L'analyse des données expérimentales par modélisation est donc un processus circulaire de validation, d'analyse et d'amélioration des modèles. Les résultats présentés dans ce travail sont un instantané de ce processus.

¹ASAR/ENVISAT fournit des données radiométrique dans les quatre polarisations HH, VV, HV et VH – ces deux dernières étant identiques pour les milieux végétaux – mais ne fournit pas la phase relative entre ces polarisations.

²Les phases polarimétriques les polarisations sont fortement lié au mécanismes de second ordre, donc ne sont pas correctement estimées par les modèles de premier ordre comme les modèles RT ou BORN. Une étude peut être envisagée avec un modèle d'ordre supérieur comme le modèle DORT.

L'objectif de ce chapitre est de répondre à la question posée dans l'introduction pour le milieu forestier : par quels mécanismes d'interaction les paramètres du milieu interviennent sur le signal radar ? La réponse est organisée selon trois axes :

- Une étude des mécanismes et diffuseurs prépondérants en analysant l'influence de la structure du couvert. Cette étude montre essentiellement les résultats des modèles RT et RT3D.
- Une étude sur l'impact des descriptions de l'arbre sur le signal modélisé.
- Une étude sur l'effet des améliorations électromagnétiques apportées par le modèle DORT.

Dans une première section, les sites d'étude sont brièvement décrits. Les sections suivantes suivent les trois axes proposés ci-dessus.

3.1 Les sites d'étude et les jeux de données

3.1.1 Site des Landes

La forêt des Landes s'étend sur un million d'hectares dans le sud ouest de la France. Elle est plantée exclusivement de pins maritimes (*pinus pinaster*) et fournit 20% de la production française de bois. La gestion intensive des plantations assure une grande homogénéité des parcelles. Comme de plus, les variations de la topographie sont de faible amplitude, cette forêt constitue un cas simple idéal pour les études de télédétection.

Le site de Nézer au sud du bassin d'Arcachon est composé de vastes parcelles d'environ 25ha, et a une superficie totale de 2700ha. Les parcelles sont constituées d'arbres de même âge, et le volume de tronc atteint 250m³/ha. Le site est intensivement géré pour assurer une productivité maximale : il n'y a pas de régénération naturelle et des coupes d'arbre et nettoyages du sous-bois sont régulièrement effectués. Ce site a été utilisé comme site d'étude pour différentes campagnes aéroportées (Maestro 1989, Mac-Europe en 1991, RAMCAR en 1998) et missions spatiales (ERS 1/2, J-ERS, SIR-C/X-SAR et RADARSAT). Le nombre de données accumulées depuis une dizaine d'années est important.

Comme évoqué dans l'introduction de ce chapitre, le travail présenté dans ce manuscrit s'intéresse plus particulièrement aux configurations radar présentes actuellement, ou dans un proche avenir dans l'espace, c'est à dire aux bandes L, C, voire X, à des incidences variables, et aux polarisations HH, VV, HV. Le jeu de données des campagnes SIR-C de 1994 (SRL-1 en avril et SRL-2 en octobre) couvre une partie de ces configurations (voir le tableau 3.1). Ces données ont été utilisées dans ces travaux. D'autres données sont disponibles, mais n'ont pas été utilisées dans ce travail car elles sont plus ou moins redondantes avec les données SIR-C : des données ERS (bande C, 23°, VV), RADARSAT (bande C 23°, 33°, 47°, HH)[Floury, 1999], et RAMSES (bande L, 55°, polarimétrique). On peut noter aussi les données basses fréquences bande P acquises par

	26° (SRL-1)	54° (SRL-2)
bande L	HH, VV, HV	HH, HV
bande C	HH, VV, HV	HH, HV

TAB. 3.1 – Jeu de données SIR-C disponible sur le site des Landes.

AIRSAR [Beaudoin et al., 1994] et VHF acquises par CARABAS [Melon, 2002].

Le site de Nézer est aussi bien fourni en données de terrain. La carte détaillée de l'occupation du sol, essentiellement l'âge des parcelles, est remise à jour régulièrement par les forestiers. Des mesures de caractérisation ont été réalisées [Le Toan et al., 1992][Beaudoin et al., 1994] et utilisées en modélisation [Hsu et al., 1994][Floury, 1999]. Plus récemment, le modèle d'Architecture des Plantes (AMAP) appliqué au pin maritime a été calé sur cette plantation. Toutefois, certaines mesures sont imprécises :

- La densité d'arbres n'est pas disponible parcelle par parcelle. Elle est évaluée par une régression exponentielle en fonction de l'âge à partir de quelques mesures. L'homogénéité de la plantation justifie cette approche. Mais les coupes successives ne sont pas prises en compte.
- Le sous-bois est important dans les Landes, mais sa caractérisation est très limitée. Dans cette étude, nous avons repris les mesures de Beaudoin et al. [1994].

Une caractéristique importante de ce site est la faible densité des plantations. Elle ne dépasse pas 1500 tiges/ha au moment du semis, et descend à seulement 300 tiges/ha à 40 ans.

3.1.2 Site de Lozère

La forêt de Lozère se situe dans la région des Causses dans le sud du Massif Central et couvre quelques 200000ha. Une grande campagne de déboisement au XVII^e siècle pour le gain de terres agricoles a conduit à une forte érosion du sol. Au XIX^e, dans le cadre du programme de "Restauration des terrains de Montagnes", une phase de reboisement a été entreprise afin de reconstituer les sols. Pour cela, une espèce résistante, le pin noir d'Autriche (*pinus nigra nigricans*), a été majoritairement plantée. La surface forestière a été multipliée par 6 jusqu'à aujourd'hui. Deux sites expérimentaux ont été sélectionnés et étudiés par le Laboratoire Commun de Télédétection (LCT, Montpellier) :

- La forêt domaniale de Mende comprend plus de 500 parcelles sur une superficie de 5400 ha. Ces parcelles dont l'âge peut atteindre 140 ans, sont mono-spécifiques.
- La forêt du Causse Méjean s'étend sur 1200ha. Les parcelles sont âgées de 20 et 50 ans.

Le LCT dispose d'un grand nombre de données sur ces sites issues de collaboration avec l'EN-GREF³, l'IFN⁴ et l'ONF⁵ : inventaire, modèle numérique de terrain, photographies aériennes et mesures dendrométriques. En 1997, le modèle AMAP a été appliqué au pin noir sur le site de Lozère [Castel, 1998] et a été couplé avec un modèle de transfert radiatif [Floury et al., 1997].

Ces sites diffèrent du site des Landes de part la topographie, l'espèce majoritaire, et la densité des plantations. Sur le Causse, les pentes sont faibles et dépassent rarement 10°. Par contre, 3000ha sur les 5400ha de la forêt domaniale de Mende sont situés à flanc de Causse avec des pentes pouvant atteindre 40°. La densité des plantations est élevée et variable d'une parcelle à l'autre. On observe entre 800 tiges/ha et 2000 tiges/ha pour des parcelles de 40 ans. Le volume de tronc peut atteindre 700m³/ha sur les parcelles les plus âgées. Une conséquence de cette densité est l'absence de sous-bois.

Les sites de Lozère ont fait l'objet de plusieurs campagnes d'acquisition radar, en particulier des campagnes SIR-C/X-SAR en 1994, ERS en 1993, HUTSCAT en 1997 et RAMCAR en 1998. Les données ont été fournies par le LCT dans le cadre de collaborations et sont présentées dans le tableau 3.2 (à l'exclusion des données RAMCAR, voir [Martinez, 2000][Melon, 2002]). Les données SIR-C, ERS et HUTSCAT ont été utilisées dans ce travail.

	SIR-C/X-SAR ⁶ 55° (SRL-1 et SRL-2)	ERS ⁶ 23°	HUTSCAT ⁷ verticale et 23°
bande L	HH, HV	-	-
bande C	HH, HV	VV	HH, VV
bande X	HH, VV	-	HH, VV et HV

TAB. 3.2 – Jeu de données disponible sur les sites de Lozère.

3.2 Impact de la structure tridimensionnelle des couverts forestiers

3.2.1 Profils verticaux de rétrodiffusion

Le coefficient de rétrodiffusion est la mesure usuelle fournie par les capteurs SAR. Cette mesure synthétique donne l'énergie rétrodiffusée par l'ensemble d'un volume qui surplombe

³Ecole National du Génie Rural des Eaux et des Forêt.

⁴Inventaire Forestier National.

⁵Office National des Forêts.

⁷Données traitées par Thierry Castel.

⁸Données traitées par Jean Michel Martinez.

une surface. Au contraire, les profils de rétrodiffusion acquis par diffusionomètre fournissent une information détaillée de l'énergie rétrodiffusée tout au long du parcours de l'onde dans le volume.

Du point de vue théorique, l'étude des profils fournit plusieurs informations :

- les profils donnent une estimation indirecte de l'atténuation moyenne dans le couvert. Cette atténuation est le résultat de l'atténuation à l'intérieur de la couronne et de la structure arbre/trouée du couvert,
- les profils permettent de localiser la source principale de rétrodiffusion donc de connaître les diffuseurs dont les caractéristiques déterminent le signal,
- à partir des profils, il est possible de calculer séparément l'énergie rétrodiffusée par la couronne et celle rétrodiffusée par le sol (par les mécanismes de rétrodiffusion directe du sol et d'interaction végétation-sol).

Du point de vue applicatif, les mesures de profils donnent accès à la hauteur des arbres, plus précisément que les mesures interférométriques, et à la structure verticale du couvert, en particulier à la hauteur de la couronne [Martinez et al., 2000].

Les mesures expérimentales de profils de rétrodiffusion sont rares (CETP, HUTSCAT). Dans cette étude, les données acquises par le diffusionomètre HUTSCAT sur le site de Lozère en 1997 ont été utilisées. Le diffusionomètre HUTSCAT développé par l'Université Technologique d'Helsinki (HUT)[Hallikainen et al., 1990] permet acquérir des profils de rétrodiffusion en bande C et X avec un échantillonnage de 0.68m. Ce capteur, embarqué dans un hélicoptère, fournit des profils à différents angles d'incidence le long de transects.

Dans les sections suivantes, la comparaison entre les modèles bi et tridimensionnels sera abordée dans un premier temps, afin de mettre en évidence l'effet de la structure du couvert sur le profil de rétrodiffusion. Puis dans un deuxième temps, nous montrerons comment conduire les simulations pour fournir des profils directement comparables avec les profils expérimentaux du diffusionomètre HUTSCAT.

Comparaison entre les modèles de transfert radiatif 2D et 3D.

La figure 3.1 montre les profils de rétrodiffusion en bande X estimés par les modèles bidimensionnel RT et tridimensionnel RT3D. Le couvert est composé de pins noirs de 40 ans⁹ avec une densité de 800 tiges/ha. Les profils sont obtenus en calculant la rétrodiffusion de chaque couche. La hauteur des couches est fixée à 0.68cm.

Les profils estimés par les deux modèles diffèrent en deux points :

- Le modèle RT prévoit que l'énergie est principalement rétrodiffusée par la partie supérieure de la couronne, alors que le modèle RT3D estime que l'ensemble de la couronne

⁹Tous les arbres de ce couvert sont identiques. On reviendra sur ce point dans la section suivante.

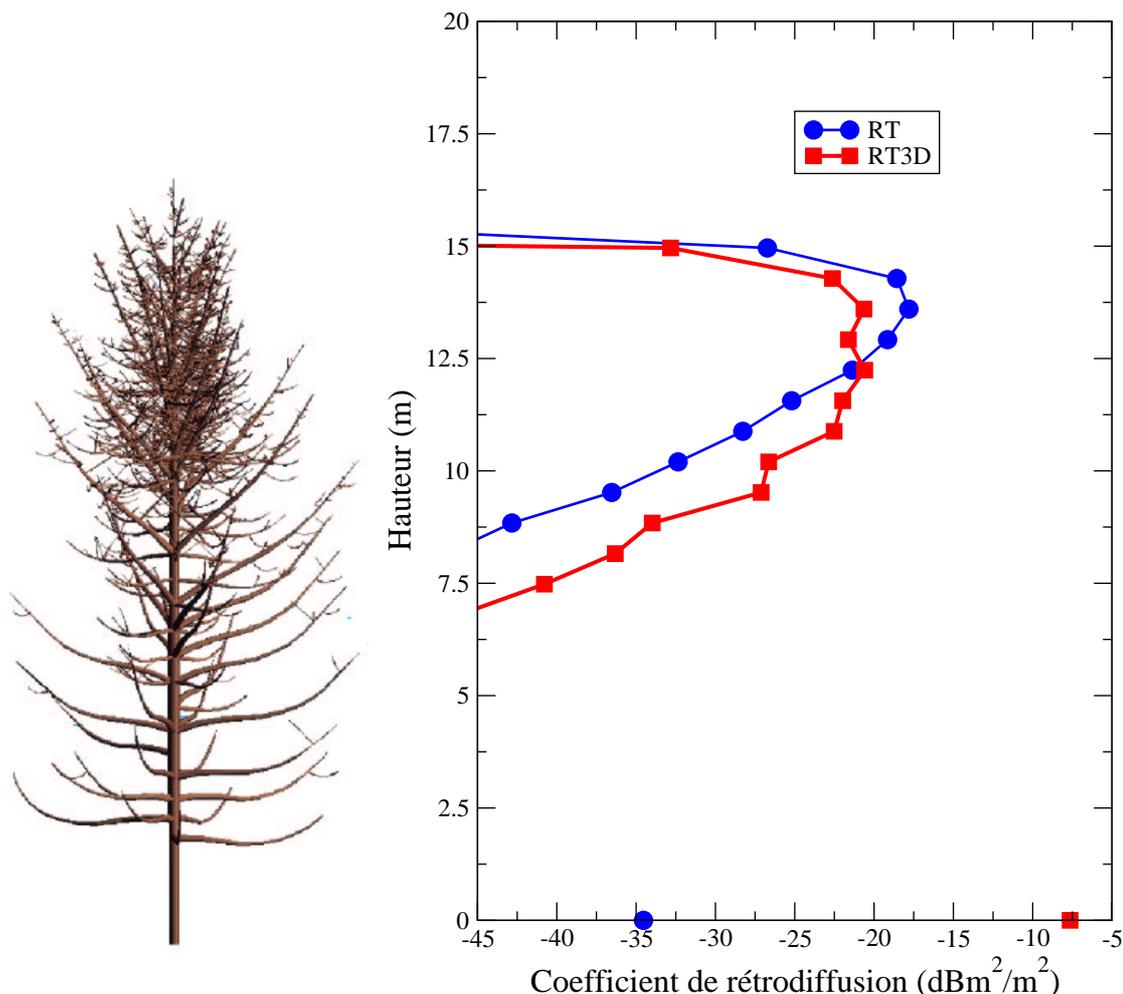


FIG. 3.1 – Comparaison entre les profils estimés par les modèles en polarisation HH à incidence verticale pour un pin noir de 40 ans.

rétrodiffuse. En particulier, on peut noter l'importance de la rétrodiffusion au bas de la couronne. Elle est due aux branches secondaires, tertiaires ou aux aiguilles portées par les grandes branches primaires.

- La rétrodiffusion du sol est estimée négligeable par le modèle bidimensionnel (-35dB pour le sol) et prépondérante par le modèle tridimensionnel (-7dB pour le sol et -13dB pour la couronne).

Cette différence de comportement s'explique essentiellement par la façon dont l'onde se propage dans le milieu. On peut voir cette différence dans un cas simple. On considère un milieu simple vu par le modèle bidimensionnel et vu par le modèle tridimensionnel (figure 3.2)

Le nombre de diffuseurs est identique dans les deux cas, donc la densité de diffuseurs dans le cas tridimensionnel est double. On note β l'extinction moyenne d'un diffuseur, n la densité

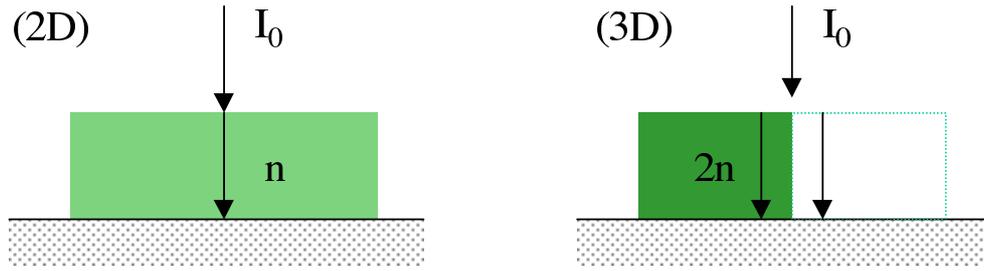


FIG. 3.2 – Milieu simple vu par le modèle bidimensionnel et tridimensionnel.

de diffuseurs dans le cas bidimensionnel, h la hauteur du couvert. L'énergie qui atteint le sol I s'écrit pour une onde incidente verticalement d'intensité I_0 :

$$I_{2D} = I_0 e^{-n\beta h} \quad I_{3D} = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} e^{-2n\beta h} \quad (3.1)$$

L'énergie I_{3D} est toujours supérieure à l'énergie I_{2D} . L'écart est d'autant plus important que la densité de diffuseurs ou l'extinction des diffuseurs est importante. En bande X, les branches secondaires, tertiaires et les aiguilles atténuent fortement l'onde. L'onde pénètre donc peu à l'intérieur de l'arbre. C'est le cas de figure : $n\beta h \rightarrow \infty$. Dans le cas bidimensionnel l'onde n'atteint pas les basses couches de la couronne ou le sol, alors que dans le cas tridimensionnel, l'onde se propage par les trouées et interagit avec le bas de la couronne et même le sol. On peut remarquer par ailleurs, qu'aux basses fréquences (bande L et bande P), l'atténuation est faible, c'est le cas de figure $n\beta h \rightarrow 0$. L'énergie qui atteint le sol est alors identique pour les deux modèles :

$$I_{2D} \approx I_{3D} \approx I_0(1 - n\beta h) \quad (3.2)$$

Le milieu moyen en couches horizontales infinies est alors une description correcte du couvert réel.

L'extinction n'est pas le seul facteur qui explique l'écart entre les modèles RT et RT3D. La proportion de trouées joue aussi un rôle majeur. Or sur le site de Lozère, les plantations sont particulièrement denses : de l'ordre de 800 tiges/ha pour une plantation de 40 ans, alors que des densités de l'ordre de 300 tiges/ha sont plus fréquentes sur les sites tempérés.

La structure tridimensionnelle a une influence sur le coefficient de rétrodiffusion si l'extinction et la densité de trouées sont importantes.

Comparaison entre les profils expérimentaux, et les profils simulés.

La comparaison directe des profils simulés dans la section précédente avec les profils mesurés par HUTSCAT n'est pas possible. Il faut, en effet, tenir compte de la façon dont les mesures sont effectuées par le diffusiomètre. HUTSCAT acquiert un profil tous les mètres environ le long du transect. La mesure dans chaque cellule de résolution temporelle contient, comme la mesure SAR, du speckle. Pour obtenir un profil de coefficient de rétrodiffusion, il est nécessaire de moyenner environ 100 profils (soit un transect de 100m). Pour pouvoir comparer ces mesures avec les simulations, il faut prendre en compte l'hétérogénéité du milieu sur cette distance, en particulier les variations de hauteur des arbres.

De part son principe, le transfert radiatif opère à partir d'une description moyenne du couvert. Par exemple, une forêt constituée d'arbres de 10m et d'autres de 12m, sera modélisée par un couvert de 12m dont la densité de diffuseurs dans les 2 derniers mètres sera deux fois moindre que dans l'arbre de 12m. Cette description moyenne serait adaptée si le processus d'atténuation était un processus linéaire ¹⁰. Pour résoudre cette difficulté, plusieurs descriptions statistiques d'arbres ont été utilisées : à partir d'une maquette AMAP, on calcule une description statistique en moyennant les paramètres des diffuseurs dans chaque couche. Dans le cas bidimensionnel, le profil moyen est calculé en moyennant les profils estimés pour chaque arbre. Dans le cas tridimensionnel, l'ensemble des arbres a été planté dans une scène (voir la section 2.3.1 à propos de la description du milieu). Le profil moyen est alors directement obtenu par la méthode de suivi de rayon. Les variations de hauteur des arbres ont été mesurées sur une parcelle de 40 ans

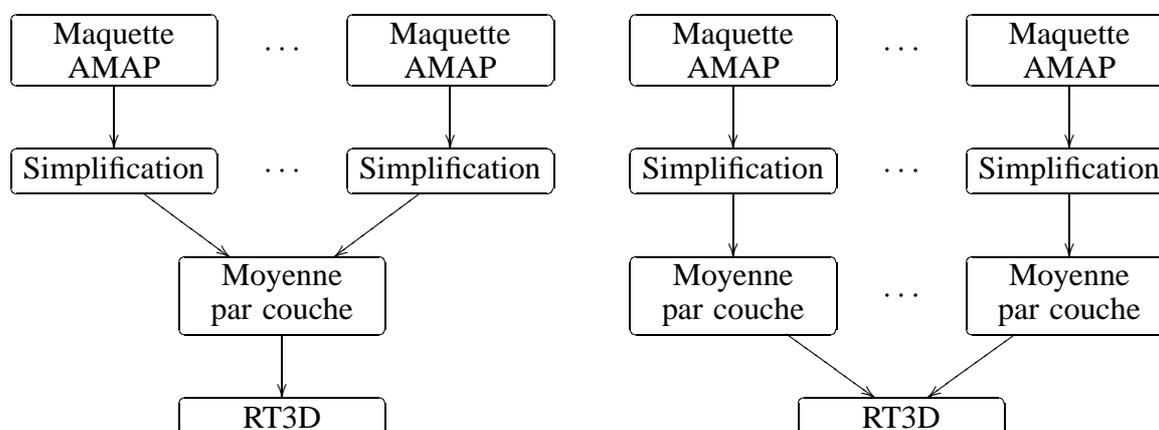


FIG. 3.3 –

survolée par HUTSCAT [Martinez et al., 2000]. La distribution des hauteurs a été reproduite par des maquettes AMAP d'arbres de 39 à 42 ans¹¹

¹⁰La solution au premier ordre n'est pas une fonction linéaire de la densité de diffuseur.

¹¹La variabilité des maquettes de 40 ans générées ne permet pas de modéliser la variabilité observée.

Les résultats de modélisation en polarisation HH et les mesures HUTSCAT sont comparés à la figure 3.4. Les résultats et les mesures en polarisation VV sont identiques car l'angle d'incidence est nul. L'accord entre les mesures et les résultats de modélisation varie en fonction de la hauteur dans le houppier. On peut distinguer trois zones :

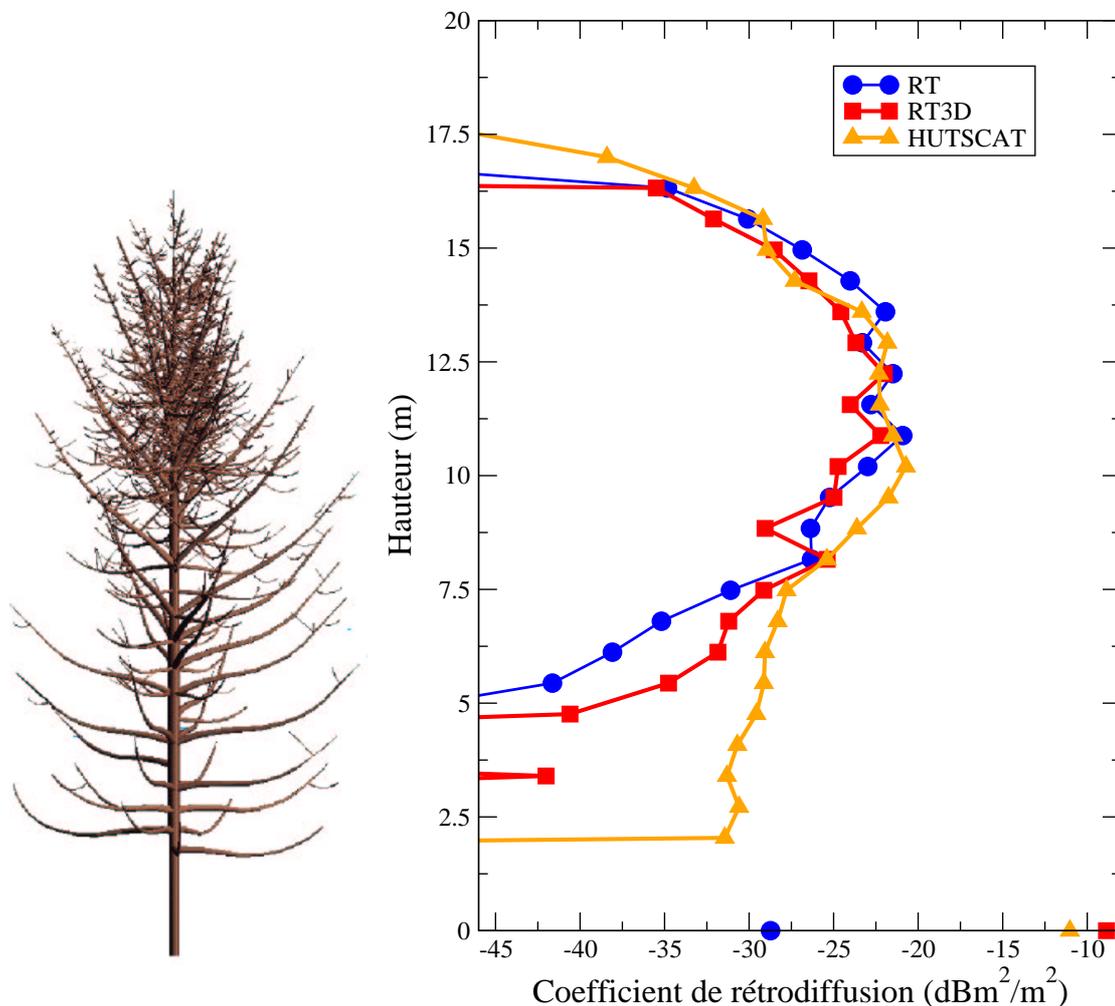


FIG. 3.4 – Comparaison entre le profil HUTSCAT et les profils estimés par les modèles en polarisation HH à incidence verticale.

- Sur le haut de la couronne (de 8m à 17m), les deux modèles sont en bon accord avec le profil mesuré. En particulier, on peut noter que les deux modèles donnent des profils similaires, ce qui n'est pas le cas pour les profils individuels analysés dans la section précédente. En fait, la méthode de calcul du profil moyen avec le modèle bidimensionnel revient à tenir compte grossièrement, mais suffisamment, de la structure en haut de la couronne (ce qui explique que les résultats soient parfaitement identiques en haut de la couronne et di-

vergent un peu en bas de la couronne). Mais la généralisation de ce résultat aux incidences quelconques, ou aux densités de tiges moins importantes n'est pas évidente.

- Dans le bas de la couronne, la rétrodiffusion estimée chute brutalement alors que les mesures stagnent aux alentours de -30dB par couche presque jusqu'au niveau du sol. Ce désaccord peut être dû à une mauvaise description du couvert. En effet, le couvert modélisé ne contient aucun diffuseur dans les couches basses, les modèles prévoient logiquement aucun signal. Ces diffuseurs “manquant” peuvent soit être des branches mortes en bas de la couronne, soit être de petits arbres¹². Les maquettes AMAP ne contiennent pas les branches mortes. En principe, ces branches sont relativement sèches et interagissent peu avec l'onde radar. Mais, il suffit d'une faible couche d'eau en surface pour qu'elles interagissent comme les autres (voir la section 2.2.6 à ce propos). De fortes pluies ont été notées avant la campagne de mesures HUTSCAT. Enfin, ce désaccord peut avoir une toute autre origine. Les diffusions multiples au sein de la couronne suivent des trajets plus longs que les diffusions simples et apparaissent donc plus loin que leur origine réelle. Un signal peut apparaître même là où il n'y a pas de diffuseurs. Il est toutefois difficile de quantifier ce phénomène avec un modèle de transfert radiatif à cause de l'absence d'information de phase.
- Au niveau du sol, la rétrodiffusion estimée par le modèle tridimensionnel est voisine¹³ de la rétrodiffusion mesurée alors que le modèle bidimensionnel prévoit une rétrodiffusion quasiment négligeable. Ce point a été expliqué dans la section précédente.

Ce résultat montre clairement que la structure du couvert joue un rôle fondamental dans la propagation de l'onde dans le milieu, et influence donc directement le niveau de rétrodiffusion du sol. Le modèle tridimensionnel RT3D, basé sur une description plus réaliste du couvert, estime correctement la rétrodiffusion du sol. Par contre, le modèle bidimensionnel utilisé sur un ensemble d'arbre (ce qui ajoute une dose de tridimensionnel) estime correctement la rétrodiffusion de la couronne dans le cas étudié.

Une autre comparaison a été menée sur une plantation de 33 ans. Cette comparaison est plus délicate pour deux raisons : premièrement, la variabilité des hauteurs d'arbre n'est pas disponible¹⁴. Les profils estimés sont donc des profils d'arbre moyen comme dans la section précédente. Deuxièmement, les maquettes AMAP ne correspondent pas à la hauteur moyenne sur la parcelle (hauteur de 10m). Des maquettes d'arbres de 28 ans (hauteur de 9.7m) et d'arbre de 32 ans (hauteur de 11.4m) ont été utilisées. Ces différences de hauteur viennent du fait que les

¹²Les forêts de Lozère sont toutefois très denses, et la présence d'une couche intermédiaire est peu probable.

¹³La comparaison précise entre les coefficients de rétrodiffusion mesuré et estimé nécessiterait la connaissance précise des paramètres du sol, et du tapis d'aiguilles mortes en surface.

¹⁴Toutefois, la variabilité absolue est moindre que pour les parcelles plus âgées.

maquettes ont été calées sur des parcelles dont la densité, les conditions climatiques, ou la fertilité sont différentes. Elles représentent mal les arbres sur la parcelle de 33 ans. Les figures 3.5 (a) et (b) montrent les résultats de simulation le modèle RT3D et le profil moyen mesuré par HUTSCAT.

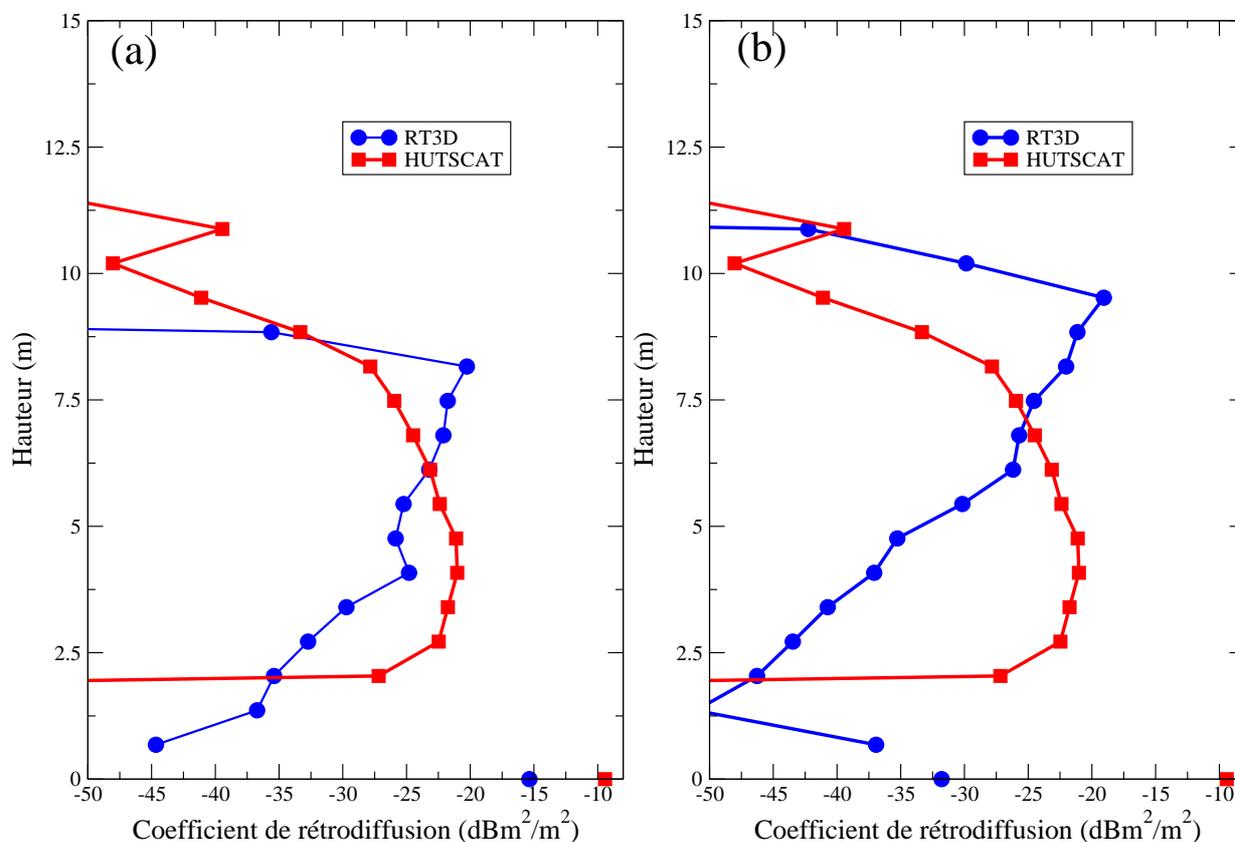


FIG. 3.5 – Comparaison entre le profil HUTSCAT d’une parcelle de 33 ans avec le profil estimé d’un arbre de 28 ans (a) et 32 ans (b) par le modèle RT3D en polarisation HH à incidence verticale.

Les deux modèles prévoient des profils similaires (les profils du modèle RT ne sont pas représentés) car la densité de la plantation est très élevée (1900 tiges/ha), c’est à dire que la description en couche homogène est relativement réaliste. La principale différence se situe au niveau du sol, les deux modèles diffèrent de 5dB pour les maquettes de 28 ans et 20dB pour celles de 32 ans. Dans l’ensemble, le profil mesuré n’est pas correctement reproduit par les modèles. Le problème des hauteurs apparaît clairement sur le profil de 32 ans. Mais le problème majeur est que le signal estimé décroît lorsque l’onde pénètre dans le couvert, alors que le profil mesuré croît. Cette décroissance peut être attribuée à une surestimation de l’atténuation¹⁵, qui

¹⁵La maquette de 28 ans contient des diffuseurs sur tout la longueur, et ces diffuseurs sont plus gros et plus

peut elle-même avoir deux causes : soit le volume ou le nombre des diffuseurs est trop important (la maquette de 28 ans a été calée sur une plantation moins dense, environ 1200 tiges/ha, que celle étudiée), soit le calcul électromagnétique de l'atténuation est insuffisant, en particulier au sein des regroupements (*clusters*) d'aiguilles.

Ces résultats soulignent l'impact de la description du milieu et de la difficulté du travail de validation des modèles.

3.2.2 Interférométrie

Un diffusiomètre comme HUTSCAT serait un bon outil de télédétection s'il pouvait être embarqué sur un satellite. Le sondage vertical des couverts donne accès directement à la hauteur des arbres et donne une bonne indication de la hauteur de la couronne. Mais un tel capteur aurait une résolution spatiale de quelques dizaines kilomètres et une résolution verticale d'au mieux une centaine de mètres. Il serait par conséquent inutile pour le sondage des couverts forestiers. L'interférométrie offre une alternative, moins précise, mais opérationnelle. On peut distinguer plusieurs modes d'acquisition. L'interférométrie tandem¹⁶ a montré avec ERS-1/ERS-2 des limitations importantes sur les couverts forestiers à cause de la décorrélation temporelle. L'extraction de la hauteur du couvert est par conséquent quasiment impossible. L'interférométrie simultanée¹⁷ ne présente pas l'inconvénient du tandem, et permet en principe de dériver la hauteur du couvert. La mission SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission.*) a acquis à l'aide de deux antennes des données interférométriques sur 80% de la Terre en 2001. Ces données seront bientôt disponibles. Enfin, l'interférométrie *multi-baseline*¹⁸ permet un sondage complet du couvert. Cette technique est pour le moment limitée aux capteurs aéroportés.

Dans cette étude, on se limite au cas de l'interférométrie simultanée. L'interférométrie ne mesure pas directement la hauteur réelle du couvert. Elle mesure la hauteur du centre de phase, c'est à dire la hauteur du barycentre des sources de rétrodiffusion.

On considère la configuration d'acquisition schématisée figure 3.6. Les capteurs sont à la même altitude H et séparés d'une distance horizontale B appelée *baseline*. Le capteur (1) émet une onde, et les deux capteurs reçoivent. Pour chaque réalisation du couvert, les champs rétro-diffusés¹⁹ vers chacun des capteurs E_{s1} et E_{s2} sont calculés. La cohérence interférométrique

nombreux quand on s'enfonce dans le couvert. La décroissance n'est donc pas due à une mauvaise estimation de la rétrodiffusion.

¹⁶Acquisitions par deux capteurs identiques séparées par intervalle de temps court.

¹⁷Acquisition de deux images par deux antennes en même temps

¹⁸Acquisition de plusieurs images, en général à de court intervalle de temps.

¹⁹On peut considérer que le capteur (2) est en monostatique car la *baseline* est très petite devant l'altitude H .

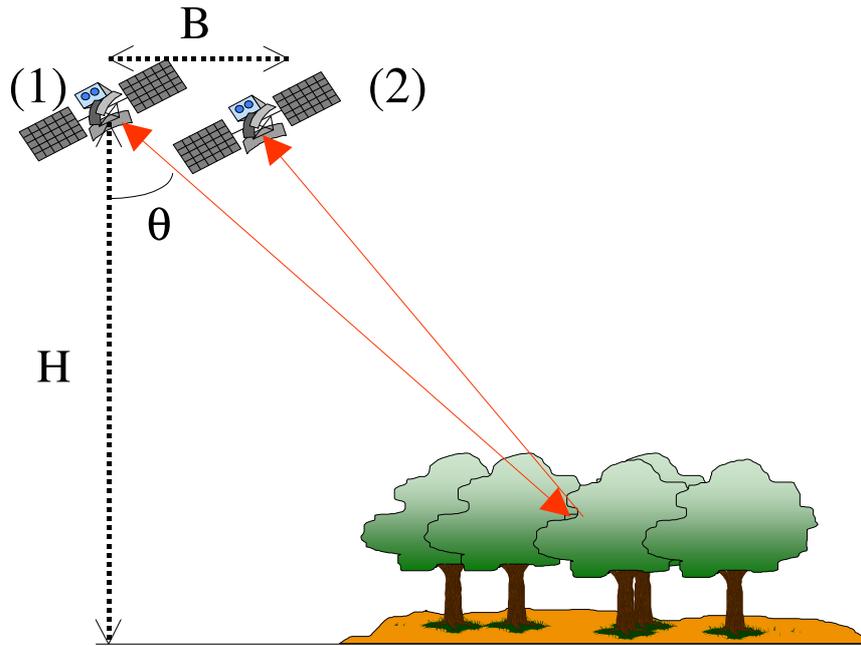


FIG. 3.6 – Configuration interférométrique.

complexe est obtenue en moyennant un centaine de réalisations :

$$\rho = \frac{\langle E_{s1} \cdot E_{s2}^* \rangle}{\sqrt{\langle |E_{s1}|^2 \rangle \langle |E_{s2}|^2 \rangle}} \quad (3.3)$$

La phase de la cohérence est proportionnelle à la hauteur du centre de phase par rapport à un point inconnu. Pour déduire la hauteur du centre de phase par rapport au sol (dite hauteur interférométrique dans la suite), il faut déterminer la hauteur du sol par rapport au point inconnu. Pour cela, il suffit²⁰ de calculer la cohérence sur les champs rétrodiffusés par le sol seul ρ_{sol} . La hauteur interférométrique h est alors donnée par [Rocca et al., 1996] :

$$h = \frac{\arg(\rho) - \arg(\rho_{sol})}{2\pi f} \quad \text{et} \quad f = \frac{k_0 B \sin \theta \cos^2 \theta}{\pi H} \quad (3.4)$$

La figure 3.7 présente la hauteur interférométrique en bande X sur le site des Landes en fonction de la hauteur réelle du couvert. L'altitude du capteur (SRTM) est de 233m et la *baseline* de 60m. L'angle d'incidence est de 23°, et la polarisation est VV. Les simulations ont été réalisées

²⁰Avec les modèles, ce calcul est simple car la rétrodiffusion du sol est séparée de la rétrodiffusion du couvert. Mais avec des images réelles, il faut localiser une zone de sol nu à proximité de la forêts pour déterminer la cohérence interférométrique du sol.

par les modèles BORN et BORN3D. Les deux hauteurs estimées sont beaucoup plus faibles que la hauteur réelle du couvert car la rétrodiffusion vient principalement du sol et de la végétation sous-jacente. Le centre de phase est donc proche du sol. Les deux modèles estiment quasiment la même hauteur pour les jeunes arbres (jusqu'à 20 ans, soit une hauteur de 11m), ce qui signifie que la structure du couvert ne joue pas un rôle important. Par contre, pour les couverts âgés la densité du couvert est faible, et la structure tridimensionnelle devient importante.

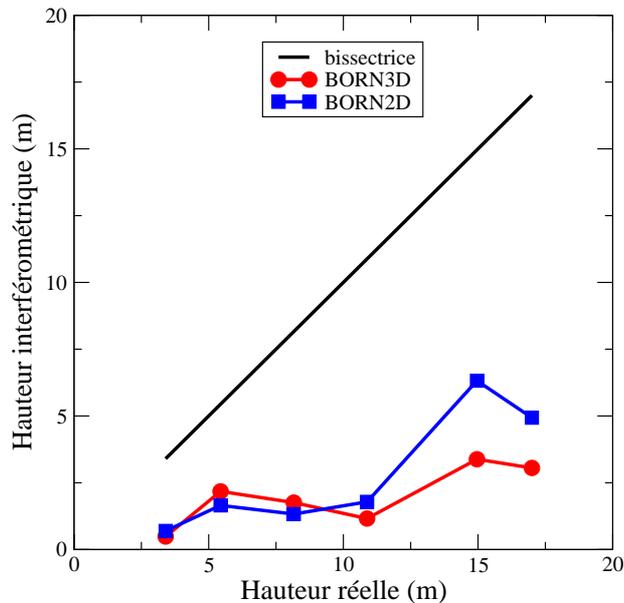


FIG. 3.7 – Hauteur interférométrique en fonction de la hauteur réelle estimée sur le site des Landes par les modèles BORN et BORN3D. Bande X, 23° d'angle d'incidence, polarisation HH.

Pour les forêts plus denses ou à des incidences d'acquisition plus élevées, la rétrodiffusion provient en grande partie de la végétation. La figure 3.8 montre les simulations sur le site de Lozère. On observe que le centre de phase est plus haut que dans le cas des Landes car la densité des plantations est plus élevée. La différence entre les deux modèles indique que la structure du couvert a un impact important sur la hauteur du centre de phase (à l'exception des jeunes plantations). Les différences entre les hauteurs estimées sont de l'ordre de 3m et atteignent même 5m.

Ces deux exemples mettent en évidence les difficultés pour inverser la hauteur interférométrique en hauteur réelle :

- un algorithme d'inversion simple (direct) n'est pas envisageable car la relation entre la hauteur interférométrique et la hauteur réelle dépend des paramètres du milieu tels la densité d'arbres, les paramètres du sol, voire comme le montre l'exemple de la Lozère de la structure (proportion de trouées, forme des arbres). L'apport d'informations exogènes est donc

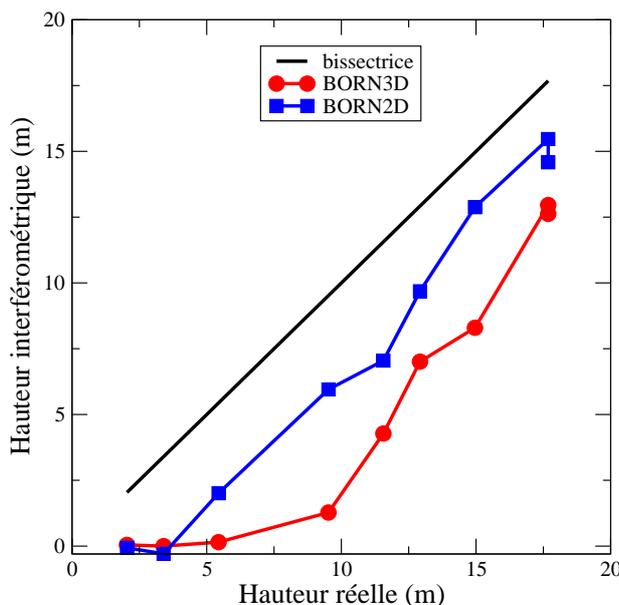


FIG. 3.8 – Hauteur interférométrique en fonction de la hauteur réelle estimée sur le site de Lozère par les modèles BORN et BORN3D. Bande X, 23° d'angle d'incidence, polarisation HH.

- primordial. Les mesures radiométriques peuvent apporter une partie de ces informations.
- l'estimation de la hauteur interférométrique à partir de données a une précision limitée. Cette précision dépend de la *baseline*, du capteur, de la connaissance de l'orbite, etc. Elle est de l'ordre d'un ou deux mètres (voir [Hagberg et al., 1995] dans le cas du tandem ERS). Une telle précision sur la hauteur réelle est tout à fait honorable. Cependant, les variations de hauteur interférométrique sont toujours inférieures aux variations de la hauteur réelle, et la dynamique peut être faible devant la précision. Dans le cas des Landes, la dynamique est de 4 mètres seulement. L'inversion sera donc très imprécise.

3.2.3 Coefficient de rétrodiffusion en bande C et L

Le coefficient de rétrodiffusion est une mesure synthétique, c'est à dire qu'elle intègre la rétrodiffusion de divers mécanismes d'interactions (rétrodiffusion du volume, rétrodiffusion de la surface, double rebond, diffusion multiple, etc) et de divers diffuseurs (branches de divers ordres à différentes hauteurs, tronc, sol, végétation sous-jacente). La recherche d'informations moins synthétiques a conduit au développement de techniques comme la polarimétrie pour déterminer les mécanismes de diffusion, ou l'interférométrie, en particulier l'interférométrie multi-baseline pour extraire la structure verticale du couvert. Mais la plupart des capteurs SAR spatiaux actuels et à venir ne fournissent que de l'information radiométrique, c'est à dire des coefficients de rétro-

diffusion à divers polarisations, et/ou divers angle d'incidence. La modélisation a pour objectif d'aider à la décomposition de ce signal en mécanismes de diffusion et en diffuseurs principaux. Dans cette section nous aborderons la question des mécanismes et diffuseurs prépondérants en utilisant les modèles RT et RT3D. On se limitera aux co-polarisations, la polarisation croisée sera abordée dans la section 3.4.

Les résultats de la partie précédente ont montré que la structure du couvert intervient peu sur la rétrodiffusion du volume, mais qu'elle joue un rôle fondamental sur la propagation dans le couvert, donc sur les mécanismes qui font intervenir le sol. Les résultats des modèles RT et RT3D donnent des estimations similaires quant aux diffuseurs principaux, et diffèrent principalement par la décomposition en mécanismes. Les sections suivantes abordent la comparaison des résultats de modélisation avec des données acquises sur les sites des Landes et de Lozère en bande C et en bande L.

Bande C

En bande C (fréquence de 5.3GHz, longueur d'onde de 5.7cm), les diffuseurs principaux sont en général les branches secondaires (diamètre compris entre 1 et 3cm) et les aiguilles (diamètre de l'ordre de 1mm). Les aiguilles sont beaucoup plus petites que les branches secondaires, mais selon leur nombre, elles peuvent être prépondérantes. Le pin maritime a peu d'aiguilles, environ 14000 pour un arbre de 40 ans, soit un volume d'environ 1.6dm^3 , alors que les quelques 240 branches secondaires ont un volume total de 36dm^3 . Le pin noir a beaucoup plus d'aiguilles, environ 250000 pour un arbre de 40 ans, mais elles sont plus petites. Le volume total d'aiguilles est de 17dm^3 et celui de branches secondaire de 56dm^3 . Dans les deux cas les branches secondaires sont les diffuseurs et atténuateur principaux. Comme l'orientation de ces diffuseurs est relativement aléatoire, les coefficients de rétrodiffusion en polarisation HH et VV sont voisins.

Faibles incidences La figure 3.9 montre le coefficient de rétrodiffusion sur le site des Landes à 26° d'angle d'incidence en polarisation HH estimés par les deux modèles en fonction de la biomasse (exprimée en volume de tronc). Les contributions des différents mécanismes sont ajoutées sur chaque graphes. Les résultats pour la polarisation VV sont similaires. La différence entre les deux modèles est faible, mais le coefficient de rétrodiffusion estimé par le modèle RT3D est plus proche des données.

La rétrodiffusion du sol est le mécanisme prépondérant car à cette incidence le niveau de rétrodiffusion du sol est élevée. La décroissance du signal avec le volume de tronc est gouverné par l'augmentation de l'atténuation et non pas l'augmentation de la rétrodiffusion de la couronne. Les résultats des modèles bi et tridimensionnel diffèrent essentiellement pour les très faibles

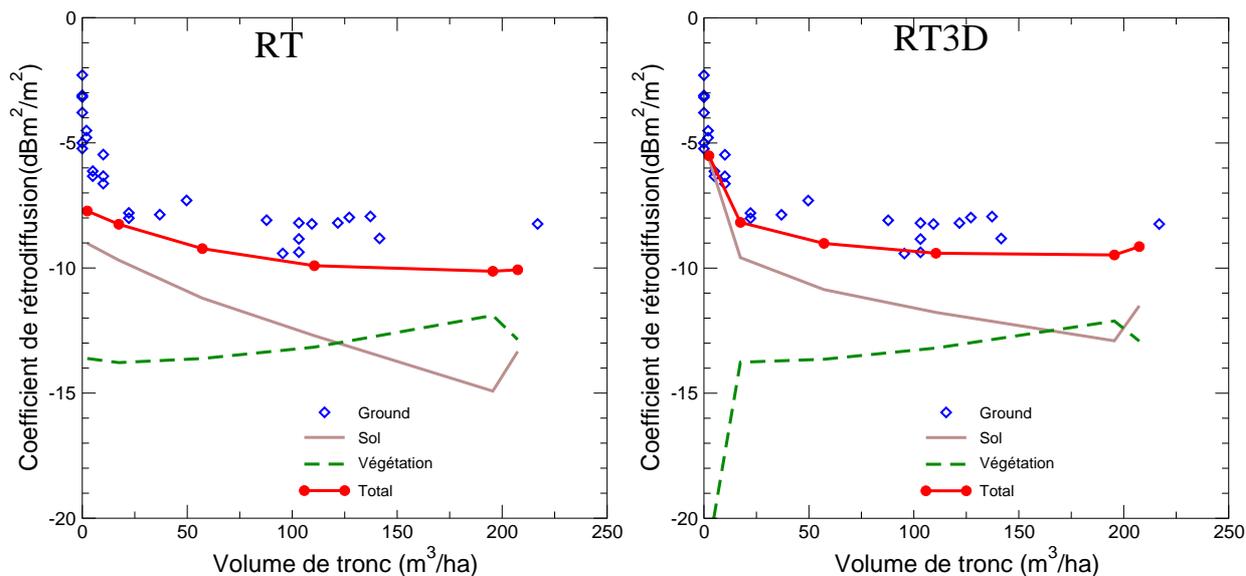


FIG. 3.9 – Coefficient de rétrodiffusion en bande C et polarisation HH, à 26° d'angle d'incidence. Comparaison entre les mesures et les modèles RT et RT3D.

volumes de troncs et pour les forts volumes de troncs :

- Aux faibles volumes, la plantation est relativement dense, de l'ordre de 1000 tiges/ha, mais les arbres s'étendent peu horizontalement (diamètre de la couronne de 30cm). On est donc dans le cas décrit dans la section précédente, où les arbres ne forment pas une couche homogène, et la densité de diffuseurs n est élevée. Les espaces entre les arbres jouent un rôle important sur l'atténuation moyenne. L'atténuation totale estimée par le modèle RT est de 4dB contre seulement 0.5dB pour le modèle tridimensionnel.
- Aux forts volumes, la densité des plantations des Landes est particulièrement basse (environ 300 tiges/ha) à cause des coupes successives réalisées pour favoriser la croissance. Le modèle RT3D prévoit une rétrodiffusion du sol d'environ 2dB plus élevée.

En Lozère, la densité des plantations est beaucoup plus élevée que dans les Landes et on peut donc s'attendre à des résultats différents. Une parcelle de 40 ans contient environ 800 tiges en Lozère et seulement 300 tiges dans les Landes. Les pins noirs de Lozère sont, par contre, plus petits que les pins maritimes des Landes. Le coefficient de rétrodiffusion mesuré par ERS²¹, à 23° d'angle d'incidence en polarisation VV, est comparé aux résultats du modèle RT et RT3D sur la figure 3.10. Le modèle bidimensionnel donne des résultats similaires (toujours inférieurs mais la différence est tout au plus de 1dB) au modèle tridimensionnel car la densité est élevée, les arbres sont proches, et les trouées rares. A partir de $50\text{m}^3/\text{ha}$ le mécanisme prépondérant est la

²¹Ces données ont été fournies par Thierry Castel

rétrodiffusion directe des branches secondaires. Les coefficients de rétrodiffusion estimés par les modèles sont du même ordre de grandeur que les mesures jusqu'à $120\text{m}^3/\text{ha}$, mais il est difficile de voir si la tendance est correcte à cause de la dispersion des mesures. Au delà de $120\text{m}^3/\text{ha}$, la différence entre les modèles et les mesures est significative et atteint 5dB. Ce problème sera abordé avec le modèle DORT à la section 3.4.

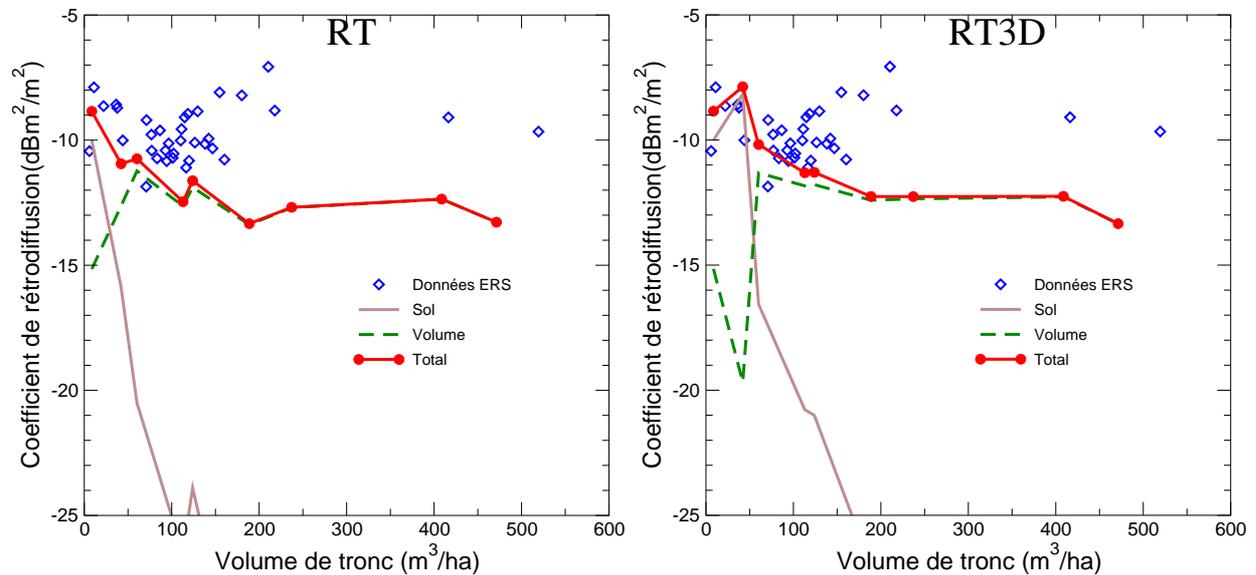


FIG. 3.10 – Coefficient de rétrodiffusion en bande C et polarisation VV, à 23° d'angle d'incidence sur le site de Lozère. Comparaison entre les mesures et les modèles RT et RT3D.

Fortes incidences A plus forte incidence, les mécanismes d'interaction changent radicalement quand la densité des plantations est faible. La figure 3.11 montre le coefficient de rétrodiffusion à 54° d'angle d'incidence sur le site des Landes ainsi que les résultats des modèles. La rétrodiffusion des branches secondaires est le mécanisme prépondérant car la rétrodiffusion du sol est plus faible qu'aux faibles incidences, et l'onde est plus atténuée (son trajet à travers le couvert est plus long). Le niveau du sol est environ 2dB plus élevé en tenant compte de la structure du couvert (avec le modèle RT3D par rapport au modèle RT), mais cette différence n'apparaît sur le coefficient de rétrodiffusion totale.

Bien que le jeu de donnée soit limité, on peut remarquer que les coefficients de rétrodiffusion pour les divers parcelles sur le site des Landes (figure 3.9 et 3.11, autour de $100\text{m}^3/\text{ha}$ par exemple, est moins dispersé à 54° d'angle d'incidence qu'à 26° . Cette remarque est en accord avec les mécanismes prépondérants estimés car la rétrodiffusion du volume est habituellement stable, alors que la rétrodiffusion du sol dépend de l'humidité du sol et de la rugosité, paramètres variables selon les parcelles et au cours du temps.

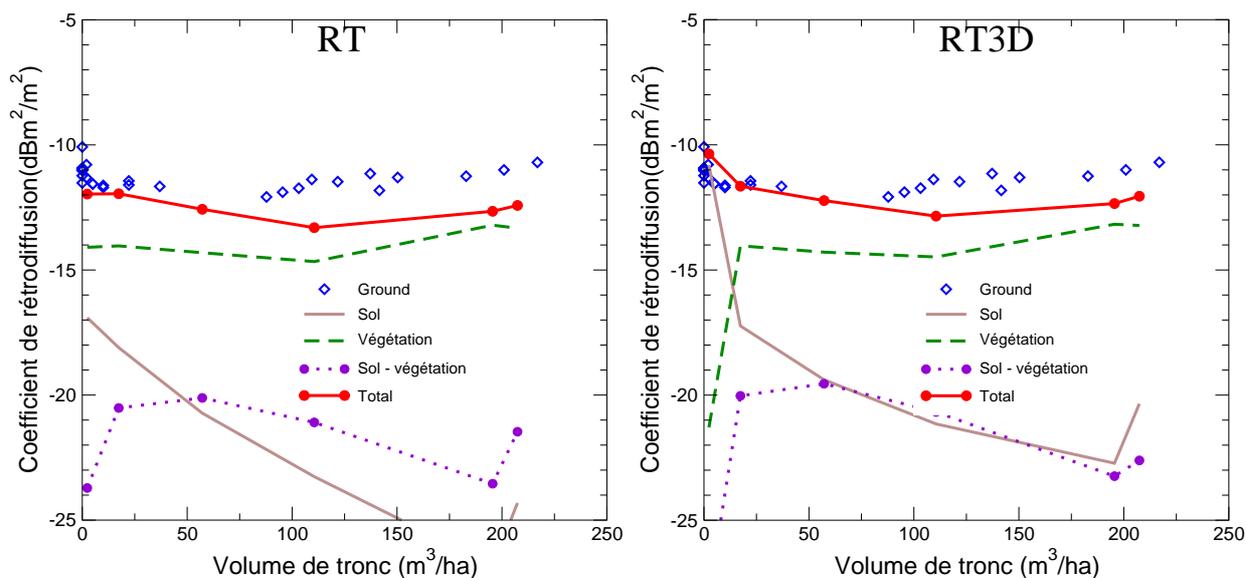


FIG. 3.11 – Coefficient de rétrodiffusion en bande C polarisation HH, 54° d'angle d'incidence. Comparaison entre les mesures et les modèles RT et RT3D.

Les résultats de cette section sont résumés dans le tableau 3.3. Les diffuseurs principaux sont les branches secondaires, et il y a peu de différence entre les polarisations VV et HH.

	$\approx 23^\circ$	$\approx 50^\circ$
Faible densité (300 tiges/ha)	Rétrodiffusion du sol.	Rétrodiffusion de la couronne
Forte densité (800 tiges/ha)	Rétrodiffusion de la couronne	Rétrodiffusion de la couronne

TAB. 3.3 – Mécanismes d'interaction principaux en fonction de l'angle d'incidence et de la densité des forêts. Ces mécanismes sont valables à partir de 50m³/ha. La densité indicative donnée entre parenthèse correspond aux parcelles de 40 ans.

En bande C, l'impact de la structure tridimensionnelle sur le coefficient de rétrodiffusion est faible, inférieur 1dB, sur les deux sites étudiés, à l'exclusion des très faibles volumes.

Bande L

Les phénomènes en bande L (fréquence de 1.3GHz, longueur d'onde de 23cm) sont beaucoup plus complexes qu'aux plus hautes fréquences car les diffuseurs principaux et les mécanismes prépondérants changent en fonction de la configuration radar (angle d'incidence et polarisation)

et des paramètres de la parcelle, tels la densité et le volume. Les diffuseurs principaux peuvent être les troncs, les branches primaires, ou les branches secondaires. L'orientation particulière des troncs et des branches primaires a une influence importante sur les variations du coefficient de rétrodiffusion avec l'angle d'incidence de l'onde, et la différence entre les polarisations VV et HH.

La modélisation des troncs posent des difficultés. Ce point sera abordé en détail à la section 3.3.1. Les troncs semblent jouer un rôle prépondérant aux fortes incidences. C'est pourquoi, dans cette section, on se limitera aux résultats aux faibles incidences.

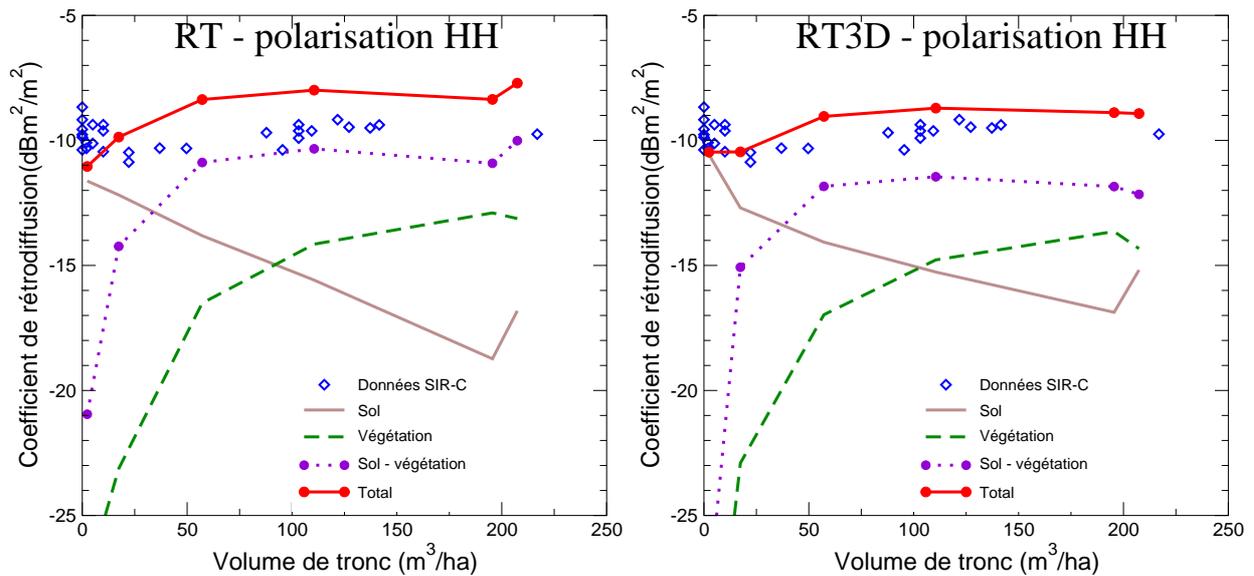


FIG. 3.12 – Coefficient de rétrodiffusion en bande L polarisation HH, 26° d'angle d'incidence. Comparaison entre les mesures et les modèles RT et RT3D.

Les figures 3.12 et 3.13 montrent les résultats de simulation des modèles ainsi que les données acquises à 26° d'angle d'incidence sur le site des Landes respectivement pour les polarisations HH et VV. Les modèles RT et RT3D donnent des résultats proches (l'écart maximal est de 0.8dB). Mais l'analyse des mécanismes de diffusion montre que la similitude des résultats n'est que apparente. En effet, le modèle RT3D estime que les mécanismes liés à la végétation (rétrodiffusion directe de la végétation, et interaction sol/végétation) ont des contributions environ 1dB inférieures aux estimations du modèle bidimensionnel. Au contraire le modèle RT3D estime la rétrodiffusion du sol environ 2dB plus forte que le modèle RT. Les deux effets se compensent et donnent une rétrodiffusion voisine. L'écart maximal entre le modèle tridimensionnel et les données est de l'ordre de 1dB, ce qui en soi est un bon accord au vu des imprécisions de calibration

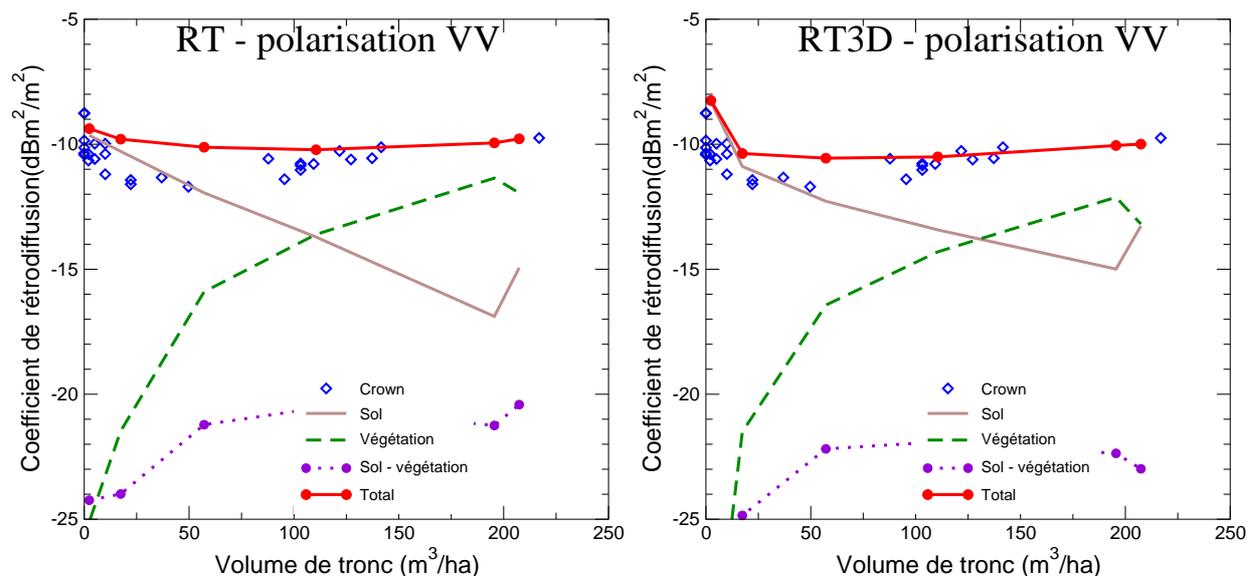


FIG. 3.13 – Coefficient de rétrodiffusion en bande L polarisation VV, 26° d'angle d'incidence. Comparaison entre les mesures et les modèles RT et RT3D.

et d'estimation des coefficients de rétrodiffusion, des imprécisions des maquettes, et des approximations des modèles. Mais la surestimation systématique du modèle est très probablement due à une surestimation l'interaction tronc-sol (cf section 3.3.1).

En polarisation HH, la décomposition en mécanisme (figure 3.12) montre la complexité des phénomènes mis en jeu en bande L par rapport à d'autres fréquences (comme la bande C décrite précédemment). Le coefficient de rétrodiffusion total résulte de trois mécanismes différents qui font intervenir différents diffuseurs :

- La rétrodiffusion directe des branches secondaires. Les branches primaires ne rétrodiffusent pas directement à cause de leur inclinaison²².
- La rétrodiffusion directe du sol, atténuée principalement par les branches primaires et secondaires.
- Le double rebond entre le sol et le couvert. A $200\text{m}^3/\text{ha}$, 28% de l'énergie rétrodiffusée par double rebond sont dûs au tronc, 42% sont dûs aux branches primaires, et 30% sont dûs aux branches secondaires.

En polarisation VV, le mécanisme de double rebond joue un rôle secondaire (figure 3.13). La rétrodiffusion directe est due aux branches secondaires (-12dB à $200\text{m}^3/\text{ha}$), et dans une moindre mesure aux branches primaires (-19dB à $200\text{m}^3/\text{ha}$). L'accord entre les modèles et les données

²²Pour que les branches primaires rétrodiffusent significativement, il faut que certaines branches soient perpendiculaires à l'onde incidente, c'est à dire que l'angle d'incidence soit au moins égale à l'angle complémentaire de l'angle d'inclinaison des branches [Picard, 1997].

est meilleur qu'en polarisation HH.

La complexité des phénomènes en bande L (pour les co-polarisations) explique la diversité des résultats sur les différents sites d'étude. La relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la biomasse (ou le volume de tronc) dépend de l'ensemble des paramètres du couvert et des paramètres de sol. Faire une étude de sensibilité générale sur chacun de ces paramètres n'est pas possible car la variation du signal dans un sens ou dans un autre dépend de l'ensemble des paramètres. Par exemple, une diminution de la densité induit une augmentation de la rétrodiffusion du sol, une diminution de la rétrodiffusion directe et aucune variation du double rebond (selon le modèle tridimensionnel). La variation de la rétrodiffusion totale dépend donc de l'importance relative de ces mécanismes, et par conséquent des paramètres du sol. Dans le cas étudié ici, la diminution du mécanisme de rétrodiffusion est compensé par l'augmentation de la rétrodiffusion du sol pour les polarisations HH et VV. Le coefficient de rétrodiffusion ne varie pas dans les deux cas. Cette complexité est un handicap pour le développement d'algorithme d'inversion.

En bande L comme en bande C, sur les deux sites étudiés, le coefficient de rétrodiffusion est peu sensible à la structure tridimensionnelle. Cependant, les décompositions en mécanismes d'interaction sont différentes selon les modèles bi et tridimensionnels. Ceci signifie que la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et certains paramètres, comme l'humidité du sol par exemple, dépend de la structure du couvert. Il est donc préférable d'utiliser le modèle RT3D car il décrit le milieu de façon plus réaliste et utilise exactement les mêmes paramètres en entrée que le modèle RT, c'est à dire qu'il ne nécessite pas de mesures complémentaires.

Par ailleurs, il est probable que pour les forêts naturelles, la différence entre les deux modèles soit plus importante. En effet, ces forêts sont en général moins denses que les forêts de Lozère, et moins homogènes que la forêt des Landes.

3.3 Impact de la description des arbres

Pour décrire un milieu de façon réaliste, il faut d'une part une description détaillée du milieu et d'autre part un modèle électromagnétique adapté à cette description. Dans notre cas, la description du couvert dépend essentiellement de la description des arbres utilisée : maquette AMAP, maquette AMAP simplifiée, ou description statistique. Quant au modèle, il détermine la géométrie du couvert (bi ou tridimensionnelle) et en fonction de l'approche électromagnétique, radiative ou cohérente, est limité ou non à la description statistique.

L'aspect bi et tridimensionnel du milieu a été étudié dans la partie précédente. L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact sur le coefficient de rétrodiffusion de la description des arbres et de l'approche électromagnétique utilisée. En d'autres termes, il s'agit de déterminer l'apport

d'une modélisation détaillée du milieu (modèle cohérent avec les maquettes AMAP) par rapport à une modélisation plus grossière (modèle RT avec la description statistique).

Pour cela, cette partie est composée de trois sections. Dans la première section, la modélisation du tronc est étudiée. La deuxième section présente une comparaison entre les résultats des modèles radiatifs et cohérents. Enfin, dans la dernière section, l'impact de la simplification des maquettes AMAP est étudié.

Cette étude est basée sur l'analyse des résultats de modélisation dans un nombre de cas limité. Elle est complémentaire avec les sections plus théoriques : à propos des hypothèses du transfert radiatif (section 1.2.3) ; de l'approche cohérente (section 1.2.4) ; de la description des maquettes AMAP et leurs simplifications (section 2.1.2) et de l'étude des diffuseurs du milieu forestier (section 2.2).

3.3.1 Descriptions des troncs

Les troncs ne sont pas des diffuseurs comme les autres de part leur extension, leur faible nombre, et leur orientation particulière. Selon les modèles (transfert radiatif/cohérent ou 2D/3D), ces caractéristiques sont plus ou moins correctement modélisées.

Extension Dans les modèles de transfert radiatif multicouches, les troncs ne peuvent pas être correctement modélisés à cause de leur extension. Quand un diffuseur s'étend sur plusieurs couches, il est nécessaire de le découper. Or, le transfert radiatif ne prend pas en compte les phénomènes cohérents entre les couches. Les différents morceaux contribuent alors de façon incohérente, c'est à dire que le diagramme de diffusion du diffuseur entier est modifié. Dans l'ensemble, cela revient à surestimer la rétrodiffusion, et à sous-estimer la diffusion spéculaire qui intervient dans le mécanisme tronc sol. Dans le cas des modèles monocouche, le tronc n'est pas découpé, mais un autre problème apparaît : l'onde qui éclaire le tronc est une onde plane uniforme. Or en réalité l'onde est atténuée et n'éclaire donc pas le tronc uniformément. Les modèles cohérents ne présentent pas ce défaut.

La figure 3.14 compare les résultats de modélisation par le modèle RT et BORN dans le cas d'un couvert bidimensionnel. En polarisation VV, le tronc joue un rôle secondaire, et l'écart entre les deux modèles est faible, de l'ordre de 1dB. Par contre, en polarisation HH, l'écart est très important et atteint 4dB. La différence s'explique par la sous-estimation de l'interaction tronc-sol dans le modèle RT à cause du découpage du tronc. Pourtant, le modèle de transfert radiatif semble être en meilleur accord avec les mesures expérimentales. Il ne serait pas prudent,

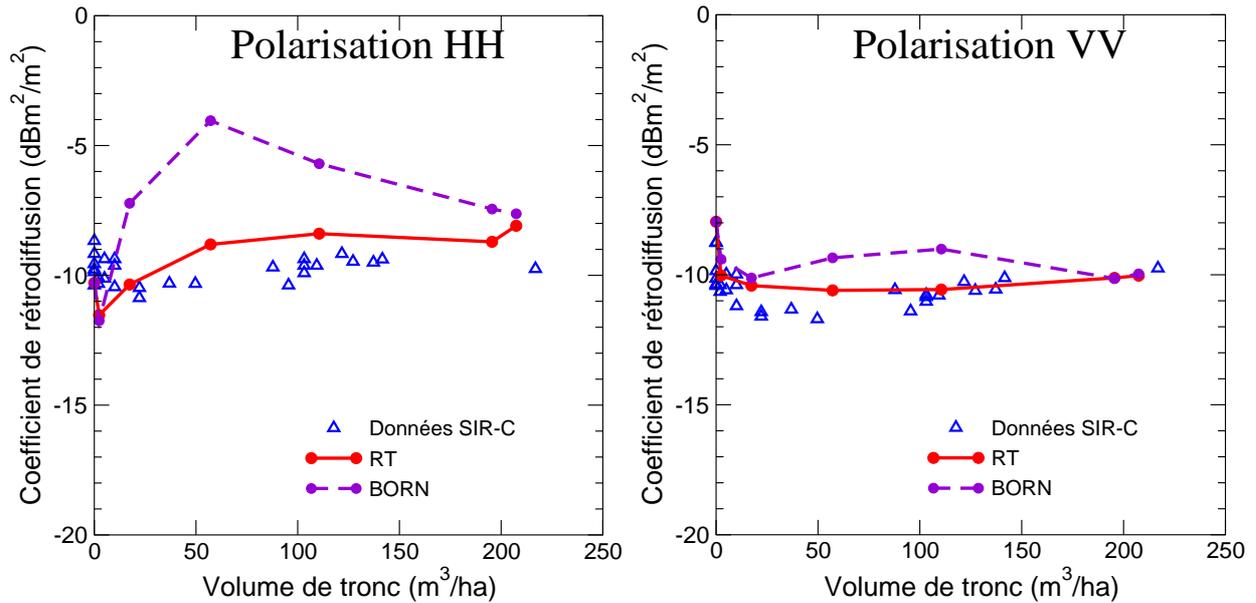


FIG. 3.14 – Coefficient de rétrodiffusion en bande L, 26° d'angle d'incidence. Comparaison entre le modèle RT et BORN.

d'en déduire que le modèle RT est meilleur. Il faut plutôt s'attacher à une meilleure modélisation de l'interaction tronc-sol dans le modèle cohérent.

Faible nombre Le faible nombre de troncs pose des problèmes statistiques pour la modélisation de l'extinction. En effet, en bande X, C, voire L, le tronc est un diffuseur optique ($k_p a \gg 1$), c'est à dire qu'il projette une ombre localisée dans la direction de propagation. Par exemple, les branches primaires qui sont derrière le tronc (par rapport à l'onde incidente) ne sont pas visibles²³. Ce phénomène n'est pas modélisé avec l'approche de Foldy-Lax, car le milieu est homogénéisé, c'est à dire que l'extinction due au tronc, intervient sur l'ensemble de la couche. La modélisation tridimensionnelle permet, en partie, de tenir compte ce phénomène.

Orientation L'orientation proche de la verticale des troncs, leur confère un comportement singulier en terme de mécanismes.

L'énergie rétrodiffusée par les troncs est négligeable pour les incidences usuelles des SARs (moins de 60° d'angle d'incidence). Par contre, se pose la question du rôle de la contribution du mécanisme de double rebond à la rétrodiffusion totale : est-elle négligeable, faible, ou prépondé-

²³Ces branches sont peu nombreuses, mais elles peuvent être perpendiculaires à l'onde incidente (si leur angle d'inclinaison et l'angle d'incidence du radar sont complémentaires), et contribuer significativement à la rétrodiffusion et cd différemment selon la polarisation.

rante ? L'enjeu est important car si ce mécanisme est prépondérant, le coefficient de rétrodiffusion est sensible au volume de troncs sans limite de biomasse.

En bande C et au delà, ce mécanisme est négligeable à cause de l'atténuation de la couronne, et de la faible réflexion du sol (à l'exception des zones inondées).

En bande L et en polarisation VV, ce mécanisme est faible car la réflexion sur le sol et sur le tronc sont faibles, ceci d'autant plus que l'angle d'incidence est proche de l'angle de Brewster sur le sol (environ 72°) ou proche du complémentaire de l'angle de Brewster sur le tronc (soit environ $90^\circ - 78^\circ = 12^\circ$).

En polarisation HV, ce mécanisme est négligeable car l'orientation verticale n'induit pas de dépolarisation.

Par contre, en polarisation HH, le mécanisme de double rebond peut être prépondérant. Pour répondre à la question posée ci-dessus, il convient de s'intéresser précisément à la modélisation de la forme et de l'orientation des troncs.

Le tronc est un diffuseur très long par rapport à la longueur. Il diffuse principalement autour de la direction spéculaire. Par exemple, pour un tronc de 20m, une onde incidente à 45° est essentiellement diffusée dans un angle de $\pm 0.25^\circ$ autour de la direction spéculaire. Pour le sol, la réflexion cohérente est rigoureusement dans la direction spéculaire, car la surface est supposée infinie. En théorie, pour que le mécanisme de double rebond contribue significativement à la rétrodiffusion, il faut que la surface des troncs soient, à moins de $\pm 0.5^\circ$ près, perpendiculaire au sol. Pour étudier ceci quantitativement, on fait varier la forme et l'orientation des troncs :

- cylindre parfait de même volume et hauteur que le tronc ou forme conique donnée par les maquettes AMAP (la surface d'un cône n'est pas parallèle à son axe, l'écart angulaire est de l'ordre de 0.5°).
- orientation parfaitement verticale ou inclinaison aléatoire entre 0 et 5° et azimut aléatoire.

La figure 3.15 montre les variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction du volume de tronc dans ces quatre cas. Dans tous les cas, le mécanisme prépondérant estimé est le double rebond. On retrouve la conclusion qualitative précédente : le mécanisme de double rebond est très sensible à l'orientation de la surface du tronc par rapport au sol. Mais cette sensibilité n'est pas réaliste car elle conduit à des coefficients de rétrodiffusion largement hors de la gamme habituellement mesurée en bande L et polarisation HH (il faut aussi ajouter l'influence des variations des paramètres du sol). De plus la variation du signal avec le volume n'est reproduite par aucune description, ce qui tend à conclure à une mauvaise estimation du mécanisme prépondérant. On peut toutefois remarquer que la description la plus réaliste (troncs coniques et inclinés) conduit au meilleur accord entre les résultats de modélisation et les données. La description la plus artificielle (troncs cylindriques et verticaux) conduit au plus large désaccord. Cependant, cette tendance n'est pas confirmée à 26° d'angle d'incidence (figure 3.14 ci-dessus). L'écart entre les

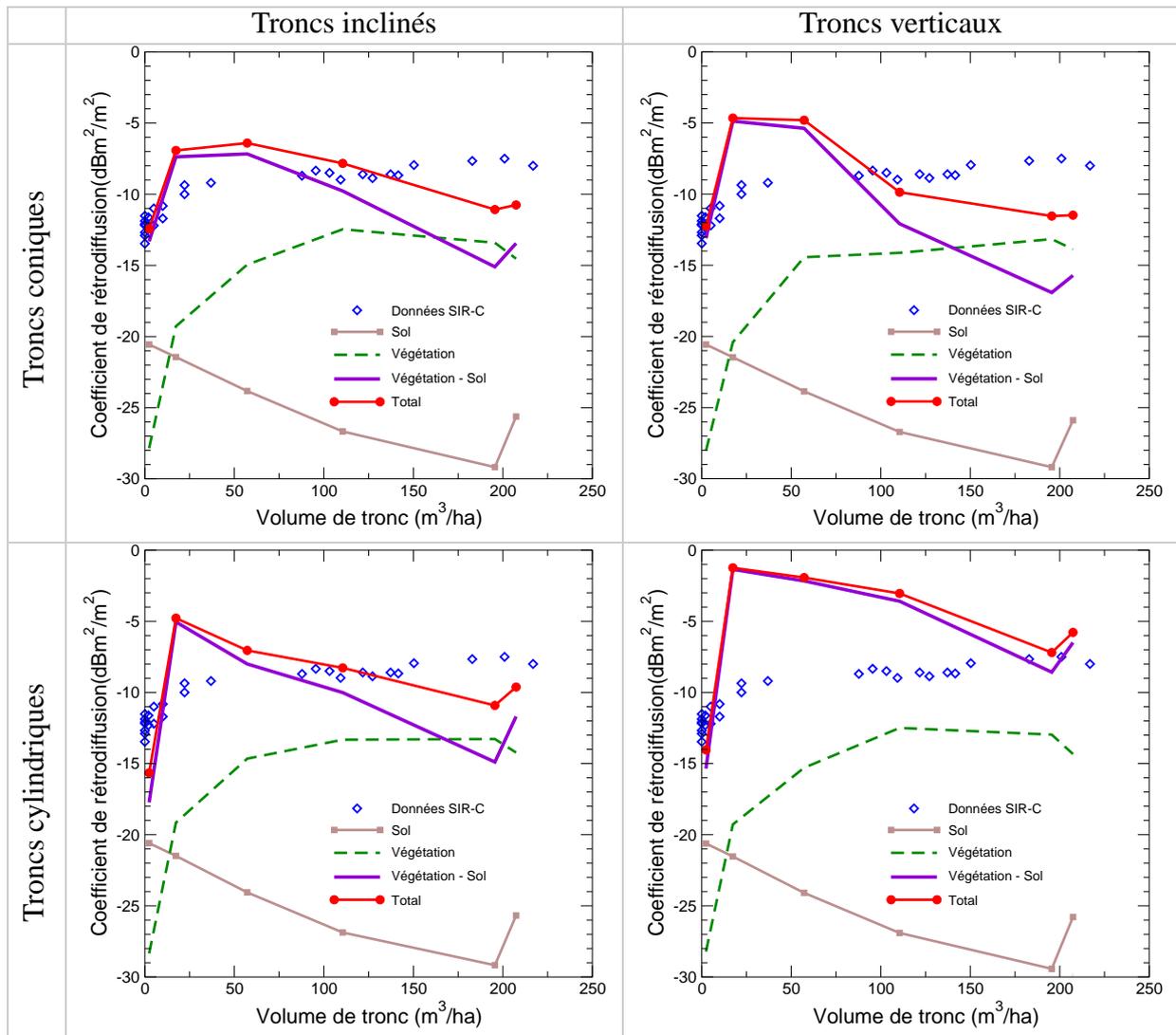


FIG. 3.15 – Coefficient de rétrodiffusion en bande L à 54° d'angle d'incidence selon la forme et l'inclinaison des troncs.

mesures et les résultats du modèle cohérent est très important.

Il est probable que le défaut du modèle soit de considérer que la réflexion cohérente est rigoureusement dirigée dans la direction spéculaire²⁴. Il faudrait peut être affiner la modélisation pour tenir de la proximité du tronc et du sol, c'est à dire du phénomène de champ proche²⁵.

Ce résultat montre qu'il n'est pas possible, en l'état actuel, de répondre par la modélisation

²⁴Il ne s'agit pas de considérer la diffusion incohérente du sol car le sol est lisse par rapport à la longueur d'onde.

²⁵L'onde diffusée par le sol résulte de l'interférence de toutes les ondes sphériques diffusées en chaque point du sol. Au loin, les interférences sont constructives uniquement dans la direction spéculaire. Prêt du sol, la structure de l'onde est bien plus complexe.

à la question posée. Il est communément admis que le double rebond est le mécanisme prépondérant en bande L et polarisation HH. Pourtant une étude expérimentale [Champion, 1998] sur les variations du signal lors des éclaircissements des parcelles (sur le site de Nezer des Landes) montre une chute du signal. En général, une diminution de la densité des arbres produit une augmentation des mécanismes d'interaction avec le sol (rétrodiffusion directe et double rebond), et une diminution de la diffusion de volume. Cette chute semble donc indiquer que le mécanisme de rétrodiffusion de volume est prépondérant.

L'ensemble de ces résultats montre que l'interaction sol-tronc n'est pas correctement modélisée et qu'elle n'est probablement pas un mécanisme prépondérant. D'un point de vue pragmatique, il est plus prudent de faire confiance aux modèles qui estiment ce mécanisme négligeable ou secondaire. C'est pourquoi dans la section 3.2.3 le modèle RT de transfert radiatif a été utilisé.

3.3.2 Comparaison entre les modèles RT et BORN bidimensionnel

Pour comparer les modèles de transfert radiatif et cohérent, il faut utiliser la seule description compatible avec les deux modèles : la description statistique. On se limite ici au cas bidimensionnel pour deux raisons : premièrement, les résultats de la section 3.2.3 ont montré que dans les Landes et en Lozère les effets de structure étaient peu importants sur l'estimation du coefficient de rétrodiffusion. Deuxièmement la prise en compte de l'aspect tridimensionnel est différente entre les modèles RT3D et BORN3D.

Dans le cas bidimensionnel, les deux approches sont, en principe, équivalentes aux effets cohérents prêts. Les résultats des deux modèles sont tracés à la figure 3.16 en bande L à 26° et en bande C à 54°. En bande L, les troncs ont été supprimés pour éviter les écarts observés figure 3.14. On remarque d'ailleurs que les résultats sont en meilleur accord avec les données.

En bande L, le faible écart entre les deux modèles est dû aux différences d'implémentation (le calcul numérique n'est pas rigoureusement identique) et non aux effets cohérents²⁶. En bande C, les deux modèles présentent le même écart qu'en bande L. Cet écart peut être attribué aux différences d'implémentation ou aux effets cohérents. Mais, dans tous les cas, les effets cohérents ont un rôle négligeable. Ceci s'explique par le fait que la distance moyenne entre les diffuseurs principaux – les branches secondaires – est supérieure à la longueur d'onde, il ne peut donc pas y avoir d'interférences constructives.

²⁶L'écart vient des estimations du mécanisme sol-végétation qui n'est pas sujet aux effets cohérents (à l'exclusion du *backscattering enhancement* inclut dans les deux modèles).

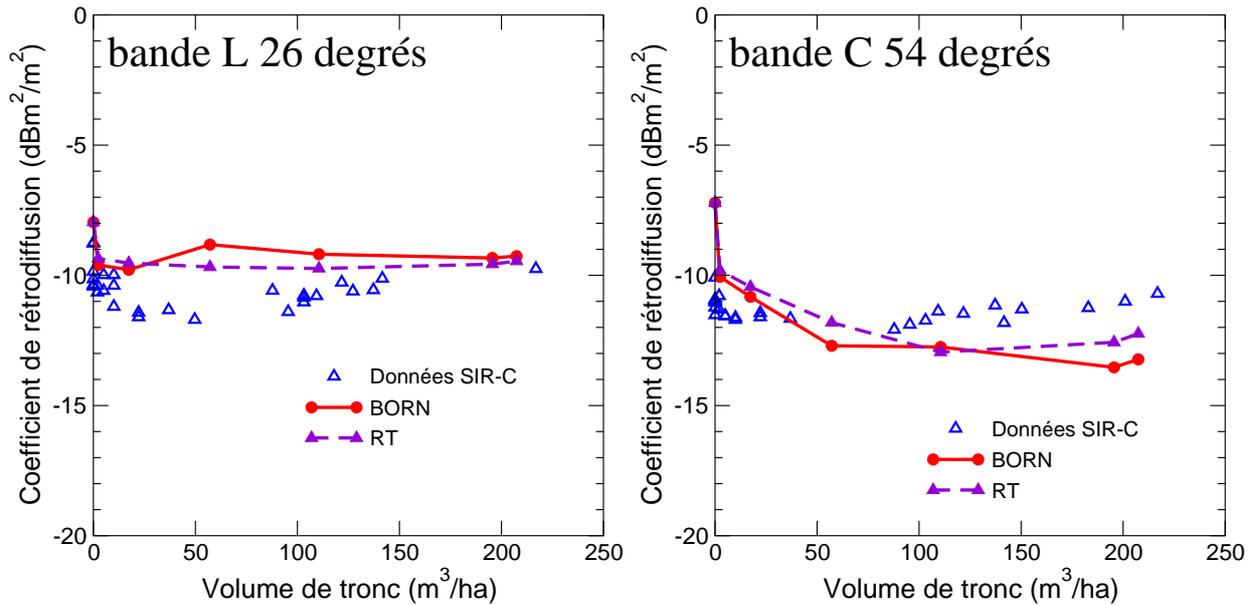


FIG. 3.16 – Comparaison des coefficient de rétrodiffusion estimés par le modèle RT et par le modèle BORN, en bande L à 26° d’angle d’incidence et en bande C à 54°.

3.3.3 Comparaison entre les maquettes

La section sur l’adaptation des maquettes AMAP a montré que les maquettes reconstituées à partir de la description statistique étaient, visuellement, dégradées par rapport aux maquettes originales. Pourtant, cette adaptation est requise pour la modélisation par le transfert radiatif. Se pose donc la question de l’impact de la dégradation sur le signal radar. Les modèles cohérents au contraire supportent n’importe quelle description. Il est donc possible d’estimer le coefficient de rétrodiffusion pour les maquettes originales, les maquettes simplifiées et les maquettes reconstituées.

Bande C La figure 3.17 montre le coefficient de rétrodiffusion en bande C à 26° d’angle d’incidence pour les trois types de maquette.

Dans l’ensemble, les trois descriptions donnent des coefficients de rétrodiffusion proches relativement à la dispersion des données. L’écart maximal est plus important en polarisation VV (environ 2dB) qu’en polarisation HH (environ 1dB). Les différences s’expliquent en grande partie par des estimations différentes de l’atténuation et donc de la rétrodiffusion directe du sol qui est le mécanisme prépondérant. En polarisation VV, la maquette reconstituée semble conduire à de moins bons résultats que les deux autres maquettes. Il est difficile de conclure précisément sur ce point. A 54° d’angle d’incidence, les écarts entre les maquettes sont plus faibles, moins

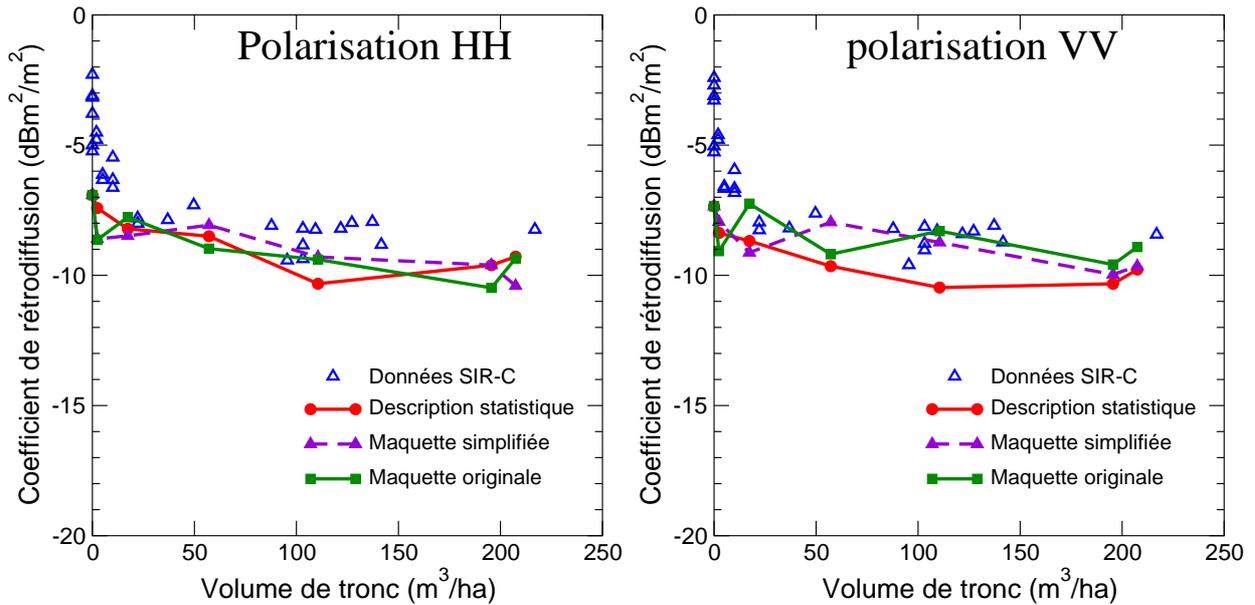


FIG. 3.17 – Coefficient de rétrodiffusion en bande C, 26° d'angle d'incidence. Comparaison entre les mesures et 3 descriptions d'arbre.

de 1dB (la courbe n'est pas présentée). Aucune différence entre la maquette reconstituée et les autres n'est visible.

En bande L, les résultats sont similaires. L'écart est de l'ordre de 2dB, en partie due au rôle estimé prépondérant des troncs.

En résumé, l'impression visuelle de dégradation des maquettes ne se retrouve pas dans les estimations de coefficient de rétrodiffusion. Ces résultats sont importants à plusieurs niveaux :

- D'un point de vue technique, les simulations avec les maquettes simplifiées ou reconstituées sont plus rapides car les maquettes complètes contiennent beaucoup plus de cylindres.
- D'un point de vue de la modélisation, la description statistique utilisée par le transfert radiatif ne conduit pas à des erreurs importantes.
- Enfin, du point de vue des mesures, le degré de précisions des maquettes AMAP est suffisante pour la modélisation du signal radiométrique. Une étude similaire devrait être conduite pour généraliser ce résultat aux mesures interférométriques.

3.4 Diffusions multiples et interactions incohérentes sol-végétation

Le modèle DORT permet de calculer des interactions qui ne sont pas prises en compte par les modèles de premier ordre RT et RT3D ou par les modèles cohérents qui sont nécessairement des modèles de premier ordre.

Inversement le modèle DORT ne prend pas en compte les effets cohérents et est par construction un modèle bidimensionnel. Le modèle DORT offre deux améliorations du point de vue électromagnétique :

- Il calcule les effets de diffusions multiples sans se baser sur la méthode itérative, c'est à dire sans hypothèse restrictives sur l'albédo des diffuseurs. Les diffusions multiples contribuent significativement à la rétrodiffusion lorsque la densité de la plantation est élevée ou lorsque l'albédo des diffuseurs est proche de 1.
- Il calcule les interactions incohérentes avec le sol, c'est à dire les diffusions entre le couvert et le sol dans toutes les directions. Une partie des mécanismes d'interaction incohérente avec le sol sont des mécanismes de premier ordre (lorsqu'une seule diffusion de volume est mise en jeu). En principe, ces mécanismes peuvent donc être pris en compte avec les modèles de premier ordre, mais n'ont pas été implémentés dans les modèles RT et RT3D²⁷.

Cependant l'utilisation du modèle DORT est limitée pratiquement par son besoin en ressource (temps de calcul et mémoire) et par les informations réduites qu'il fournit en sortie. La décomposition en mécanismes n'est pas disponible. L'analyse des résultats est donc plus difficile qu'avec les autres modèles.

Les modèles de premier ordre sont en général mal adaptés au calcul de la rétrodiffusion en polarisation croisée car les diffusions multiples jouent un rôle majeur dans le phénomène de dépolarisation. Ce point sera abordé dans un premier temps en comparant les résultats des modèles DORT et RT. Dans un deuxième temps, le modèle DORT sera utilisé pour déterminer le rôle des diffusions multiples par rapport aux diffusions simples sur la rétrodiffusion en copolarisations.

3.4.1 Polarisation croisée

La rétrodiffusion en polarisation croisée résulte de mécanismes d'interaction qui ne sont pas les mêmes qu'en copolarisations (HH et VV). En effet, pour qu'un signal soit mesuré en

²⁷Ce choix est motivé par le besoin d'avoir un modèle simple (implémentation claire et efficace) de transfert radiatif, le modèle RT. Pour la version tridimensionnel, se pose, en plus, un problème de temps de calcul : le suivi de rayon nécessiterait de suivre les rayons sur environ 100 fois plus de chemins.

polarisation croisée, il est nécessaire qu'un phénomène fasse tourner la polarisation de l'onde²⁸
Trois phénomènes peuvent provoquer une dépolarisation :

- *les diffusions multiples*. La dépolarisation est produite par les diffusions dans un plan non canonique de l'onde incidente (ni le plan horizontal, ni le plan vertical). Il faut au minimum deux diffusions pour que l'onde revienne vers le capteur. Voir le mécanisme (a) de la figure 3.18.
- *la diffusion par des diffuseurs non sphériques, comme les cylindres par exemple*. L'onde diffusée peut être dépolarisée si le diffuseur n'est pas orientés dans un plan canonique de l'onde incidente. Par exemple, un cylindre de faible rayon rétrodiffuse plus une onde polarisée dans son axe qu'une onde polarisée perpendiculairement à son axe. La polarisation d'une onde incidente aura tendance à tourner vers l'axe du cylindre. Ce phénomène peut apparaître dans les mécanismes de premier ordre (une seule diffusion de volume). On peut noter deux cas importants : la rétrodiffusion directe (mécanisme (b), figure 3.18), ou par diffusion dans la direction de l'onde incidente (*forward*), et rétrodiffusion sur le sol (mécanisme (c)). La dépolarisation estimée par les modèles de premier ordre provient uniquement de ce phénomène. Toutefois, l'implémentation du modèle RT n'inclue pas le mécanisme (c) car les interactions incohérentes avec le sol ne sont pas prises en compte.
- *la propagation dans un milieu anisotrope*. Ce dernier phénomène est négligeable dans les milieux forestiers²⁹.

De part son principe, la méthode *Discret ordinate and eigenvalue method* ne permet pas de décomposer en mécanismes les résultats. Toutefois, les résultats avec et sans sol peuvent être calculés avec un coût de temps de calcul supplémentaire faible. Le modèle RT donne alors la dépolarisation par rétrodiffusion directe (mécanisme (b)) et par le mécanisme de double rebond avec réflexion cohérente au niveau du sol. Le modèle DORT sans le sol donne la dépolarisation par diffusion multiple dans le volume (mécanisme (a)), et le modèle DORT avec le sol donne la dépolarisation totale. Comme les résultats de premier ordre indiquent que les aiguilles jouent un rôle secondaire, elles ne sont pas prises en compte dans le calcul afin de réduire le temps des simulations.

Dans la suite, on aborde les résultats de modélisation en bande C, puis en bande L.

²⁸Dans ce manuscrit, on utilisera le terme dépolarisation pour signifier un changement de polarisation et non une perte de polarisation.

²⁹Le milieu peut être anisotrope mais les axes rapides et lents correspondent, en général, aux polarisations horizontale et verticale. Le milieu n'induit donc pas de rotation de la polarisation.

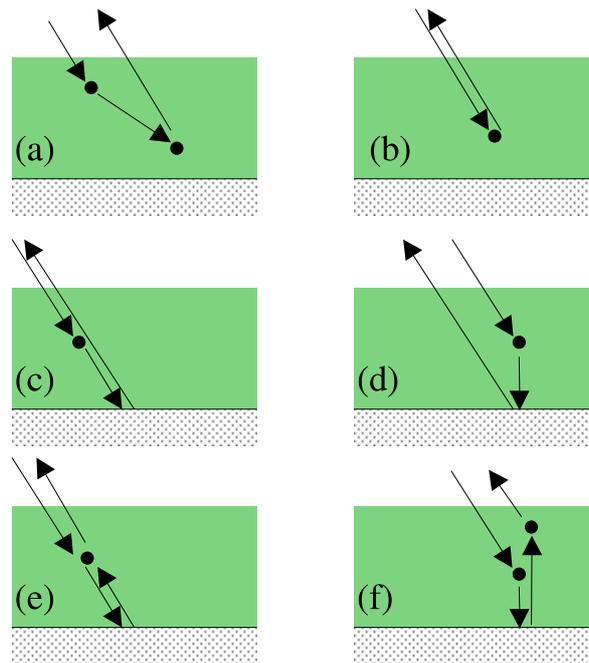


FIG. 3.18 – . Quelques mécanismes pris en compte par DORT qui peuvent dépolariiser l'onde

Dépolarisation en bande C

La figure 3.19 montre les résultats de modélisation et les coefficients de rétrodiffusion en polarisation HV à 26° et 54° d'angle d'incidence mesurés sur le site des Landes. Le modèle RT sous-estime les mesures d'environ 6dB aux deux incidences. Au contraire le modèle DORT (avec sol) est en bon accord avec les mesures.

Le modèle DORT sans le sol donnent des résultats intermédiaires entre les modèles RT et DORT avec le sol ce qui indique que la rétrodiffusion est en partie due aux diffusions multiples de volume (mécanismes (b)), et en partie aux diffusions sol-végétation d'ordre 1 (mécanismes (c) et (d)) ou supérieur (mécanismes (e) et (f) par exemple). Le mécanisme sol-végétation est probablement un mécanisme de premier ordre d'interactions incohérentes avec le sol (mécanisme (c), (d) ou autre du même type)³⁰. La dépolarisation est produite par la couronne ou le sous-bois, et la diffusion par le sol conserve la polarisation³¹. Cette contribution du sol s'explique par la densité particulièrement faible du site des Landes comme pour les résultats en co-polarisation (voir la section 3.2.3).

³⁰En changeant le diagramme de diffusion du sol, il serait possible d'avoir une meilleure idée du mécanisme sous-jacent. Cette approche peu rigoureuse n'a pas été suivie.

³¹La rétrodiffusion du sol en polarisation croisée est généralement faible, et n'est pas estimée par les modèles de sol de premier ordre tel IEM, Kirchoff. Les modèles de second ordre IEM (avec des termes additionnelles)[Fung, 1994], SSA [Voronovich, 1994] estime le coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée.

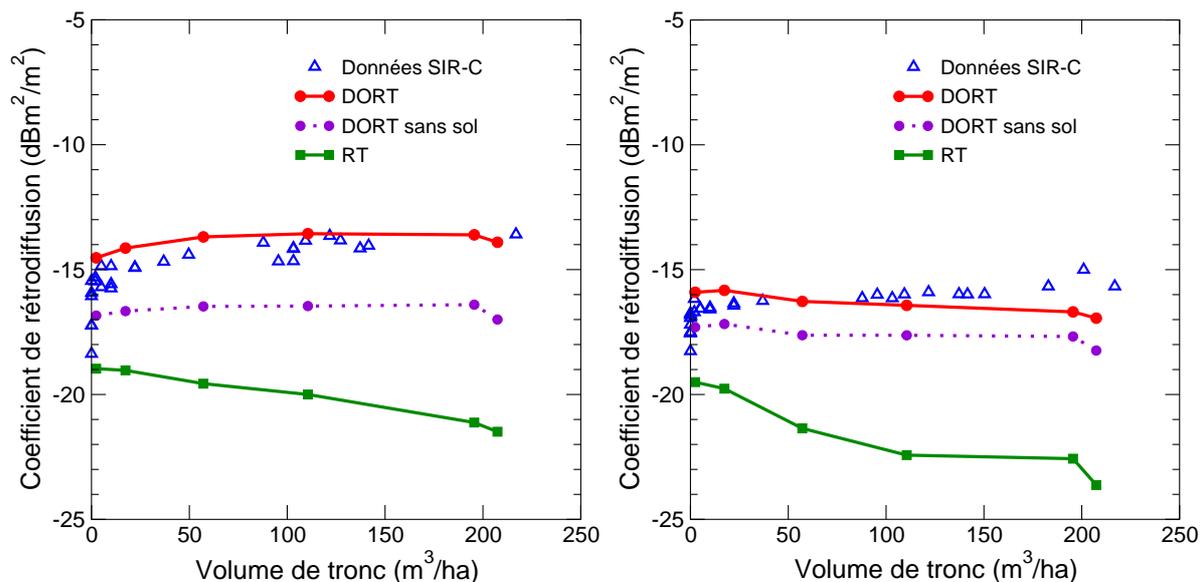


FIG. 3.19 – Résultats du modèle DORT et RT en polarisation HV à 26° et 54° d'angle d'incidence sur le site des Landes.

Les résultats pour les deux angles d'incidence montrent clairement que le sol joue un rôle plus important à 26° qu'à 54°, ce qui explique la différence importante de rétrodiffusion mesurée. Aux deux angles d'incidence, la contribution des diffusions multiples (estimées par DORT sans sol) sont à peu près égales (la différence est de -1.2dB, en partie expliquée par le rapport des cosinus³² égal à -1.8dB). Ceci est due à l'orientation quasi-uniforme des diffuseurs principaux – les branches secondaires. Ce mécanisme est peu sensible à l'incidence. La contribution des mécanismes sol-végétation, estimée par la différence (en valeur naturelle) entre le coefficient de rétrodiffusion estimé par DORT avec sol et celui estimé par DORT sans sol, est d'environ -17dB (à partir de 50m³/ha) à 26° et seulement -22dB à 54°. L'influence de l'incidence sur ce mécanisme est double : l'atténuation est plus élevée à forte incidence, et la rétrodiffusion du sol est moindre.

La figure 3.20 montre les résultats de modélisation sur le site de Lozère à 55° d'angle d'incidence. Comme pour les Landes, le modèle de premier ordre sous-estime le coefficient de rétrodiffusion mesuré d'environ 4dB, ce qui montre le rôle des diffusions multiples sur la dépolarisation. Le modèle DORT est en accord avec les mesures à partir de 50m³/ha. Aux faibles volumes, le coefficient de rétrodiffusion est surestimé probablement à cause d'une mauvaise estimation de la rugosité du sol. Contrairement au cas des Landes, le modèle DORT avec et sans le sol donne

³²Le cosinus vient de la définition du coefficient de rétrodiffusion. Il rend comparable des données acquises à plusieurs angle d'incidence pour les surfaces. Dans le cas des volume, il ajoute un terme qui n'a rien de physique. L'utilisation du coefficient γ serait plus indiqué.

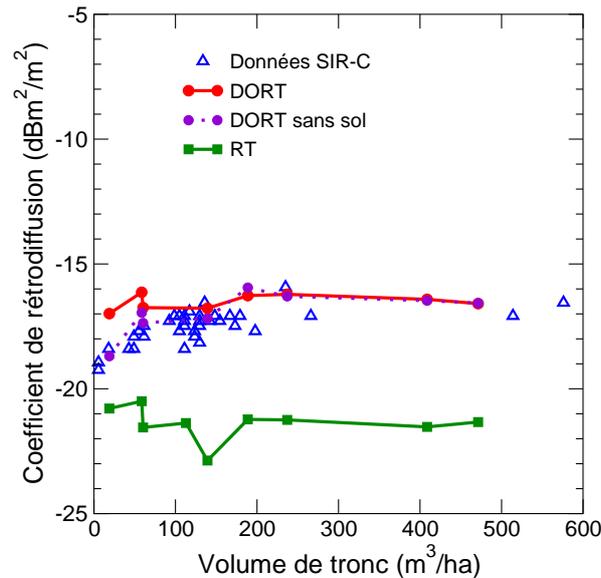


FIG. 3.20 – Résultats du modèle DORT et RT en polarisation HV à 55 ° d'angle d'incidence sur le site de Lozère.

des résultats similaires (moins de 1dB de différence à partir de 50m³/ha), c'est à dire que le sol joue un rôle négligeable. Ce résultat s'explique par la densité élevée des forêts de Lozère et est similaire aux résultats en co-polarisation (voir la section 3.2.3). Le mécanisme prépondérant est la diffusion multiple de volume.

Dépolarisation en bande L

Du point de vue des applications, la polarisation HV en bande L est particulièrement intéressante. En bande L, le coefficient de rétrodiffusion sature pour des volumes plus élevés qu'en bande C (de l'ordre de 80m³/ha contre 50m³/ha). En copolarisation, la dynamique du signal est faible car la rétrodiffusion du sol est du même ordre de grandeur que la rétrodiffusion du couvert (surtout autour de 26° d'angle d'incidence). Au contraire, la polarisation HV présente une bonne dynamique (de l'ordre de 5dB) et une faible sensibilité aux paramètres perturbateurs [Melon, 2002]. C'est donc un bon candidat pour l'inversion du signal radar en biomasse. Avec le lancement en 2004, du capteur bande L ALOS-PALSAR, la polarisation HV sera disponible pour des applications opérationnelles.

Les résultats en bande L sont subordonnés à la modélisation imparfaite du tronc par les modèles de transfert radiatif (cf section 3.3.1). On notera que le modèle RT tient compte du *backscattering enhancement* ce que ne fait pas le modèle DORT.

Les résultats sur le site des Landes à 26° et 54° d'angle d'incidence sont présentés figure 3.21.

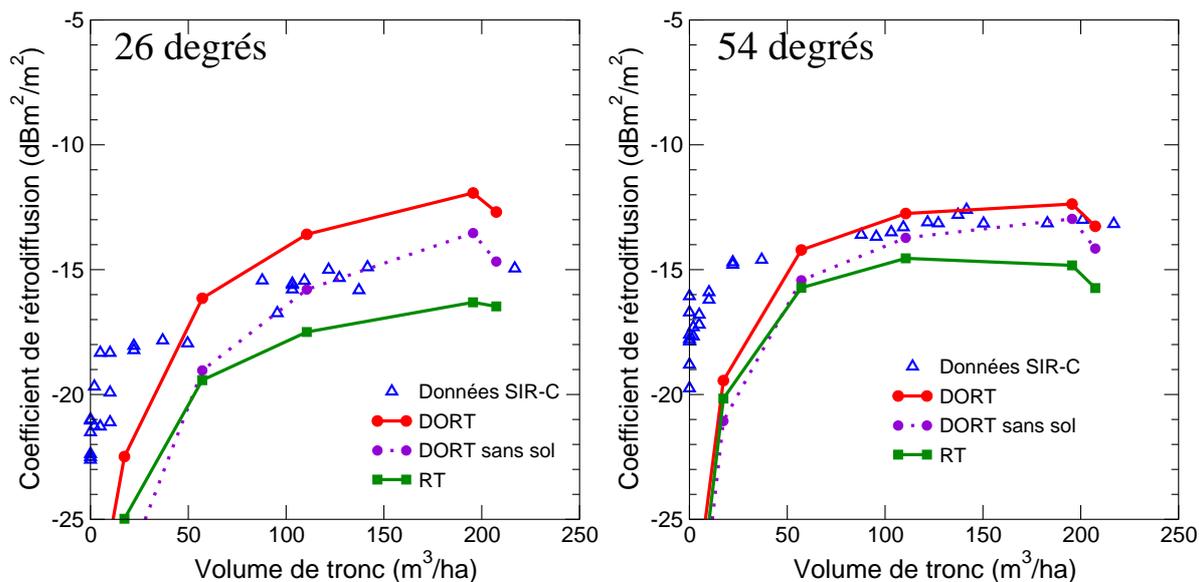


FIG. 3.21 – Résultats du modèle DORT et RT en polarisation HV à 26° et 54° d'angle d'incidence sur le site de Landes.

En général, le modèle RT sous-estime les coefficients de rétrodiffusion mesurés, mais la différence est de l'ordre 2dB alors qu'en bande C elle est d'au moins 5dB. Pour les volumes inférieurs à $50\text{m}^3/\text{ha}$, les modèles sous-estiment les mesures. A ces volumes, la rétrodiffusion directe du sol est le mécanisme prépondérant, car les arbres sont petits et la rétrodiffusion du sous-bois est négligeable en bande L. Cependant, ce mécanisme n'est pas modélisé par les modèles DORT et RT car le modèle de diffusion du sol IEM ne permet pas de calculer la rétrodiffusion en polarisation HV³³. Au delà de $50\text{m}^3/\text{ha}$, le modèle DORT tend à surestimer le signal à 26° d'angle d'incidence et donne de bons résultats à 54° .

La faible différence entre le modèle de premier ordre et DORT signifie que le rôle des diffusions multiples ou de la diffusion incohérente du sol est faible, mais non négligeable. L'estimation par le modèle DORT sans le sol indique qu'en dessous de $100\text{m}^3/\text{ha}$, la différence s'explique par la diffusion incohérente du sol, et au delà par les diffusions multiples.

En Lozère le modèle DORT surestime largement le coefficient de rétrodiffusion mesuré (figure 3.22). Au contraire le modèle RT semble être en bon accord avec les mesures. La source de cette erreur n'est pas connue. Il est par conséquent peu prudent de pousser l'interprétation plus en avant. On peut seulement remarquer que la différence d'environ 3dB entre les résultats des deux modèles indique un potentiel rôle des diffusions multiples.

³³Il est possible d'ajouter une estimation expérimentale de la rétrodiffusion du sol nu en polarisation HV, mais cette approche n'est pas très rigoureuse.

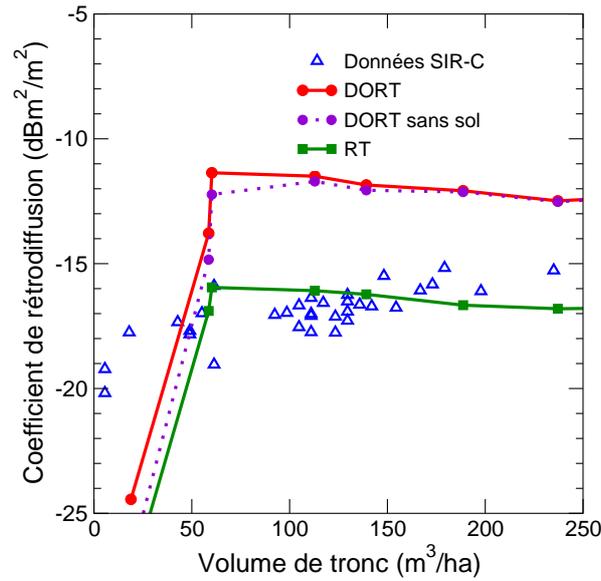


FIG. 3.22 – Résultats du modèle DORT et RT en polarisation HV à 55° d'angle d'incidence sur le site de Lozère.

Résumé

Le tableau 3.4 résume les mécanismes prépondérants en polarisation HV en fonction des sites et de la fréquence.

	bande C	bande L
Landes : faible densité (300 tiges/ha)	Interaction incohérente sol/végétation.	Mécanismes de premier ordre (section 3.2.3). Diffusions multiples et interactions incohérentes avec le sol négligeables.
Lozère : forte densité (800 tiges/ha)	Diffusions multiples.	?

TAB. 3.4 – Mécanismes d'interaction principaux en polarisation HV en fonction de la fréquence et de la densité des forêts.

3.4.2 Copolarisations

La rétrodiffusion en copolarisation est généralement supérieure à celle en polarisation croisée. Ceci s'explique par le fait qu'il n'est pas nécessaire que l'onde interagisse de façon "particulière" avec le milieu pour observer un signal. Le rôle des diffusions multiples n'est donc pas aussi fondamentale que pour la polarisation croisée. Cependant, se pose la question de la contribution des diffusions multiples par rapport aux diffusions simples dans les milieux forestiers. En général, ces milieux sont peu denses. Le volume fractionnel (hors tronc) est compris entre 0.01% et 0.1%. Les diffusions multiples sont, en principe, négligeables devant les diffusions simples (en copolarisation). Mais, il y a des exceptions, comme par exemple en Lozère où le volume fractionnel atteint 0.3%³⁴. Dans ce cas, les mécanismes de diffusion multiples peuvent contribuer significativement au signal rétrodiffusé.

La comparaison entre les mesures et les estimations des modèles DORT et RT est présentée dans un premier temps pour la bande C, et dans un deuxième temps en bande L.

Bande C

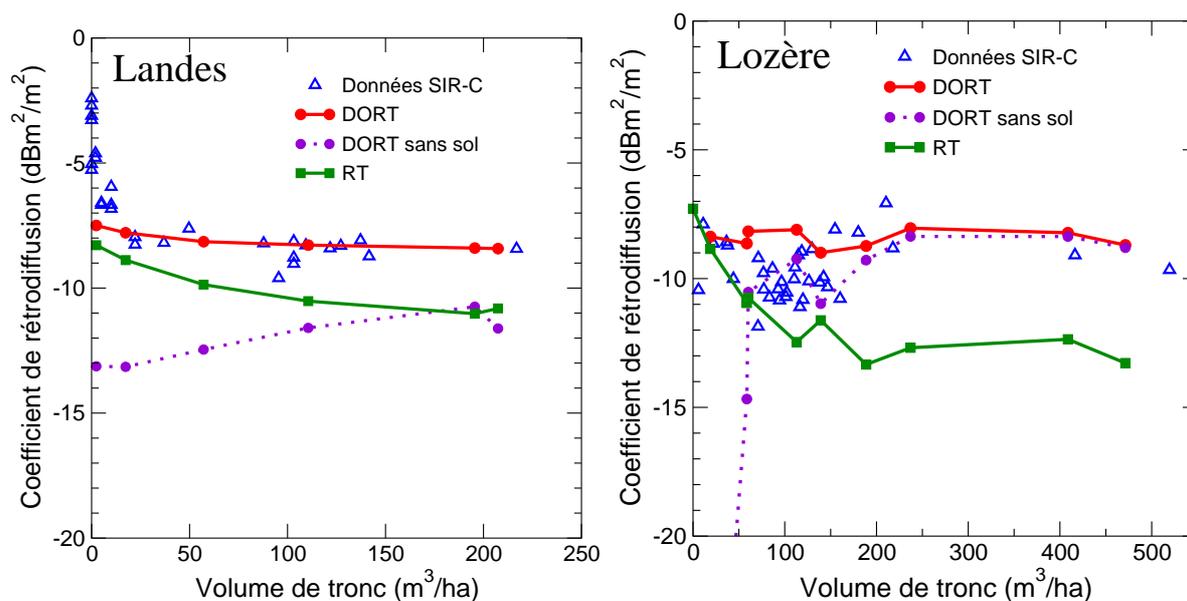


FIG. 3.23 – Résultats du modèle DORT et RT en polarisation VV à 26 ° d'angle d'incidence sur le site de Landes et à 23 ° d'angle d'incidence sur le site de Lozère.

Les résultats de modélisation sont comparés avec les mesures acquises par SIR-C sur le

³⁴C'est le volume fractionnel des diffuseurs autre que le tronc pour l'ensemble du couvert. Si on restreint le volume à la couronne, le volume fractionnel peut doubler voire tripler.

site des Landes (polarisation VV, 26° d'angle d'incidence) à la figure 3.23. Pour les très faibles volumes (moins de $15\text{m}^3/\text{ha}$), le modèle DORT, comme le modèle RT, ne reproduit pas la décroissance de la rétrodiffusion car ce sont des modèles bidimensionnels (voir la section 3.2.3). A partir de $50\text{m}^3/\text{ha}$, le modèle DORT donne des résultats environ 2dB supérieurs aux résultats du modèle RT et l'accord avec les données est meilleur. Les résultats de DORT sans le sol montrent que les diffusions multiples de volume, sont un mécanisme non négligeable, mais non prépondérant. La rétrodiffusion est principalement due à des mécanismes de premier ordre : diffusion directe du sol et diffusion incohérente sol-végétation.

Sur le site de Lozère, les données ont été acquises par ERS (polarisation VV, 23° d'angle d'incidence). L'écart entre les deux modèles est d'environ 4dB. A partir de $200\text{m}^3/\text{ha}$, le modèle DORT estime les mêmes coefficients de rétrodiffusion sans le sol et avec sol. La diffusion vient donc essentiellement du volume. La différence entre les deux modèles montre alors que les diffusions multiples de volume sont prépondérantes devant les diffusions simples. Des résultats similaires sont obtenus à 55° d'incidence.

bande L

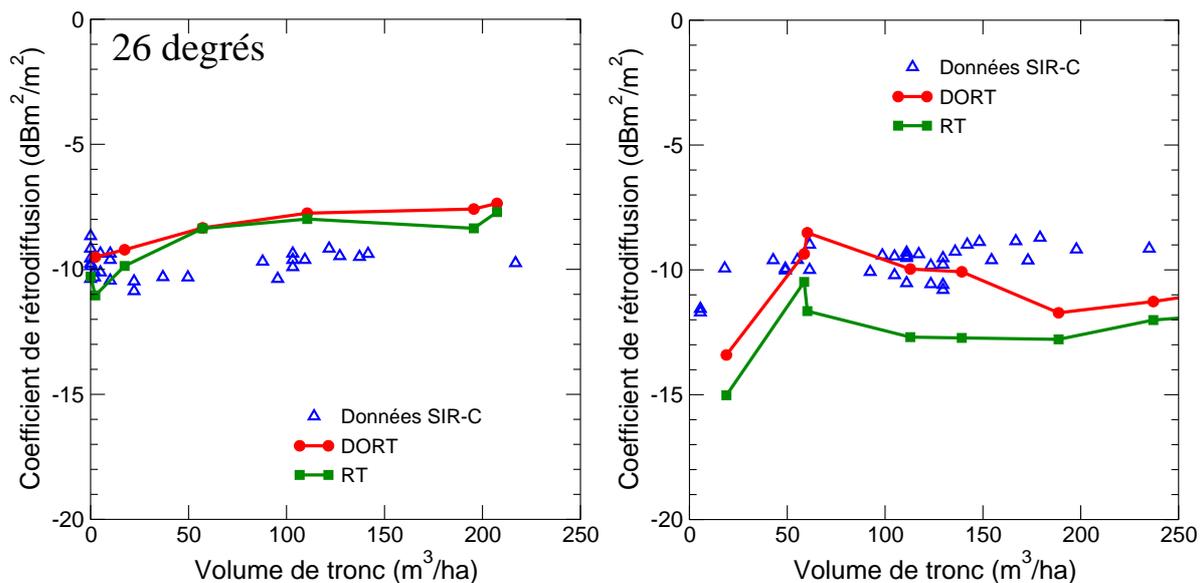


FIG. 3.24 – Résultats du modèle DORT et RT en polarisation HH à 26° d'angle d'incidence sur le site de Landes et à 55° d'angle d'incidence sur le site de Lozère.

La figure 3.24 montre les résultats du modèle DORT en polarisation HH à 26° d'angle d'incidence sur le site des Landes et 55° d'angle d'incidence sur le site de Lozère. Sur le site des Landes, les résultats du modèle RT sont très proches de ceux du modèle DORT, ce qui signifie

que les diffusions multiples et la diffusion incohérente du sol sont négligeables. Les résultats (non présentés) à 54° d'angle d'incidence conduisent à la même conclusion.

Sur le site de Lozère, les deux modèles sont en désaccord avec les mesures. Les diffusions multiples semblent contribuer à la rétrodiffusion totale.

Résumé

Le tableau 3.5 résume les résultats en copolarisation. Dans le cas où les mécanismes de premier ordre sont prépondérants (par abus de langage les mécanismes pris en compte par le modèle RT) le détail est discuté aux sections 3.2.3.

	bande C	bande L
Landes : faible densité (300 tiges/ha)	Mécanismes de premier ordre . Diffusions multiples non négligeables.	Mécanismes de premier ordre. Diffusions multiples et interactions incohérentes avec le sol négligeables.
Lozère : forte densité (800 tiges/ha)	Diffusions multiples.	?

TAB. 3.5 – Mécanismes d'interaction principaux en copolarisation en fonction de la fréquence et de la densité des forêts.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE

La comparaison entre les données SAR et les modèles a permis dans la plupart des configurations radar de déterminer les mécanismes prépondérants et les diffuseurs principaux. En bande C, la rétrodiffusion est due à la rétrodiffusion des branches secondaires et/ou à la rétrodiffusion du sol. En bande L, les phénomènes sont plus complexes. Les diffuseurs principaux dépendent de l'angle d'incidence, et ne sont pas nécessairement les atténuateurs principaux. De plus, la rétrodiffusion résulte de la compétition entre trois mécanismes : rétrodiffusion du couvert, rétrodiffusion du sol, et diffusion sol-couvert. Du point de vue de la modélisation, les principaux résultats sont les suivant :

- La structure tridimensionnelle influence les profils de rétrodiffusion ou les estimations par interférométrie de la hauteur du couvert. Par contre, elle a peu d'effet sur le coefficient de rétrodiffusion dans les cas étudiés.
- La dégradation des maquettes AMAP est une source d'erreur peu importante, moins de 2dB.
- La description des troncs pose des problèmes en bande L surtout à forte incidence.
- Le modèle DORT apporte une réelle amélioration des estimations de coefficient de rétrodiffusion, en particulier en polarisation HV.

Le tableau 3.6 présente un résumé des principaux résultats de ce chapitre.

	Landes : faible densité (300 tiges/ha)	Lozère : forte densité (800 tiges/ha)
bande C, 23°, HH et VV	Rétrodiffusion du sol	Rétrodiffusion de la couronne ^(*)
bande C, 23°, HV	Interaction incohérente avec le sol ^(*)	Rétrodiffusion de la couronne ^(*)
bande C 50°, HH et VV	Rétrodiffusion de la couronne	Rétrodiffusion de la couronne ^(**)
bande C 50°, HV	Interaction incohérente avec le sol et rétrodiffusion de la couronne ^(*)	Rétrodiffusion de la couronne ^(**)
bande L, 26°, HH	Rétrodiffusion de la couronne ou interaction tronc-sol	
bande L, 26°, VV	Rétrodiffusion de la couronne	
bande L, 26°, HV	Rétrodiffusion de la couronne et interaction incohérente avec le sol ^(*)	
bande L, 50°, HH, VV	Probablement la couronne, mais modélisation problématique	Probablement la couronne, mais modélisation problématique
bande L, 50°, HV	Rétrodiffusion de la couronne et interaction incohérente avec le sol ^(*)	Rétrodiffusion de la couronne. Rôle des diffusions multiples inconnu.

TAB. 3.6 – Mécanismes d'interaction principaux en fonction de la densité des forêts, de la fréquence, de l'incidence et de la polarisation. (*) résultat obtenu par le modèle DORT, c'est à dire faisant intervenir des diffusions multiples ou interactions incohérentes avec le sol. (**) résultats non présentés.

Deuxième partie

Couvert de blé

Chapitre 4

Rétrodiffusion des couverts de blé.

Interprétation des résultats de modélisation

Sommaire

4.1	Caractéristiques du blé et mesures radar	132
4.1.1	Campagne de Marestaing.	133
4.1.2	Campagne de Matera.	136
4.2	Modèle de premier ordre WheatBorn	141
4.2.1	Les diffuseurs du blé.	141
4.2.2	Description du modèle WheatBorn	143
4.3	Modèle d'ordre supérieur MUSCAT	146
4.3.1	Présentation du problème	147
4.3.2	L'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax	148
4.3.3	Discrétisation. Système linéaire fini	151
4.3.4	Résolution numérique.	153
4.3.5	Simulations	160

Les couverts de blé ne posent pas les mêmes difficultés de modélisation que les couverts forestiers. La plante est plus facile à caractériser et le milieu est plus homogène. Mais, les diffuseurs comme les feuilles et les épis ont des formes complexes et la densité de diffuseurs est beaucoup plus élevée que dans les forêts. Ces deux particularités ont conduit au développement de deux modèles spécifiques. Le premier est un modèle cohérent de premier ordre dont le but est d'évaluer le rôle des feuilles et des épis. Le second est un modèle d'ordre supérieur qui ne modélise que les tiges. Il permet de calculer l'atténuation et la diffusion d'un milieu dense. L'ensemble de ce travail est spécifique à la bande C.

Bien que les voies de modélisation électromagnétique soient peu nombreuses, chaque type de couvert agricole nécessite une modélisation spécifique. La plupart des espèces cultivées ont fait l'objet de travaux, comme par exemple la modélisation du riz [Le Toan et al., 1997], du soja [Nghiem et al., 1993][Chiu and Sarabandi, 2000], de la luzerne [Chauhan and Lang, 1999] ou du tournesol [Marliani et al., 2002]. Ces modèles se distinguent essentiellement par la manière de représenter les éléments végétaux de chaque espèce. Un état de l'art de la modélisation et des principaux résultats expérimentaux est présenté dans [Ferrazzoli, 2001].

Malgré l'importance du blé par rapport aux autres cultures, les travaux de modélisation sont peu nombreux. L'approche radiative a été utilisée par Ulaby et al. [1987] pour modéliser le blé en bande Ku (13GHz) et par Cookmartin et al. [2000](second ordre) pour la bande C. Plus récemment, l'approche cohérente a été suivie par Stiles and Sarabandi [2000] et appliquée à l'analyse des coefficients de rétrodiffusion en bande L [Stiles et al., 2000]. Un autre modèle, moins avancé, a été proposé par Marliani et al. [2002]. Les résultats de ces modèles sont difficilement comparables à cause de la variété des fréquences étudiées.

L'analyse expérimentale des variations temporelles des couverts de blé a montré que la bande C offrait une sensibilité importante à la biomasse. C'est probablement la fréquence la plus adaptée pour l'inversion du signal [Ferrazzoli, 2001]. Par ailleurs, un grand nombre de données en bande C ont été acquises par ERS et RADARSAT depuis une dizaine d'années. Pour l'avenir, les capteurs ENVISAT/ASAR et RADARSAT-2 assurent non seulement la continuité, mais offrent aussi une variété de configurations d'acquisition plus importante. Il est donc nécessaire de déterminer le contenu informatif de ces données. Cependant, les travaux de [Cookmartin et al., 2000] ont mis en évidence les difficultés de la modélisation des couverts de blé à cette bande de fréquences, et plus particulièrement en polarisation VV. Les travaux présentés dans ce manuscrit

sont motivés par ces constats. Ils sont organisés en deux temps : développement d'un modèle cohérent pour évaluer les difficultés, puis développement d'un nouveau modèle pour résoudre une partie de ces difficultés.

Dans un premier temps, le modèle cohérent WheatBorn a été développé dans le but d'analyser les variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion acquis par ERS (bande C, polarisation VV, 23° d'angle d'incidence). La comparaison des résultats de modélisation avec les données a montré un large désaccord surtout en polarisation VV, dès que le blé est développé. Ce désaccord est attribué à une surestimation de l'atténuation des tiges par les modèles de premier ordre qui conduit à une sous-estimation de la rétrodiffusion. Ceci vient probablement du fait que les hypothèses sous-jacentes au calcul de l'atténuation ne sont pas respectées dans le cas des couverts de blé. En effet, la densité élevée et la proximité des tiges les unes des autres favorisent les interactions entre diffuseurs, c'est à dire que l'hypothèse des diffuseurs indépendants n'est probablement pas respectée.

Afin de confirmer cette supposition, une voie de modélisation différente est nécessaire. Les travaux sur les milieux denses ont montré que l'atténuation était généralement plus faible que celle estimée au premier ordre (sous l'approximation de Foldy-Lax). La plupart de ces travaux portent sur des milieux constitués de sphères ou de sphéroïdes [Wen et al., 1990][Tsang et al., 1985, p447][Tsang and Ishimaru, 1985]. Mais cette description est inadaptée au blé.

Comme les tiges sont les principaux atténuateurs en polarisation VV d'après les modèles de premier ordre, on considère que le couvert de blé peut être simplifié en première approximation à une collection de tiges. Des modèles ont été proposés pour des milieux denses constitués de cylindres [Tsang et al., 1995][Sarabandi et al., 1993]. Ces deux modèles calculent les interactions jusqu'au second ordre (diffusions simples et diffusions doubles), c'est à dire les deux premiers termes de la série de Born. Ils sont adaptés au calcul de l'atténuation, mais pas à celui de la rétrodiffusion quand le milieu contient des diffuseurs qui absorbent (constante diélectrique complexe)¹. De plus, pour les milieux particulièrement denses, les diffusions multiples (d'ordre supérieur à deux) peuvent être significatives. Ces modèles ne conviennent donc pas à la modélisation des couverts de blé.

Cependant, les équations développées par Tsang et al. [1995] sont générales. Le modèle développé dans ce travail et baptisé MUSCAT (*MUltiple SCattering for wheAT modelling*) est une méthode numérique de résolution de ces équations sans limitation sur les ordres de diffusion.

¹Il faut soit calculer les ordres supérieurs, soit développer la solution en série de Born modifiée (ce qui interdit alors le calcul de l'atténuation)

Les modèles décrits dans la littérature et dans ce manuscrit sont classés schématiquement dans la figure 4.1 selon la qualité de la description du milieu et la quantité des interactions électromagnétiques calculées. Les modèles MUSCAT et WheatBorn se situent à l'opposé l'un de

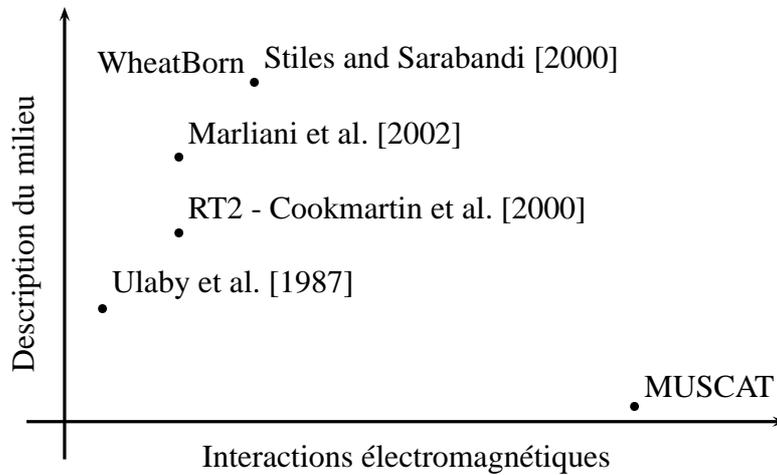


FIG. 4.1 – Classement schématique des modèles de blé selon leur complexité électromagnétique et la précision de la description du milieu.

l'autre, mais de part leurs avantages respectifs, ils permettent de mieux comprendre l'interaction onde-couvert. Il est important de signaler qu'aux vues des difficultés posées par la modélisation des couverts de blé en bande C, les modèles proposés dans ce travail sont avant tout des outils d'aide à l'interprétation. En l'état actuel, ils ne sont pas à proprement parler des modèles de rétrodiffusion des couverts de blé.

Parallèlement aux développements théoriques, deux campagnes de mesures terrain et d'acquisition de mesures radar ont été conduites. Ces mesures sont présentées dans la première partie de ce chapitre afin de préciser les paramètres mesurés et leur ordre de grandeur. La deuxième partie décrit le modèle WheatBorn et la troisième le modèle MUSCAT.

4.1 Caractéristiques du blé et mesures radar

Deux campagnes de mesures ont été conduites sur deux sites différents. Le premier site se situe dans la vallée de la Save sur la commune de Marestaing dans le Gers. Les mesures ont été effectuées pendant le printemps 2000. La deuxième campagne a été réalisée en collaboration avec le laboratoire *Istituto di Tecnologia Informatica Spaziale* du CNR, Matera en Italie. Elle s'est déroulée pendant le printemps 2001 dans les environs de Matera.

L'objectif premier de ces campagnes est de fournir tous les paramètres nécessaires à la modélisation ainsi que des données radar. Le nombre de champs mesurés est donc restreint et les dates des mesures correspondent aux acquisitions radar possibles plutôt qu'aux changements phénologiques de la végétation. Ces campagnes intensives se justifient par rapport à d'autres campagnes, qui peuvent être qualifiées d'extensives, dont l'objectif est d'acquérir des données radar sur un grand nombre de champs et de sites mais peu de mesures in-situ.

4.1.1 Campagne de Marestaing.

La vallée de la Save dans le Gers est principalement semée de blé d'hiver. Un champ plat de 4.5 hectares a été sélectionné sur la commune de Marestaing. Les mesures ont été collectées pendant 4 passages d'ERS-2 les 13 mars, 17 avril, 22 mai et 28 juin 2000.

Mesures terrain

Les mesures consistent à caractériser la géométrie, l'humidité et la densité des plantes, la rugosité et l'humidité du sol.

1. Les mesures effectuées en début de saison ou à certaines dates.
 - Distance entre les rangées. Cette distance dépend du réglage de la machine pour semer, elle est en général de 15cm.
 - Nombre de plants par mètre. Ce nombre décroît rapidement au tout début de la saison, mais reste relativement constant ensuite.
 - Rugosité du sol. La rugosité du sol est relativement constante durant la saison. Cette mesure n'a pas été faite lors de cette campagne, et a été estimée à partir de données collectées en 1998.
2. Les mesures effectuées à chaque date.
 - Nombre de tiges par plant.
 - Rayon des tiges à mi-hauteur.
 - Longueur de la tige.
 - Longueur et diamètre de l'épi.
 - Nombre de feuilles vivantes par tiges. Les feuilles mortes en bas de la tige ne sont pas prises en compte, car elles interagissent peu avec les ondes électromagnétiques.
 - L'épaisseur à mi-longueur, la longueur et largeur moyenne des feuilles. La largeur moyenne est égale à la surface de la feuille divisée par sa longueur. La feuille drapeau (feuille située au bout de la tiges) n'a pas été distinguée des autres.
 - Angle d'insertion des feuilles, et de l'inclinaison des tiges. Les mesures angulaires sont

difficiles à réaliser en pratique, et seules des estimations peuvent être faites. De même, la courbure des feuilles est un paramètre important, mais difficile à mesurer.

- Masse des plantes pour en déduire la biomasse fraîche.
- Humidité des plantes et du sol. Les humidités permettent de calculer les constantes diélectriques (pour le sol : [Hallikainen et al., 1985] et pour la végétation : [Ulaby and El-Rayes, 1987]). Lors de cette campagne, l'humidité des plantes a été estimée en fonction du stade phénologique [Huet, 1983].

De plus, des échantillons d'épis, de feuilles et de jeunes plants ont été collectés et scannés. Les images de feuilles ont été traitées pour mesurer la longueur et la largeur moyenne des feuilles.

Toutes ces mesures (à l'exclusion des humidités) sont utilisées pour reconstruire la géométrie du couvert. Une étude statistique précise des mesures aurait été justifiée si le réalisme du milieu modélisé était le problème majeur. Mais, comme en l'état actuel, le problème vient de la modélisation électromagnétique, une solution plus simple a été adoptée. Les paramètres d'entrée des modèles sont la moyenne et l'écart-type de chaque type de mesure (rayon des tiges, longueur des tiges, etc). Le couvert est reconstruit en supposant des distributions gaussiennes.

Dans la suite, on utilisera des indicateurs clé pour la modélisation électromagnétique. Ces indicateurs sont déduits des mesures :

- La densité surfacique n_t de tiges est déduite de la densité linéique de plant, de l'espacement entre les rangées et du nombre de tiges par plant.
- Le volume fractionnel f (de tige uniquement) est déduit de la densité surfacique de tiges n_t et le rayon moyen a des tiges.

$$f = n_t \pi a^2 \quad (4.1)$$

Le volume fractionnel est un indicateur de la densité du milieu. Un milieu est considéré dense quand le volume fractionnel est supérieur à une valeur entre 0.1% et 1%, en fonction de la taille des diffuseurs par rapport à la longueur d'onde et de la polarisation.

La table 4.1 résume les mesures, et donne la densité surfacique de tiges, le volume fractionnel ainsi que le stade phénologique. Le figure 4.2 montre l'évolution temporelle de la biomasse et de la hauteur du couvert.

Données radar. Analyse qualitative

Les données radar sont extraites des produits *Precision Radiometric Image* acquis par ERS-2. Les produits ont été traités et calibrés par la SAR-TOOLBOX de l'Agence Spatiale Européenne

	13 mars	17 avril	22 mai	26 juin
stade	tallage	tallage	maturation	maturation avancée
biomasse (kg/m ²)	0.46	1.8	3.9	2.8
tiges				
rayon a (mm)	1.1	1.8	1.9	1.8
longueur d (cm)	7.6	19	81	86
densité (tige/m ²)	780	1200	1200	630
fractional volume	0.3%	1.2%	1.3%	0.6%
humidité	70%	80%	70%	20%
feuilles				
épaisseur (mm)	0.2	0.2	0.2	0.2
largeur (cm)	0.4	0.6	0.9	0.7
longueur (cm)	11	14	19	20
densité (feuilles/tige)	3.6	4.7	3.7	4.2
humidité	80%	80%	80%	40%
épis				
longueur (cm)	-	-	≈ 6	≈ 6
sol				
humidité du sol	20%	43%	21%	31%
rugosité (cm)	0.6	0.6	0.6	0.6

TAB. 4.1 – Mesures terrain sur le site de Marestaing.

(ESA). L'image 4.3 montre une composition colorée de la vallée de la Save. Les couleurs caractérisent l'évolution temporelle de la rétrodiffusion. Les points blancs sont les villes. Les zones grises sont des zones de rétrodiffusion stable et peu élevée, c'est à dire des zones de forêts. Les couleurs rouge et violette sont caractéristiques des zones dont la rétrodiffusion diminue au printemps, c'est à dire le blé d'hiver (champs plutôt sombres), et les cultures d'été (champs plutôt clairs). Les couleurs verte et jaune correspondent aux cultures dont la rétrodiffusion augmente au printemps, comme le colza par exemple.

La figure 4.4 montre l'évolution du coefficient de rétrodiffusion pour le champ sélectionné. Cette courbe est l'évolution typique de la rétrodiffusion en bande C, en polarisation VV et à faible incidence du blé [Ferrazzoli, 2001]. Dans un premier temps, la rétrodiffusion est principalement due au sol. La rétrodiffusion totale diminue car la couche de blé atténue l'onde. La diffusion du blé est un mécanisme secondaire, sa contribution ne peut être précisée que par modélisation. Dans un deuxième temps, la rétrodiffusion totale augmente, et ce pour deux raisons :

- La rétrodiffusion du sol augmente car l'atténuation diminue à cause de l'assèchement des

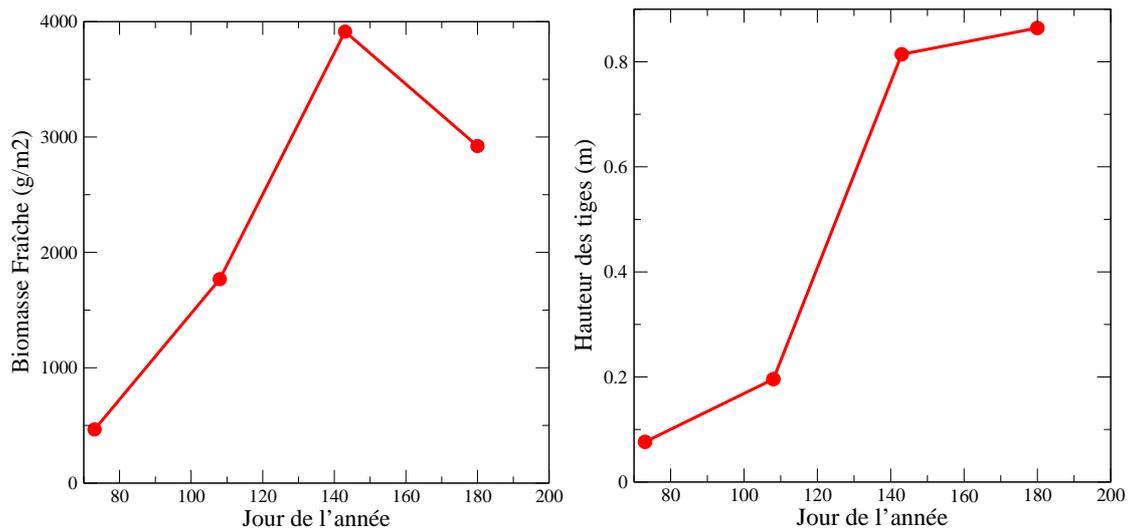


FIG. 4.2 – Evolution temporelle de la biomasse (à gauche) et de la hauteur (à droite) du couvert de blé à Marestaing.

tiges et des feuilles.

- La rétrodiffusion de l'épi est significative. En effet, le coefficient de rétrodiffusion à la dernière date est supérieure à la rétrodiffusion du sol nu en début de la saison. Ceci ne peut s'expliquer que par la diffusion de l'épi car le sol, étant plus sec en fin de saison qu'en début, diffuse moins.

Cette analyse qualitative soulève des questions auxquelles l'analyse de jeux de données plus complets et surtout la modélisation doivent répondre : Quelle est la part de diffusion du sol et du blé en début de saison ? Quelle est la part de diffusion de l'épi ? A quel stade la rétrodiffusion augmente elle ?

Ces réponses sont essentielles pour le développement d'algorithmes d'inversion car elles répondent à la question de la sensibilité du radar aux paramètres géo et biophysiques.

4.1.2 Campagne de Matera.

La campagne de mesure conduite à Matera avait pour ambition d'étudier le potentiel multi-polarisations et multi-incidences d'ENVISAT/ASAR [Mattia et al., 2001a][Mattia et al., soumis]. Les mesures radar ont été collectées par ERS et par le diffusiomètre sol de l'université de Bari, en Italie [Sabatelli et al., 1999]. Ce diffusiomètre bande C permet de mesurer le coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH, VV et HV, pour des incidences de 20° à 60°. Ces configurations (fréquence et polarisation et incidence) sont comparables avec celles d'ENVISAT/ASAR. Cependant, les mesures ne sont pas tout à fait identiques. Pour réduire le speckle, il est néces-

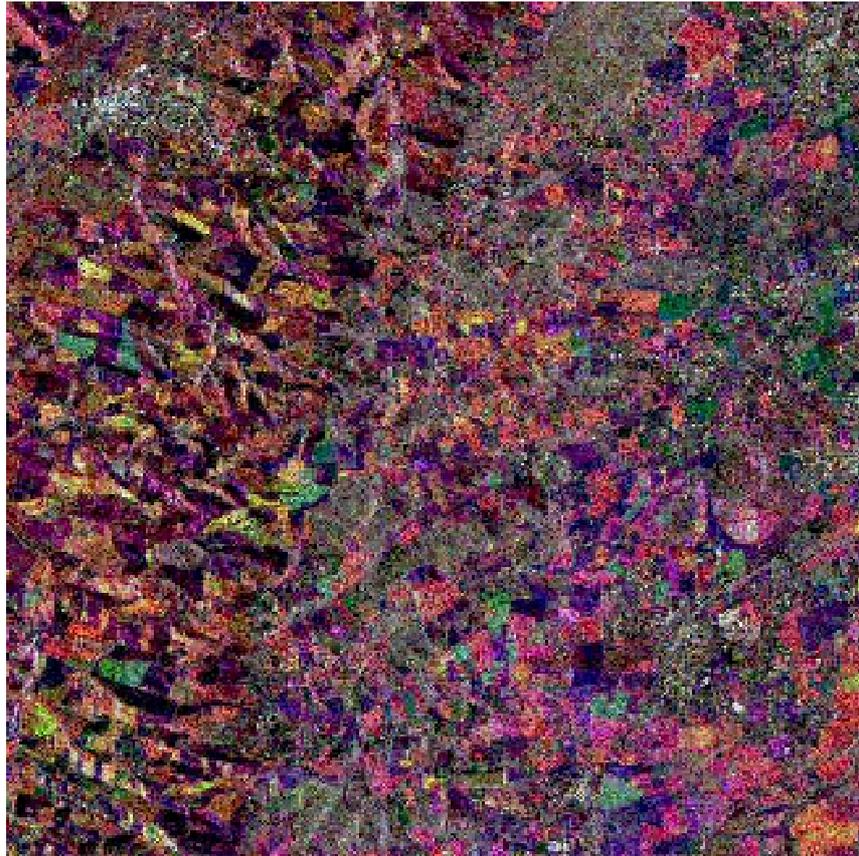


FIG. 4.3 – Composition colorée de 15km×15km de la vallée de la Save (sud-ouest de la France). Données acquises par ERS-2 en 2000, le 13 mars (en bleu), le 17 avril (en rouge) et le 22 mai (en vert).

saire de moyenner des mesures indépendantes. La méthode idéale est d'acquérir les données en déplaçant le diffusiomètre sur une vingtaine de mètres dans la même direction que le capteur spatial. Mais, cette solution est difficile à mettre en pratique. La méthode retenue consiste à faire tourner l'antenne du diffusiomètre. Il s'ensuit que l'azimut du radar par rapport aux rangées du blé varie entre 20° et 160°. Cette particularité a été prise en compte dans les simulations.

Mesures terrain

Les mesures terrain sont similaires aux mesures réalisées à Marestaing en 2000. L'utilisation du diffusiomètre sol permet d'augmenter la répétitivité des mesures, et donc de suivre plus précisément l'évolution du blé. A partir de l'expérience acquise lors de la campagne de Marestaing, des mesures additionnelles ont été collectées :

- biomasse fraîche partitionnée en tige, feuille, et épi.

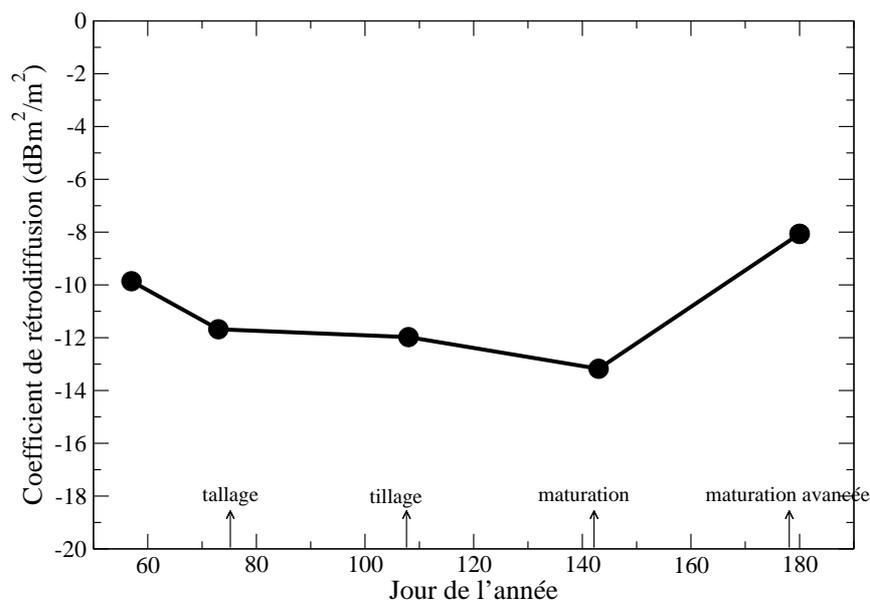


FIG. 4.4 – Evolution temporelle du coefficient de rétrodiffusion sur le site de Marestaing.

- biomasse sèche partitionnée pour déduire l'humidité.
- mesures gravimétriques de l'humidité du sol pour valider les mesures volumétriques.

	8 mars	16 mars	4 avril	20 avril	4 mai	9 mai	24 main	13 juin
stade	tall.	tall.	mont.	gonf.	épi.	épi.	mat.	mat. av.
biomasse (kg/m ²)	0.3	0.2	1.1	1.4	2.1	2.4	2.2	1.6
hauteur du couvert (cm)	8	5	16	28	43	43	67	62
densité (tige/m ²)	700	700	520	520	460	460	440	460
fractional volume	0.2%	0.2%	0.4%	0.6%	0.6%	0.6%	0.5%	0.5%
humidité du sol	23%	21%	18%	21%	15%	29%	9%	5%
rugosité (cm)	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15

TAB. 4.2 – Principales mesures terrain sur le site de Matera. Les stades phénologiques sont le tallage, la montaison, le gonflement, l'épiaison, la maturation et la maturation avancée.

La table 4.2 résume les principales mesures. La figure 4.5 montre les évolutions temporelles de la hauteur du couvert et de la biomasse fraîche compartimentée. La comparaison avec le site de Marestaing montre la grande différence des sites tant au niveau du sol que des plantes :

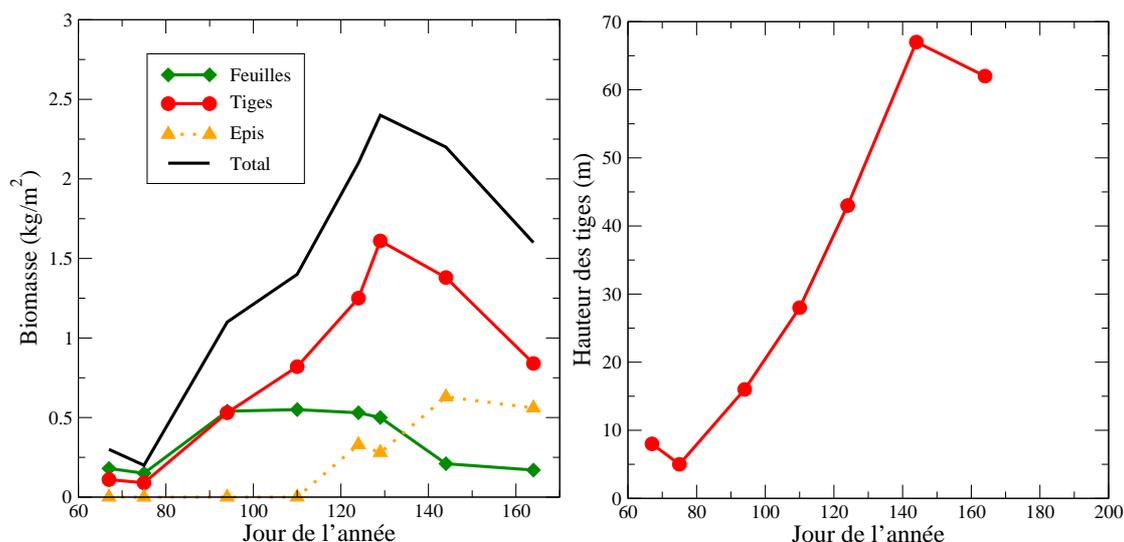


FIG. 4.5 – Evolution temporelle de la biomasse compartimentée (à gauche) et de la hauteur (à droite) du couvert de blé à Matera.

- le sol est plus humide et lisse en France à cause des conditions météorologiques et de la pratique agricole. Le champ sélectionné en Italie n'a pas été roulé.
- Les caractéristiques du couvert sont différentes sur les deux sites. La biomasse maximale (mesurée) atteint 4kg/m² à Marestaing et seulement 2.4kg/m² à Matera. Ceci s'explique essentiellement par une différence de densité de tiges, 1200 tiges/m² sur le site français et environ 450 tiges/m² sur le site italien. Par contre, les densités de feuilles sont proches. On peut remarquer par ailleurs que la productivité moyenne de blé en France est de 7.2 tonnes de grain par hectare contre 3.2 tonnes/ha en Italie.

Ces différences notables sont intéressantes du point de vue de la modélisation, car elles permettent une plus large validation. En comparant avec des mesures réalisées en Angleterre sur un site expérimental [Brown et al., 2000], il semble cependant que le site de Marestaing soit atypique.

Données radar. Analyse qualitative

Les mesures du diffusiomètre sont fournies par l'Université de Bari sous forme de coefficients de rétrodiffusion. Les données en polarisation HV n'ont pas pu être calibrées précisément. La figure 4.6 représente l'évolution du coefficient de rétrodiffusion pour les polarisations HH et VV et pour les angles d'incidence de 23 et 40 degrés.

L'évolution du signal en polarisation VV à faible incidence est comparable à l'évolution observée sur le site de Marestaing (cf ci-dessus). Comme la répétitivité des mesures est supé-

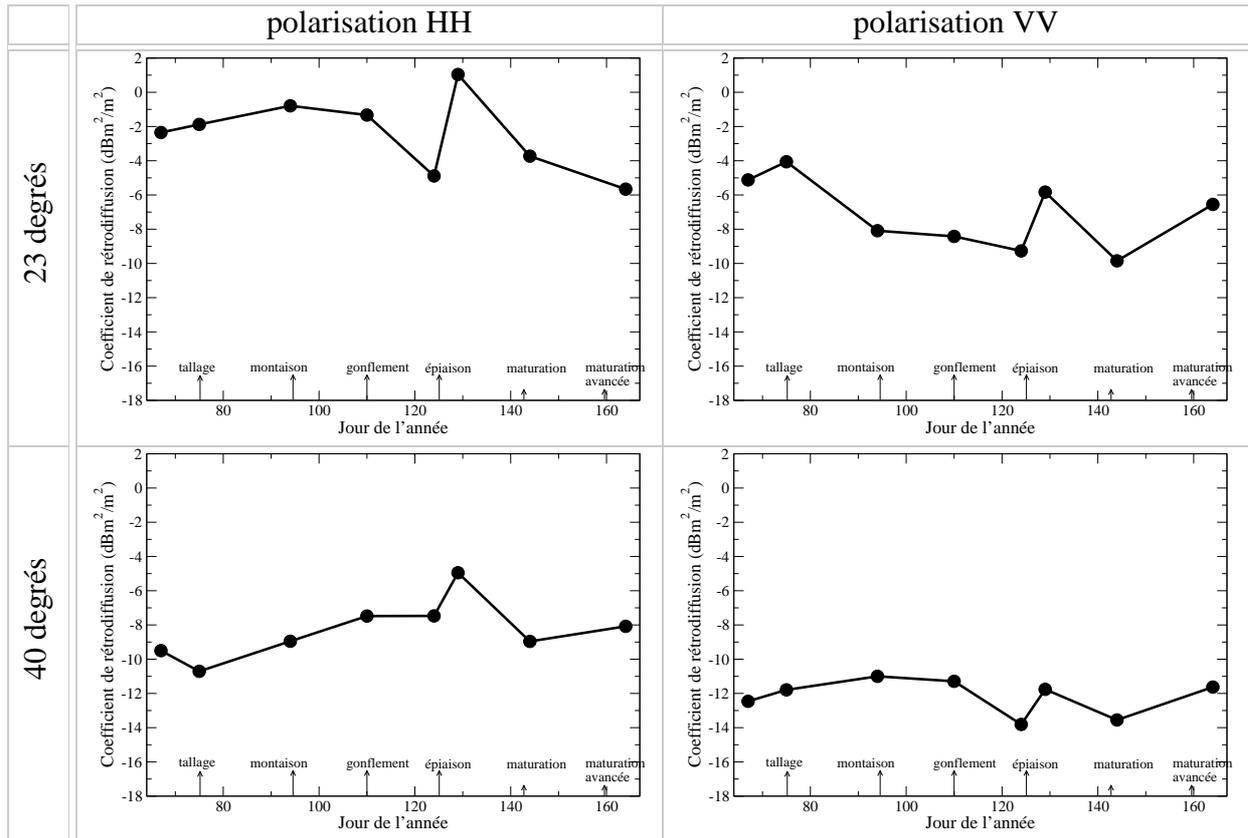


FIG. 4.6 – Evolution du coefficient de rétrodiffusion sur le site de Matera.

rière, une analyse plus précise est possible. On peut en effet distinguer deux phases : avant et après l'épiaison. Dans la première phase, la rétrodiffusion est croissante en polarisation HH et en polarisation VV à forte incidence. En polarisation HH, cette croissance peut être attribuée à la croissance de la biomasse foliaire car les tiges verticales interagissent peu avec les ondes polarisées horizontalement. Pour la polarisation VV, il peut s'agir aussi de la diffusion des tiges. Au début de la deuxième phase, l'apparition de l'épi provoque une chute nette du coefficient de rétrodiffusion (HH 23° et VV 40°) ou une stagnation (HH 40°). En fin de saison, la rétrodiffusion augmente à nouveau, sauf pour la polarisation HH à faible incidence. L'assèchement des tiges et des feuilles réduit l'atténuation et la rétrodiffusion vient alors du sol.

La détection du stade de l'épiaison est primordiale pour le développement d'algorithmes d'inversion car la relation entre les données radar et les paramètres changent radicalement. Ces données montrent que le radar est sensible à la croissance du blé dans la première phase, phase dont l'impact sur la production est le plus important. La modélisation doit permettre de préciser le contenu informatif des différentes configurations et de déterminer leur sensibilité aux différents

paramètres.

4.2 Modèle de premier ordre WheatBorn

La modélisation de la rétrodiffusion du blé, et plus généralement des surfaces agricoles a suivi une évolution similaire à la modélisation des surfaces forestières. Les premiers modèles sont basés sur la théorie du transfert radiatif. Les modèles plus récents, dit cohérents, sont basés sur la théorie de Born modifiée. Mais cette évolution ne provient pas de la même motivation. En modélisation de la forêt, la principale application des modèles cohérents est l'interférométrie. En modélisation des surfaces agricoles, la motivation est plus fondamentale. En effet, les dimensions caractéristiques des milieux agricoles sont plus petites que celle des milieux forestiers et donc plus proches des longueurs d'onde usuelles. Il s'ensuit que les effets cohérents ne peuvent être négligés.

Un modèle cohérent se décompose en deux parties :

1. Calcul de la matrice de diffusion de chaque diffuseur élémentaire.
2. Calcul de la diffusion de l'ensemble des diffuseurs dans le milieu.

Ces deux points sont décrits dans les deux parties suivantes.

4.2.1 Les diffuseurs du blé.

Les couverts de blé sont composés des trois types de diffuseurs : les tiges, les feuilles et l'épi. Les tiges sont modélisées par des cylindres à toutes les fréquences. La matrice de diffusion est calculée sous l'approximation du cylindre fini 2.2.2 qui est largement validée dans le cas des tiges de blé.

Par contre, la forme complexe des feuilles et des épis rend difficile le calcul de la matrice de diffusion. Plusieurs approches ont été abordées dans les travaux antérieurs. Les deux paragraphes suivants présentent une revue critique des approches dans le cas de la bande C.

Les feuilles

Les feuilles de blé posent des problèmes de modélisation tant du point de vue de la caractérisation expérimentale de l'orientation et de la forme que du point de vue du calcul électromagnétique. Dans les travaux antérieurs, les feuilles sont modélisées soit par des disques elliptiques comme dans Marliani et al. [2002] et Macelloni et al. [2001] soit par des cylindres généralisés courbés comme dans Stiles and Sarabandi [2000]. Les deux approches sont limitées :

- Les disques elliptiques sont, par définition, plats. Il faut donc intervenir empiriquement sur la distribution de l'orientation pour simuler l'effet de la courbure. Cette approche est mieux adaptée aux jeunes plants.
- Les cylindres généralisés courbés ressemblent plus à des feuilles de blé développé mais le calcul de la matrice de diffusion est doublement approximatif.
 - Premièrement, le calcul du cylindre généralisé (cf section 2.2.3 est basé sur l'approximation de Rayleigh-Gans valide lorsque au moins deux des dimensions du diffuseur sont négligeables devant la longueur d'onde. En bande C, la largeur des feuilles est de l'ordre du 2cm et n'est donc pas négligeable. Cela conduit à surestimer la diffusion.
 - Deuxièmement, la courbure est modélisée par la juxtaposition de segments élémentaires de cylindre. La diffusion est la somme des contributions élémentaires et ne tient pas compte des interactions entre les segments. Cette approximation de premier ordre est valide pour les faibles courbures, ce qui ne correspond pas à la réalité. L'erreur sur la diffusion n'est pas connue.

La figure 4.7 montre un jeune plant de blé, un plant modélisé avec des disques elliptiques et un autre avec des cylindres elliptiques courbés.



FIG. 4.7 – Jeune plant de blé, plant modélisé avec des disques elliptiques et plant modélisé avec des cylindres elliptiques courbés.

Les épis.

Les épis ont une forme complexe qu'il est possible, aux fréquences basses, de modéliser par des formes simples comme des cylindres (à base circulaire ou elliptique) ou des ellipsoïdes. Aux fréquences élevées, il est nécessaire de modéliser les grains dans le détail en tenant compte

de leur proximité (interaction de champ proche). Pour cela, l'approche de la T-matrix est bien adaptée Tsang et al. [1985], même si elle requiert des ressources numériques importantes.

La bande C semble être à la limite entre les fréquences élevées et basses. Vu les dimensions des grains, il est probable que l'onde ne soit pas sensible aux détails géométriques des épis, et qu'elle les "voit" grossièrement comme des diffuseurs uniques. Par contre, la modélisation simple des épis pose deux problèmes :

- Le choix des dimensions du cylindre ou de l'ellipsoïde équivalent est difficile. Soit le cylindre a le même volume que l'ensemble des grains mais un rayon plus petit que celui de l'épi, soit le cylindre a le même rayon que l'épi et une constante diélectrique adaptée au mélange grain/air. Dans tous les cas, il faudrait mesurer le volume des grains.
- Les cylindres ou les ellipsoïdes présentent une forte symétrie ce qui favorise les phénomènes de résonance. L'erreur commise est inconnue et devrait être précisée par des travaux complémentaires.

Toutefois, les épis semblent ne pas jouer un rôle fondamental en bande C, en tous cas, moins que les tiges étant données les biomasses compartimentées (figure 4.5).

4.2.2 Description du modèle WheatBorn

Modélisation cohérente

Dans le cas des milieux forestiers, les approches radiative et cohérente se sont révélées à peu près équivalentes, mis à part quand le tronc contribue à la rétrodiffusion comme en bande L (voir section 3.3). En revanche, l'approche radiative s'avère inadaptée à la modélisation des couverts agricoles pour deux raisons principales. Premièrement, les effets cohérents sont dans ce cas significatifs car les diffuseurs sont proches les uns des autres², ou peuvent être positionnés de façon régulière (en rangée par exemple). La deuxième raison vient de l'extension des diffuseurs, comme pour les troncs dans le milieu forestier. Les tiges s'étendent sur toute la hauteur du couvert, et ne sont donc pas illuminées par une onde uniforme. Le même problème se pose pour les feuilles, surtout au premier stade de développement.

Le problème de l'extension des diffuseurs est abordé en détail dans [Stiles and Sarabandi, 2000]. Il est brièvement rappelé ici.

Sous l'approximation de Born modifiée, le champ diffusé dans la direction \vec{k}_s par N diffu-

²Dans le cas du blé, une densité de 500 tiges/m² signifie que chaque tige occupe en moyenne un carré de 4.5cm×4.5cm, dimension proche de la longueur d'onde (5.6cm).



FIG. 4.8 – Epi de blé et épi modélisé par un cylindre à base circulaire.

seurs est donné par :

$$\bar{\mathbf{E}}_s(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N \frac{e^{ik_s r_i}}{r_i} \bar{\mathbf{S}}_i \cdot \bar{\mathbf{E}}_{eff}(\vec{r}_i) \quad (4.2)$$

où $\bar{\mathbf{S}}_i$ est la matrice de diffusion du i -ème diffuseur, $\bar{\mathbf{E}}_{eff}$ est le champ effectif, et \vec{r}_i est la position du i -ème diffuseur.

On voit clairement apparaître dans cette équation le problème des grands diffuseurs : prendre le champ effectif en \vec{r}_i , position du diffuseur, n'a de sens que si l'amplitude du champ effectif est uniforme sur tout le diffuseur, car la matrice de diffusion exprime la diffusion lorsque le diffuseur est éclairé par une onde plane, donc d'amplitude uniforme. Plus formellement, l'équa-

tion (4.2) s'applique pour les diffuseurs dont la dimension caractéristique D dans la direction de propagation de l'onde vérifie :

$$\frac{d |\vec{\mathbf{E}}_{eff}|}{ds} D \ll 1 \quad (4.3)$$

Sous l'hypothèse de Foldy-Lax, le champ effectif est directement relié à l'atténuation. Cette relation devient : $\beta D \ll 1$ où β est l'atténuation en Nepper par mètre.

Pour résoudre cette difficulté, Stiles and Sarabandi [2000] propose de découper les longs diffuseurs en petits diffuseurs élémentaires. Ceci revient à se placer dans le cadre de l'optique physique. Dans le cas des cylindres, cette hypothèse est équivalente à l'approximation du cylindre fini 2.2.2. Ainsi l'équation (4.2) peut être appliquée sans modification aux diffuseurs élémentaires.

Le modèle WheatBorn

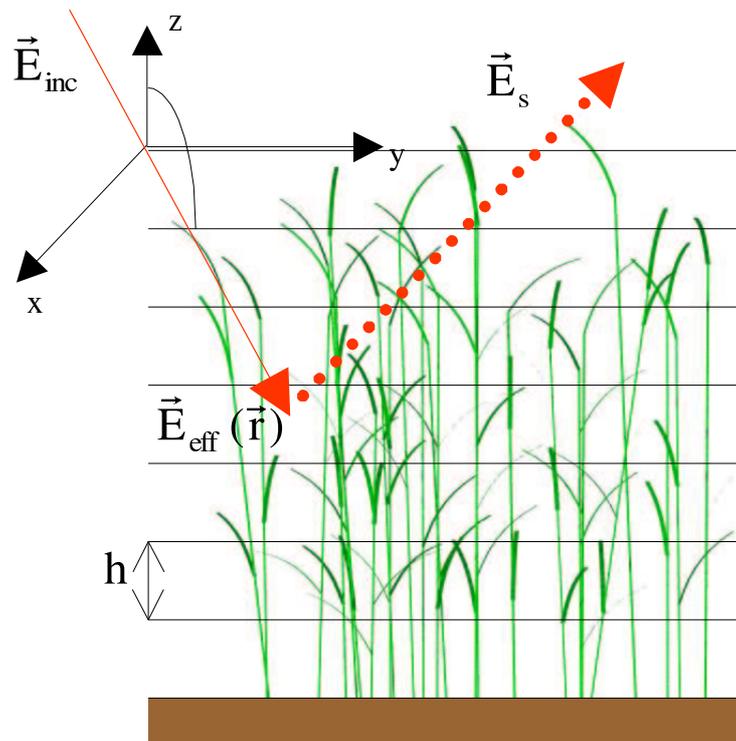


FIG. 4.9 – Schéma du milieu modélisé par le modèle WheatBorn.

La figure 4.9 présente le milieu modélisé. Pour calculer l'atténuation, le milieu est découpé en couches horizontales de hauteur h . Dans chaque couche, l'atténuation est calculée sous l'approxi-

mation de Foldy-Lax. En supposant de plus que le milieu est à symétrie azimutale, l'atténuation est donnée par :

$$\beta_p = \frac{2\pi}{k_0} \text{Im}(\langle S_{pp} \rangle) \quad p = h, v \quad (4.4)$$

La hauteur h est choisie, en pratique, pour que le nombre de diffuseurs dans chaque couche soit suffisant pour calculer la moyenne des matrices de diffusion et pour prendre en compte correctement l'hétérogénéité verticale du milieu. L'hétérogénéité horizontale n'est pas prise en compte.

Le coefficient de rétrodiffusion est calculé par la méthode de Monte-Carlo. Des scènes sont générées aléatoirement en respectant les distributions de paramètres et la distribution de position des tiges. La distribution des tiges permet de modéliser les rangées :

- Dans la direction des rangées la distribution est uniforme.
- Dans la direction perpendiculaire, la distribution est une gaussienne répétée périodiquement.

Ces distributions sont modifiées pour assurer un volume d'exclusion autour de chaque tige, mais l'effet est minime avec le modèle cohérent puisque le champ proche n'est pas pris en compte. La figure 4.10 montre une plantation typique (stade de croissance : maturation, 24 mai à Matera).

Le coefficient de rétrodiffusion du couvert est obtenu en moyennant les champs rétrodiffusés par chaque scène. La rétrodiffusion du sol est calculée par le modèle Integral Equation Model (IEM [Fung, 1994]) et en tenant compte de l'atténuation subie par l'onde pour traverser le milieu.

4.3 Modèle d'ordre supérieur MUSCAT

Le modèle MUSCAT (*MUltiple SCattering for WheAT modelling*) est un modèle cohérent d'ordre supérieur. Il prend en compte les interactions électromagnétiques entre des cylindres sans limitation sur les mécanismes et sans contrainte sur la distance entre les cylindres ou la densité du milieu. Le développement théorique de la méthode ne nécessite qu'une approximation, l'approximation des cylindres finis, bien vérifiée dans le cas des couverts de blé. Cette méthode est donc proche des méthodes "exactes". Mais, l'implémentation numérique pose de nombreuses difficultés qui limitent "l'exactitude" du calcul. Par ailleurs, la simplicité du milieu modélisé fait que ce modèle n'est pas à proprement parler un modèle de couvert de blé.

Dans la suite, les bases théoriques du modèle sont présentées dans les deux premières sections. Puis, dans les deux sections suivantes, l'implémentation numérique est décrite en détail.



FIG. 4.10 – Plantation de blé vue par le modèle WheatBorn.

Enfin, la dernière section présente la dérivation de l'atténuation et du coefficient de rétrodiffusion ainsi qu'une première validation.

4.3.1 Présentation du problème

Le milieu est composé de L cylindres diélectriques parfaitement verticaux disposés sur une surface d'aire A (figure 4.11). Pour des raisons pratiques d'optimisation, tous les cylindres ont la même constante diélectrique ϵ_r et le même rayon a . Par contre, la longueur d_j et la position \vec{r}_j sont données pour chaque cylindre.

Le problème consiste à calculer la diffusion de cette scène en tenant compte des interactions entre les cylindres. Ce problème se décompose en plusieurs étapes décrites précisément dans la suite :

- Expression de l'équation de diffusions multiples de Foldy-Lax dans la géométrie de la scène.
- Discrétisation du système d'équations.
- Résolution du système d'équations.

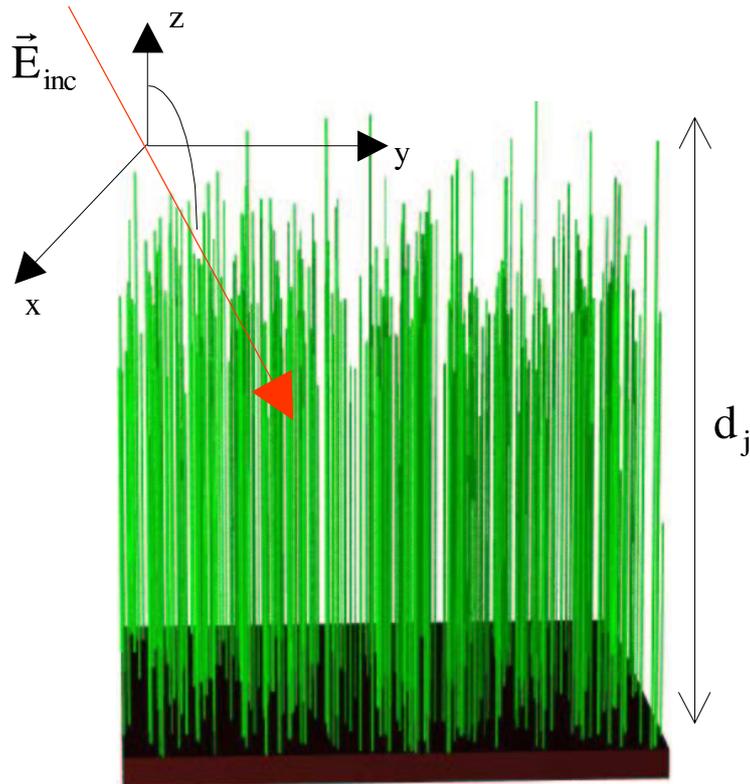


FIG. 4.11 – Couvert de blé vu par le modèle MUSCAT.

- Calcul du champ diffusé.
- Moyenne d'un certain nombre de réalisations pour déduire le coefficient de rétrodiffusion. En pratique, ce nombre est seulement de quelques dizaines.

4.3.2 L'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax

L'équation de diffusions multiples de Foldy-Lax est décrite à la section 1.2.4. C'est une équation générale qui régit le champ diffusé par L diffuseurs illuminés par une onde incidente. Elle s'écrit formellement :

$$\bar{\mathbf{E}} = \bar{\mathbf{E}}_{inc} + \sum_{j=1}^L \bar{\mathbf{E}}_j \quad (4.5)$$

$$\bar{\mathbf{E}}_j = T_j \bar{\mathbf{E}} \quad (4.6)$$

Le champ qui excite le j -ième diffuseur est égal à la somme du champ incident et réfléchi et des champs diffusés par les $L-1$ autres diffuseurs. Pour chaque diffuseur, une équation constitutive

exprime le champ diffusé en fonction du champ d'excitation. Cette équation ne dépend que de la géométrie et des propriétés électromagnétiques du diffuseur.

Afin d'exprimer sous une forme analytique l'équation formelle (4.5), les champs inconnus doivent être développés sur une base de l'espace vectoriel tridimensionnel. La base des vecteurs cylindriques est la mieux appropriée aux symétries du problème. Les inconnues du problème sont les champs d'excitation, mais il est plus judicieux d'utiliser le champ interne du diffuseur comme inconnue car il est directement lié aux champs d'excitation par les conditions de continuité et lié aux champs diffusés par le principe d'Huygens. Le champ interne est développé sur la base des vecteurs cylindriques :

$$\bar{E}_{in}(\bar{r}) = \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dk'_z [c_{n'}^{(M)}(k'_z) Rg \bar{M}_{n'}(k'_{\rho\rho}, k'_z, \bar{r}) + c_{n'}^{(N)}(k'_z) Rg \bar{N}_{n'}(k'_{\rho\rho}, k'_z, \bar{r})] \quad (4.7)$$

Les vecteurs cylindriques $\bar{M}_{n'}(k'_{\rho\rho}, k'_z, \bar{r})$ et $\bar{N}_{n'}(k'_{\rho\rho}, k'_z, \bar{r})$ sont donnés dans [Tsang et al., 1995]. Le symbole *Rg*, pour "Régulier", dans l'équation signifie que dans l'expression qui suit, les fonctions de Hankel sont remplacées par les fonctions de Bessel (qui sont dites régulières car finies à l'origine). Ce développement ne fait apparaître que les parties régulières des vecteurs cylindriques car le champ interne doit être fini au centre du cylindre. Lorsque r tend vers l'infini, les vecteurs \bar{M} correspondent à la polarisation horizontale, et les vecteurs \bar{N} à la polarisation verticale.

Les coefficients $c_{n'}^{(M)}(k'_z)$ and $c_{n'}^{(N)}(k'_z)$ sont les inconnues du problème et sont régis par l'équation de diffusion multiple de Foldy-Lax qui s'écrit :

$$\bar{\bar{A}}_n(k_{o\rho}, k_z, k_{\rho\rho}, k_z) \cdot \bar{C}_n(k_z)^{(l)} = \quad (4.8a)$$

$$- \frac{i^n e^{in\phi_i}}{k_{i\rho}} [e^{i\bar{K}_i \cdot \bar{r}_l} \bar{\mathcal{E}}_i \delta(k_z + k_{iz}) + e^{i\bar{k}_i \cdot \bar{r}_l + 2jk_{iz}d} \bar{\bar{\mathcal{F}}}(k_{iz}) \cdot \bar{\mathcal{E}}_i \delta(k_z - k_{iz})] \quad (4.8b)$$

$$- \sum_{j=1, j \neq l}^L \left(\frac{d_j}{2\pi}\right) \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} T_{n-n'}(k_{o\rho}, k_z, \bar{r}_j - \bar{r}_l) \int_{-\infty}^{+\infty} dk'_z \text{sinc}\left[(k'_z - k_z) \frac{d_j}{2}\right] \cdot Rg \bar{\bar{A}}_{n'}(k_{o\rho}, k_z, k'_{\rho\rho}, k'_z) \cdot \bar{C}_{n'}^{(j)}(k'_z) \quad (4.8c)$$

$$- [U(k_z) - U(k_z - k_0)] \sum_{j=1, j \neq l}^L \left(\frac{d_j}{2\pi}\right) \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} Rg T_{n-n'}(k_{o\rho}, k_z, \bar{r}_j - \bar{r}_l) \int_{-\infty}^{+\infty} dk'_z \text{sinc}\left[(k'_z + k_z) \frac{d_j}{2}\right] \cdot \bar{\bar{\mathcal{F}}}(k_z) Rg \bar{\bar{A}}_{n'}(k_{o\rho}, -k_z, k'_{\rho\rho}, k'_z) \cdot \bar{C}_{n'}^{(j)}(k'_z) \quad (4.8d)$$

où $n \in \mathbb{Z}$, $k_z \in \mathbb{R}$, $l = 1..L$, $\bar{c}(k_z) = \begin{bmatrix} c_{n'}^{(M)}(k_z) \\ c_{n'}^{(N)}(k_z) \end{bmatrix}$ sont les inconnues, $\bar{\mathcal{E}}_i = \begin{bmatrix} -iE_{hi} \\ E_{vi} \end{bmatrix}$ est le champ incident, $\bar{A}_n = \begin{bmatrix} A_n^{MM} & A_n^{MN} \\ A_n^{NM} & A_n^{NN} \end{bmatrix}$ sont les coefficients de couplage qui lie le champ d'excitation et le champ interne. Ils sont définis dans [Tsang et al., 1995].

La fonction de translation $T_{n-n'}(k_{o\rho}, k_z, \bar{r}_j - \bar{r}_l)$ s'écrit :

$$T_n(k_{o\rho}, k_z, \bar{r}) = H_n^{(1)}(k_{o\rho}\rho) \cdot e^{-in\phi_{\bar{r}}} e^{-ik_z z}$$

avec $\bar{r} = \rho\hat{\rho} + z\hat{z}$.

La matrice \bar{F} est la matrice de réflexion cohérente du sol. Pour une sol lisse c'est la matrice des coefficients de Fresnel. Pour une surface rugueuse, cette matrice est corrigée par le facteur de perte (voir la section 2.2.8)[Ishimaru, 1997, p480].

Interprétation qualitative de l'équation. L'équation (4.8) exprime que le champ total à la surface du cylindre est la somme des champs incidents et diffusés.

- Le terme de gauche est le champ total, ou champ d'excitation à la surface du cylindre j pour les ondes se propageant dans la direction \vec{k} et pour le mode de propagation n . Le champ d'excitation est directement relié au champ interne (les inconnues c) par les coefficients de couplage A .
- Le terme de droite se décompose en deux parties : l'onde directe (4.8b), et l'onde diffusée par les cylindres (4.8c) et (4.8d). Chacune de ces parties se décompose à nouveau en deux parties : l'onde directe, et l'onde provenant du sol.

Le terme (4.8b) est la somme de l'onde incidente, et l'onde incidente réfléchiée par le sol. Le terme (4.8c) exprime la diffusion des $L - 1$ cylindres, et se lit de droite à gauche. Le champ interne (les coefficients c) de chaque cylindre est transformé en onde diffusée par les coefficient de couplage RgA pour chaque direction \vec{k}' et chaque mode n' de propagation. L'onde diffusée centrée sur le cylindre j est translatée par la fonction de translation T . L'onde résultante est centrée sur le cylindre l et se propage dans la direction $veck$ pour le mode n . Le terme (4.8d) est similaire au terme précédent, mais l'onde diffusée est réfléchiée par le sol (matrice F) avant d'être translatée vers le cylindre l . Ce terme est nul pour les ondes se propageant vers le bas car les ondes réfléchies se propagent seulement vers le haut (terme $[U(k_z) - U(k_z - k_0)]$).

Le champ diffusé. Lorsque le système est résolu, le champ diffusé à l'infini dans la direction (θ_s, ϕ_s) est donné par :

$$\begin{aligned}
\bar{E}_s(\bar{r}) = & \frac{e^{ikr}}{r} \sin \theta_s \sum_{j=1, j \neq l}^L \frac{ik_0 d_j}{\pi} e^{-i\bar{k}_s \cdot \bar{r}_j} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-i)^n e^{in\phi_s} \\
& \left[\int_{-\infty}^{+\infty} dk'_z \text{sinc}\left[\left(k'_z - k_{sz}\right) \frac{d_j}{2}\right] \bar{\mathcal{P}}_s^T \text{Rg} \bar{\mathcal{A}}(k_{s\rho}, k_{sz}, k'_{p\rho}, k'_z) \bar{\mathcal{C}}_n^{(j)}(k'_z) \right. \\
& \left. + \int_{-\infty}^{+\infty} dk'_z e^{i2k_s(z_j+d)} \text{sinc}\left[\left(k'_z + k_{sz}\right) \frac{d_j}{2}\right] \bar{\mathcal{P}}_s^T \bar{\mathcal{F}}(k_{sz}) \text{Rg} \bar{\mathcal{A}}(k_{s\rho}, -k_{sz}, k'_{p\rho}, k'_z) \bar{\mathcal{C}}_n^{(j)}(k'_z) \right]
\end{aligned} \tag{4.9}$$

où

$$\bar{\mathcal{P}}_s^T = \begin{bmatrix} -i\hat{h}_s & -\hat{v}_s \end{bmatrix}$$

4.3.3 Discrétisation. Système linéaire fini

Le système d'équation (4.8) ne peut être résolu analytiquement et doit donc être transformé en une forme adaptée à une résolution numérique, c'est à dire en un système linéaire de dimension finie.

Deux transformations sont nécessaires :

1. Troncature des séries en n et n' .
2. Transformation des intégrales en sommes discrètes par quadrature.

Le nombre d'inconnues du système final dépend de l'optimisation de ces transformations.

Les séries en n' dans (4.8) et en n dans (4.9) sont tronquées à l'ordre N . N est choisi tel que les modes supérieurs à N soient négligeables devant les modes inférieurs. L'amplitude des modes dépend essentiellement de l'amplitude des fonctions de Bessel et Hankel qui apparaissent dans les coefficients de couplage, et dans la fonction de translation. L'amplitude de $B_n(x)$ et $H_n(x)$ devient négligeable lorsque n est grand devant x , c'est à dire, dans notre cas, lorsque n est grand devant $k_p a$. Dans le cas du blé $k_p a$ est inférieur à 1, donc $N = 1$ est une limite suffisante.

La discrétisation des intégrales se fait en deux étapes :

1. réduction de l'intervalle d'intégration à un intervalle fini. Les ondes qui se propagent avec $|k_z| > k_0$ sont des ondes évanescentes et donc négligées.
2. discrétisation des intégrales par une quadrature adaptée à l'intégrande avec pour contrainte que la quadrature, c'est à dire l'échantillonnage, soit la même pour toutes les intégrales. Cette contrainte assure que le nombre d'inconnues soit le même que le nombre d'équations. L'intégrande est le produit d'une fonction piquée, le sinus cardinal, et une fonction régulière. Les quadratures adaptées aux fonctions piquées consistent à échantillonner plus précisément autour du pic de l'intégrande. Mais comme la position du pic dépend de k_z ,

l'échantillonnage devrait dépendre de k_z , ce qui est incompatible avec notre contrainte. Un échantillonnage uniforme angulaire a donc été retenu :

$$\theta^{(m)} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\Delta\theta \quad (4.10)$$

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{2M} \quad (4.11)$$

$$k_z^{(m)} = k_0 \cos(\theta^{(m)}) \quad (4.12)$$

où $2M$ est le nombre d'échantillons. Le choix de $2M$, c'est à dire $\Delta\theta$ dépend de l'ouverture angulaire des sinus cardinaux. Cette ouverture est principalement fonction de la longueur des cylindres et de la longueur d'onde. Dans la cas du blé, les tiges font moins de un mètre, la largeur des pics est donc supérieure à 1.6° en bande C. On choisit $\Delta\theta = 1^\circ$.

L'équation de diffusions multiples de Foldy-Lax est transformée en un système d'équations linéaires avec $m = 0..2M - 1$, $n = -N..N$ et $l = 1..L$

$$\begin{aligned} \overline{\overline{\mathcal{A}}}_n(k_{o\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}, k_{p\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}) \cdot \overline{\overline{\mathcal{C}}}_n^{(l)(m)} = & \quad (4.13) \\ - \frac{i^n e^{in\phi_i}}{k_{i\rho}} [e^{i\bar{K}_i \cdot \bar{r}_l} \overline{\overline{\mathcal{E}}}_i \frac{\delta_{mm_i}}{\Delta\theta} + e^{i\bar{k}_i \cdot \bar{r}_l + 2jk_{iz}d} \overline{\overline{\mathcal{F}}}(k_{iz}) \cdot \overline{\overline{\mathcal{E}}}_i \frac{\delta_{m(2M-1-m_i)}}{\Delta\theta}] \\ - \sum_{j=1, j \neq l}^L \left(\frac{d_j}{2\pi}\right) \sum_{n'=-N}^{+N} T_{n-n'}(k_{o\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}, \bar{r}_j - \bar{r}_l) \\ k_0 \Delta\theta \sum_{m'=0}^{2M-1} \sin \theta^{(m')} \text{sinc}[(k_z^{(m')} - k_z^{(m)}) \frac{d_j}{2}] \cdot \text{Rg} \overline{\overline{\mathcal{A}}}_{n'}(k_{o\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}, k_{p\rho}^{(m')}, k_z^{(m')}) \cdot \overline{\overline{\mathcal{C}}}_{n'}^{(j)(m')} \\ - \sum_{j=1, j \neq l}^L \left(\frac{d_j}{2\pi}\right) \sum_{n'=-N}^N \text{Rg} T_{n-n'}(k_{o\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}, \bar{r}_j - \bar{r}_l) \\ k_0 \Delta\theta \sum_{m'=0}^M \sin \theta^{(m')} \text{sinc}[(k_z^{(m')} + k_z^{(m)}) \frac{d_j}{2}] \cdot \overline{\overline{\mathcal{F}}}(k_z^{(m)}) \text{Rg} \overline{\overline{\mathcal{A}}}_{n'}(k_{o\rho}^{(m)}, -k_z^{(m)}, k_{p\rho}^{(m')}, k_z^{(m')}) \cdot \overline{\overline{\mathcal{C}}}_{n'}^{(j)(m')} \end{aligned}$$

où $\overline{\overline{\mathcal{C}}}_n^{(l)(m)}$ sont les inconnues, $k_{o\rho}^{(m)} = k_0 \sin(\theta^{(m)})$, $k_{p\rho}^{(m)} = k_0 \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta^{(m)})}$ et $k_z^{(m)} = k_0 \cos(\theta^{(m)})$.

Le système peut être écrit sous forme matricielle :

$$\overline{\overline{\mathbf{A}}} \overline{\overline{\mathbf{C}}} = \overline{\overline{\mathbf{E}}}_i + \overline{\overline{\mathbf{S}}} \overline{\overline{\mathbf{C}}} \quad (4.14)$$

Le vecteur $\bar{\mathbf{C}}$ contient dans la première moitié les coefficients $c^{(M)}$ et dans la deuxième les coefficients $c^{(N)}$. L'ordre de variation des indices, du plus rapide au plus lent est le suivant : l, n, m . C'est un choix qui n'a aucune incidence sur la méthode de résolution. La matrice $\bar{\bar{\mathbf{A}}}$ contient les coefficients de couplage $\bar{\bar{\mathbf{A}}}_n(k_{o\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}, k_{p\rho}^{(m)}, k_z^{(m)})$. Elle est constituée de quatre blocs (MM) , (MN) , (NM) , (NN) . Chaque bloc est diagonal. Les éléments de la matrice sont donnés par :

$$A_{(p,m,n,j),(q,m',n',l)} = A_n^{(pq)}(k_{o\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}, k_{p\rho}^{(m)}, k_z^{(m)})\delta_{nn'}\delta_{mm'} \quad (4.15)$$

où $p = M$ ou N , $q = M$ ou N , $m = 0, \dots, 2M - 1$, $n = -N, \dots, N$ et $l = 1, \dots, L$.

La matrice $\bar{\bar{\mathbf{S}}}$ contient les termes de diffusion. Elle est découpée en quatre blocs (MM) , (MN) , (NM) , (NN) , eux même découpés en $2M$ blocs ($m = 0, \dots, 2M - 1$), eux-même découpés en $2N+1$ blocs ($n = -N, \dots, N$). Cette matrice est dense et non-symétrique.

Le vecteur $\bar{\mathbf{E}}_i$ contient les champs incidents et réfléchis et ne dépend donc que de la configuration radar et du coefficient de réflexion du sol.

Pour améliorer le conditionnement du système, il est préférable de résoudre le système équivalent suivant :

$$(\bar{\mathbf{I}} - \bar{\bar{\mathbf{A}}}^{-1}\bar{\bar{\mathbf{S}}})\bar{\mathbf{C}} = \bar{\bar{\mathbf{A}}}^{-1}\bar{\mathbf{E}}_i \quad (4.16)$$

où $\bar{\mathbf{I}}$ est la matrice unité. L'inversion de la matrice $\bar{\bar{\mathbf{A}}}$ ne pose aucun problème.

4.3.4 Résolution numérique.

La résolution du système est le point critique du modèle car le nombre d'inconnues est considérable. Le nombre d'inconnues $N_{inconnues}$ est donné par :

$$N_{inconnues} = 2 \cdot L \cdot (2N - 1) \cdot 2M \quad (4.17)$$

Sur une scène de $0.5m^2$, c'est à dire un carré de $14\lambda \times 14\lambda$, il y a jusqu'à 600 cylindres. Avec $N = 1$ et $2M = 180$, la dimension du système est de 648000 inconnues. Pour donner un ordre de grandeur, le stockage en mémoire d'un tel système requiert 7000 Go, et sa résolution par la méthode directe de Gauss prendrait de nombreux jours. Sachant de plus que pour évaluer un coefficient de rétrodiffusion, il faut plusieurs dizaines de résolutions, la méthode est irréaliste avec les moyens informatiques actuels.

La résolution approchée par une méthode itérative est plus réaliste. Les méthodes itératives ont été développées à l'origine pour résoudre les systèmes creux. En effet, avec ces méthodes, il

n'est pas nécessaire de stocker en mémoire le système, et la structure particulière du système peut conduire à des optimisations très importantes. Dans notre cas, même si le système est dense, ces deux propriétés restent des atouts. Par ailleurs, une solution approchée est suffisante pour l'application à la télédétection. En effet, la précision des mesures de coefficients de rétrodiffusion³ est limitée, de l'ordre de $\pm 0.5\text{dB}$ soit environ $\pm 12\%$.

Le principe des méthodes itératives est représenté figure 4.12.

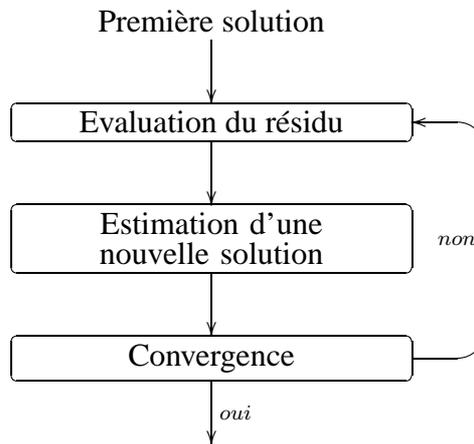


FIG. 4.12 – Principe l'inversion d'une matrice par méthode itération.

Ces méthodes diffèrent principalement par la façon d'estimer la nouvelle solution. Par contre, elles ont toutes en commun une étape d'évaluation du résidu qui requiert le produit du système (de la matrice ou de la transposée de la matrice du système) par un vecteur quelconque. La performance des méthodes dépend donc de la performance du produit matrice-vecteur et du nombre de produits pour atteindre la convergence, c'est à dire, la performance de l'estimation de la nouvelle solution.

Dans la section suivante, l'optimisation du produit matrice-vecteur est présentée en détail car elle est basée sur des principes physiques. Le choix de la méthode itérative est décrit dans la deuxième section.

Optimisation physique du produit matrice vecteur.

L'étape élémentaire des méthodes itératives utilisées pour résoudre le système 4.16 est le produit $\bar{\bar{S}} \bar{x}$ où \bar{x} est un vecteur quelconque (donc sans propriétés physiques exploitables pour l'optimisation). La forme particulière de la matrice $\bar{\bar{S}}$ permet de conduire le produit en deux étapes :

³précision due au capteur, mais aussi et surtout due à l'estimation du coefficient de rétrodiffusion

1. Calcul de la somme sur m' indépendante de n et l pour tous les m (voir équations (4.13)).
2. Calcul des sommes sur n' et j pour tous les m, n .

Ceci revient à écrire :

$$\bar{\bar{S}} = \bar{\bar{S}}_p \cdot \bar{\bar{S}}_d \quad (4.18)$$

où $\bar{\bar{S}}_t$ est une matrice bloc diagonale et $\bar{\bar{S}}_d$ est multi-diagonale. Le nombre de multiplications élémentaires passe donc de $N_{inconnues}^2$ à $N_{inconnues} + N_{inconnues} \cdot L \cdot (2N - 1)$ soit un gain d'un facteur de l'ordre de $2M = 180$.

Cette réduction en deux étapes est possible parce que la réponse d'un cylindre à un champ d'excitation est indépendante des autres cylindres. C'est le principe physique même de l'équation de diffusions multiples de Foldy-Lax. La première étape consiste à calculer en fonction des champs internes (\bar{x} donné), les champs diffusés par les cylindres (matrice de diffusion $\bar{\bar{S}}_d$). La deuxième étape consiste à propager le champ diffusé par chaque cylindre vers la surface des autres cylindres (matrice de propagation $\bar{\bar{S}}_p$). Voir le schéma de gauche, figure 4.13.

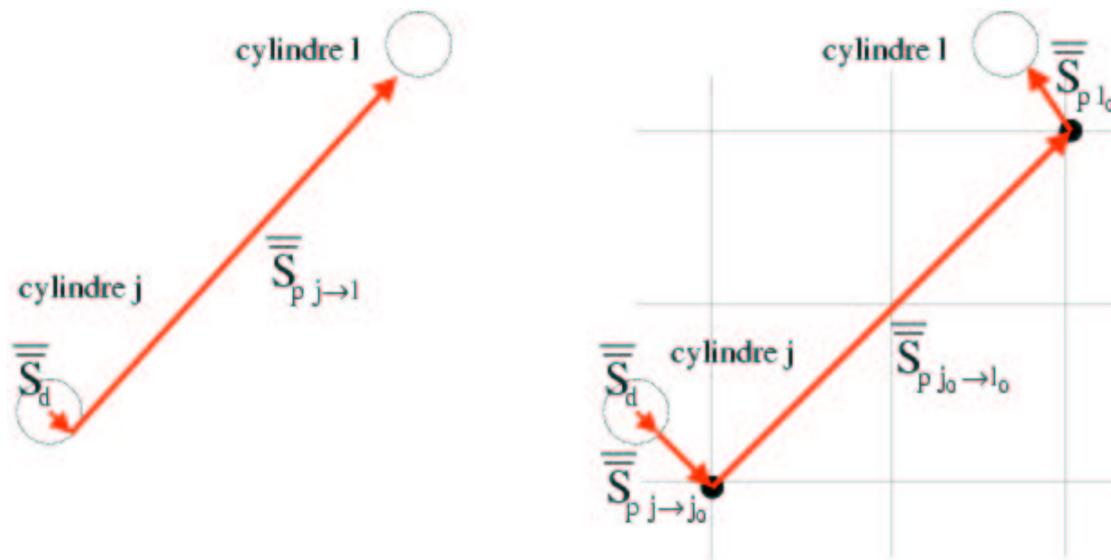


FIG. 4.13 – Principe schématique de la décomposition en deux étapes de la multiplication matrice-vecteur (à gauche). Principe de la méthode SMCG (à droite).

Le produit par matrice de propagation est l'étape la plus coûteuse. Mais, cette matrice a une propriété exploitable : l'invariance par translation. En effet, dans un milieu homogène comme le vide, la propagation d'une onde dépend de la position relative des points de départ et d'arrivée, et non de la position absolue de chacun de ces points. Autrement dit, la fonction de translation T ne dépend que de la position relative $\bar{r}_j - \bar{r}_l$ des cylindres. Dans le cas où les positions \bar{r}_l et \bar{r}_j sont

régulièrement espacées sur une grille, la sommation sur j pour tous les l devient une convolution bidimensionnelle calculable par *Fast Fourier Transform* (FFT). Cependant, une disposition régulière des tiges n'est pas adéquate avec la description d'un milieu naturel comme le blé. Pour résoudre cette difficulté, on utilise la propriété d'additivité de la translation, c'est à dire que la propagation d'une onde peut être décomposée en plusieurs propagations.

On considère une grille bidimensionnelle régulière sur la scène. La propagation de l'onde du cylindre j vers le cylindre l est décomposée comme suit :

1. Propagation du cylindre j vers le point j_o le plus proche sur la grille.
2. Propagation du point j_o vers le point l_o de la grille le plus proche du cylindre l .
3. Propagation du point l_o vers le cylindre l .

Voir le schéma de droite, figure 4.13. Cette méthode *Sparse Matrix Canonical Grid* (SMCG) a été développée à l'origine pour calculer la diffusion des surfaces rugueuses par la méthode des moments. Tsang et al. [2000] l'ont adaptée pour résoudre la diffusion des cylindres dans le cas bidimensionnel (cylindres infinis et incidence à 90 degrés). Les développements de Tsang et al. [2000] sont directement exploitables dans le cas tridimensionnel.

En pratique, cette décomposition en plusieurs translations n'est pas assez précise pour les propagations à courte distance. Il est donc nécessaire de décomposer la matrice de propagation $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_p$ en une matrice *forte* $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pF}$ pour les propagations entre cylindres voisins, et une matrice *faible* $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf}$ pour les autres propagations.

$$\overline{\overline{\mathbf{S}}}_p = \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pF} + \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf} \quad (4.19)$$

Les termes *forte* et *faible* viennent de la méthode des moments et signifient interactions fortes (entre proches voisins) et interactions faibles. Le produit par la matrice *forte* est réalisé directement. Le produit par la matrice *faible* est décomposé selon les trois étapes décrites ci-dessus :

$$\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf} = \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{grille} \rightarrow \text{cylindre})} \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{grille} \rightarrow \text{grille})} \overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{cylindre} \rightarrow \text{grille})} \quad (4.20)$$

Les matrices $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{cylindre} \rightarrow \text{grille})}$ et $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{grille} \rightarrow \text{cylindre})}$ sont respectivement les matrices de pré-multiplication et post-multiplication. Elles sont diagonales.

La matrice $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{grille} \rightarrow \text{grille})}$ est une matrice de convolution circulaire. C'est une matrice Toeplitz par bloc, et chaque bloc est Toeplitz. De plus, on peut noter que la fonction de translation fait apparaître non seulement les positions relatives entre cylindres, mais aussi les modes de propagation relatifs $n - n'$. Cette fonction est donc un noyau de convolution tridimensionnel (deux dimension pour les positions et une dimension pour les modes). Le produit par la matrice $\overline{\overline{\mathbf{S}}}_{pf(\text{grille} \rightarrow \text{grille})}$ se réalise donc par une FFT 3D. Le détail est donnée dans [Tsang et al., 2000].

La figure 4.14 donne une vue d'ensemble du produit $\overline{\overline{\mathbf{S}}} \overline{\mathbf{x}}$.

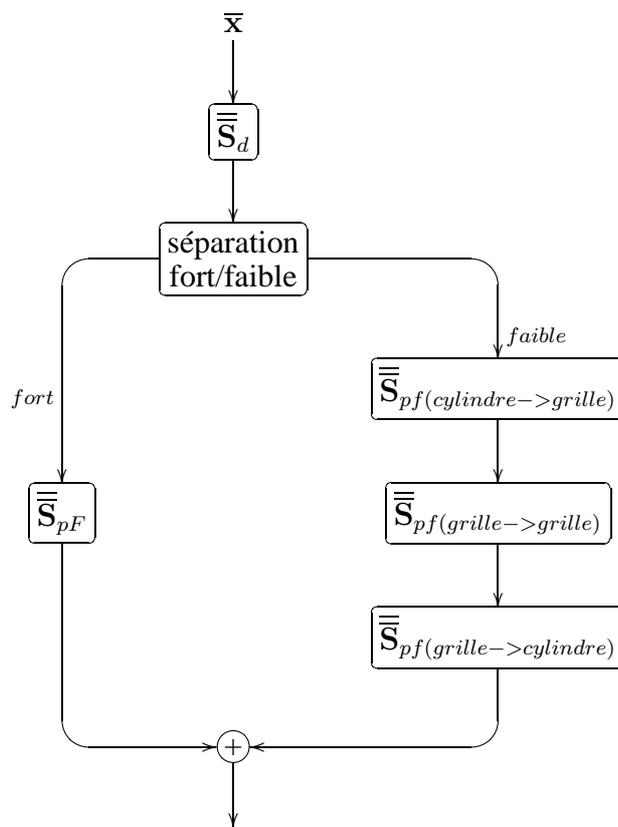


FIG. 4.14 – Multiplication matrice/vecteur avec la méthode SMCG.

Les paramètres de réglage de l'algorithme sont la taille de la grille, et la taille du voisinage pour la séparation en interactions fortes et faibles. Ces paramètres sont ajustés pour assurer une bonne précision du produit et une bonne vitesse d'exécution. Cet ajustement dépend de l'implémentation de l'algorithme et des spécificités de l'ordinateur.

La figure 4.15 montre le temps d'exécution d'un produit matrice-vecteur avec et sans la méthode SMCG.

Méthodes itératives.

Pour résoudre le système d'équation (4.13) deux types de méthodes itératives ont été étudiées. Le premier type est basé sur les mécanismes physiques d'interaction, et le deuxième type est basé sur des méthodes purement mathématiques.

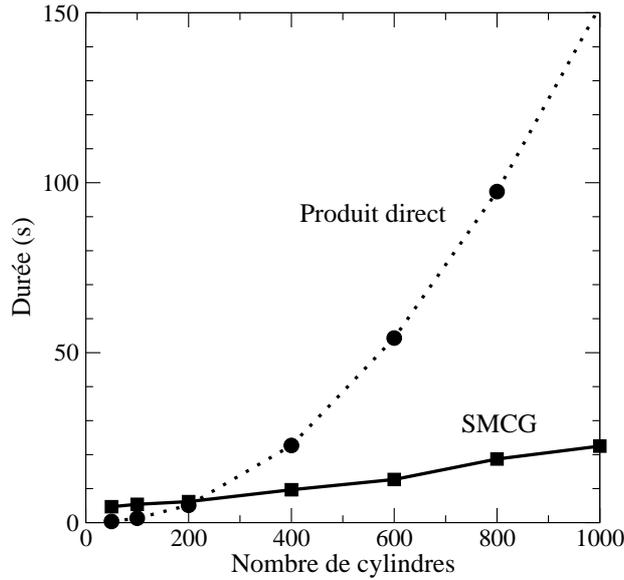


FIG. 4.15 – Comparaison du temps d'exécution entre la méthode directe et la méthode *Sparse Matrix Canonical Grid*

Méthode physique de résolution. Dans le papier de Tsang et al. [Tsang et al., 1995] le système d'équations est résolu par itérations jusqu'au second ordre. Écrite sous forme matricielle, la solution au premier ordre et au deuxième ordre est :

$$\overline{\mathbf{C}}^{(1)} = \overline{\mathbf{A}}^{-1} \overline{\mathbf{E}}_i \quad (4.21)$$

$$\overline{\mathbf{C}}^{(2)} = \overline{\mathbf{A}}^{-1} (\overline{\mathbf{E}}_i + \overline{\mathbf{S}} \overline{\mathbf{C}}^{(1)}) \quad (4.22)$$

En poursuivant les itérations, la solution à l'ordre n est :

$$\overline{\mathbf{C}}^{(n)} = \sum_{k=0}^{n-1} (\overline{\mathbf{A}}^{-1} \overline{\mathbf{S}})^k \overline{\mathbf{A}}^{-1} \overline{\mathbf{E}}_i \quad (4.23)$$

Cette approche est similaire au développement en série de Born et à la résolution itérative de l'équation du transfert radiatif 2.3.1. Elle conduit donc à une décomposition en mécanismes physiques d'interactions. La solution au premier ordre contient quatre mécanismes de diffusion simple avec le volume (voir la figure 2.12 page 60), la solution au second ordre contient les mécanismes de premier ordre et seize mécanismes de diffusion double, etc... Les mécanismes d'interaction volume et d'interaction volume-surface peuvent être séparés en décomposant $\overline{\mathbf{S}}$ et $\overline{\mathbf{E}}_i$ en somme de diffusion directe et de diffusion avec réflexion sur le sol.

Cette approche est séduisante, mais pose le problème de la convergence de la série (4.23). Pour que la série soit convergente, il faut que la norme du terme $\overline{\overline{\mathbf{A}}^{-1}\overline{\overline{\mathbf{S}}}}$ soit petite devant 1, c'est à dire que la diffusion soit faible. Autrement dit, comme dans le cas de la résolution itérative de l'équation du transfert radiatif, il faut que l'albédo soit faible. La figure 4.16 montre les tests de convergence en fonction de la densité de tiges pour un couvert de blé pleinement développé.

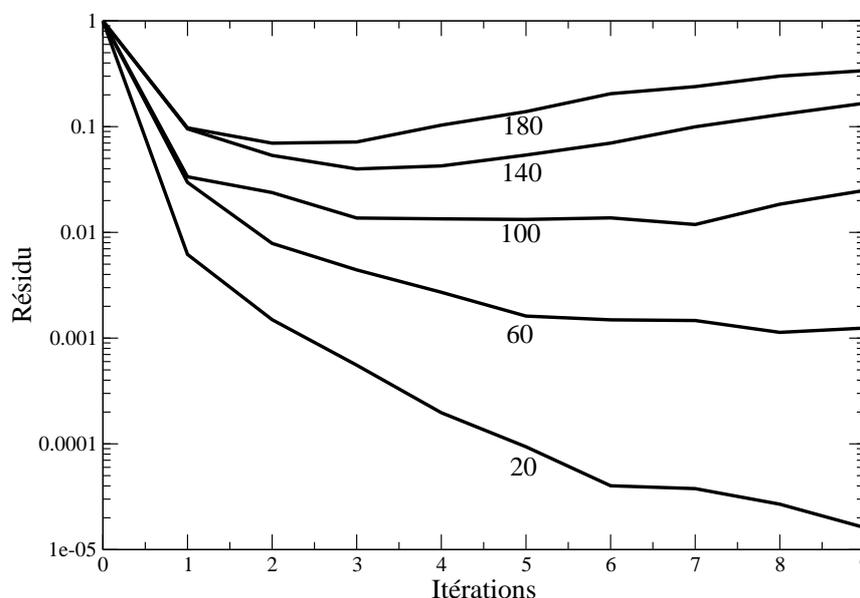


FIG. 4.16 – Convergence en fonction de la densité de cylindre

A partir de 100 cylindres/m², la série diverge. Dans notre cas, des méthodes d'inversion plus performantes doivent être envisagées.

Méthodes itératives “mathématiques”. L'approche physique décrite dans la section précédente est basée sur la méthode de Jacobi (nom donné en mathématique). C'est une méthode dite stationnaire ou de premier ordre [Saad, 2000]. Les méthodes non stationnaires, ou de second ordre sont plus performantes car elles adaptent le pas de convergence à chaque itération. Une première famille de méthodes est basée sur le Gradient Conjugué (CG) pour les matrices symétriques positives et est adaptée aux matrices générales : le Gradient Conjugué sur l'équation normale (CGNE), le Bi Gradient Conjugué (Bi-CG), le Bi Gradient Conjugué stabilisé (Bi-CGStab). Une autre famille de méthodes se base sur le *Minimum Residual* MINRES pour les matrices symétriques et s'étend aux matrices générales : le *Generalized Minimum Residual* (GMRES). Bi-CGStab et GMRES ont été retenues, car la matrice est non-symétrique et les méthodes CGNE et Bi-CG requièrent le produit de la transposée de la matrice par un vecteur (donc un coût d'implémentation non négligeable).

Le tableau 4.3 donne les caractéristiques des deux méthodes ainsi que leur performance pour résoudre notre problème.

	GMRES	BiCGStab
Avantage	Une seul produit par itération	Réputée performante pour les systèmes mal conditionnés
Inconvénient	Stockage des solutions intermédiaires, donc redémarrage nécessaire. Mauvaise stabilité dans certains cas.	Deux produits par itération
Nombre d'itérations	10	10
Nombre de produits	10	20
Temps d'exécution (s)	74	139

TAB. 4.3 – Comparaison entre la méthode GMRES et Bi-CGStab. Performance pour 200 cylindres sur 0.5m^2 .

Les méthodes GMRES et Bi-CGStab convergent avec le même nombre d'itérations, mais GMRES est plus rapide car elle requière un seul produit matrice-vecteur par itérations alors que Bi-CGStab en requière deux.

Les inconvénients de GMRES ne posent pas de réel problème dans notre cas :

- Le système est bien conditionné, la convergence est stable et comparable avec celle de Bi-CGStab.
- Le stockage des solutions intermédiaires est coûteux en mémoire ($N_{inconnues}$ nombres complexes par itérations), mais le nombre d'itérations reste limité, car la précision requise est faible.

4.3.5 Simulations

Calcul du coefficient de rétrodiffusion et de l'atténuation.

Les simulations consistent à calculer le coefficient de rétrodiffusion et/ou l'atténuation dans le couvert pour un jeu de paramètres donné. La méthode de Monte-Carlo est utilisée. Pour chaque réalisation, une scène est générée de la même façon que pour le modèle cohérent (cf section 4.2.2). Les positions des cylindres sont choisies aléatoirement selon une distribution donnée (distribution en rangée). Tous les autres paramètres restent constants. Le champ diffusé par chaque

scène est donné par :

$$\begin{aligned} \bar{E}_s(\bar{r}) = & \frac{e^{ikr}}{r} \sin \theta_s \sum_{j=1, j \neq l}^L \frac{ik_0 d_j}{\pi} e^{-i\bar{k}_s \cdot \bar{r}_j} \sum_{n=-N}^N (-i)^n e^{in\phi_s} k_0 \Delta\theta \\ & \left[\sum_{m=0}^{2M-1} \sin \theta^{(m)} \text{sinc} \left[(k_z^{(m)} - k_{sz}) \frac{d_j}{2} \right] \bar{\mathcal{P}}_s^T \text{Rg} \bar{\mathcal{A}}(k_{s\rho}, k_{sz}, k'_{p\rho}, k'_z) \bar{\mathcal{C}}_n^{(j)}(k'_z) \right. \\ & \left. + \sum_{m=0}^M \sin \theta^{(m)} e^{i2k_s(z_j+d)} \text{sinc} \left[(k_z^{(m)} + k_{sz}) \frac{d_j}{2} \right] \bar{\mathcal{P}}_s^T \bar{\mathcal{F}}(k_{sz}) \text{Rg} \bar{\mathcal{A}}(k_{s\rho}, -k_{sz}, k_{p\rho}^{(m)}, k_z^{(m)}) \bar{\mathcal{C}}_n^{(j)(m)} \right] \end{aligned} \quad (4.24)$$

avec $\bar{\mathcal{P}}_s^T = \begin{bmatrix} -i\hat{h}_s & -\hat{v}_s \end{bmatrix}$

Le coefficient de rétrodiffusion est calculé sur l'ensemble des réalisations par :

$$\sigma_{pq}^0(\theta_i) = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{4\pi r^2 \langle |E_{sq}|^2 \rangle - |\langle E_{sq} \rangle|^2}{|E_{ip}|^2 A} \quad (4.25)$$

où A est l'aire illuminée par le radar.

Le théorème optique ne peut pas s'appliquer pour dériver l'atténuation à travers le couvert [Tsang et al., 2000, p374]. Dans la dérivation du théorème optique, la plupart des auteurs supposent implicitement que $\langle \bar{\mathbf{S}}(\vec{k}_s, \vec{k}_i) \rangle$ est nulle dans toutes les directions (excepté pour $vec k_s = \vec{k}_i$), c'est à dire que la matrice de diffusion ne contient que l'information de diffusion incohérente. Mais lors du calcul de L diffuseurs, la matrice de diffusion peut aussi contenir une partie de diffusion cohérente.

L'atténuation σ^{ext} est calculée à partir de sa définition :

$$\begin{aligned} \sigma_p^{ext} &= \sigma_p^{abs} + \sigma_p^{diff} \\ \sigma_p^{diff} &= \int_{4\pi} d\Omega_s \sum_{q=h,v} \lim_{r_s \rightarrow \infty} \frac{r_s^2 \langle |E_{sq}(\bar{r}_s)|^2 \rangle - |\langle E_{sq}(\bar{r}_s) \rangle|^2}{|E_{ip}|^2 A} \end{aligned} \quad (4.26)$$

pour $p = h, v$.

L'absorption σ_p^{abs} est donnée par l'équation (36) dans Tsang et al. [1995].

Validation interne

D'une manière générale, deux étapes de validation peuvent être distinguées : Dans une première étape, la validation interne consiste à tester la cohérence du modèle avec lui même. Dans une deuxième étape, le modèle peut être comparé avec d'autres modèles ou avec les données, c'est la validation externe. Cette dernière étape sera abordée dans le chapitre 5 à propos de l'ana-

lyse des résultats de modélisation.

De nombreux tests sur le modèle MUSCAT ont été réalisés pour juger des erreurs commises par les diverses approximations ou limitations imposées par l'implémentation numérique. Voici quelques exemples : test sur les limites N et M , comparaison avec la solution au premier ordre, validation pour des milieux peu denses (grands nombres de cylindres, mais grand terrain), validation de la limite de convergence, vérification du principe du chemin inverse sur les polarisations HV et VH, vérification de la symétrie azimutale pour les milieux homogènes (mais avec des scènes carrées), etc. Tous ces tests sont positifs et ne sont pas détaillés.

Par contre, l'extension limitée de la scène modélisée est une source d'erreur importante. En principe, il faudrait modéliser une scène de même taille que la cellule de résolution pour une mesure SAR, ou que l'empreinte au sol de l'antenne pour une mesure par diffusiomètre, c'est à dire au moins quelques mètres. Mais les ressources informatiques ne permettent pas d'aller au delà de 2000 cylindres, soit une scène d'environ $2\text{m} \times 2\text{m}$ avec une densité de 500 cylindres/m². En pratique, il est même nécessaire de restreindre beaucoup plus le nombre de cylindres pour pouvoir estimer correctement le coefficient de rétrodiffusion (i.e. calculer un nombre suffisamment important de réalisations), sur l'ensemble des configurations et dates étudié.

Afin d'évaluer l'erreur commise, la sensibilité à la taille d'une scène carrée a été étudiée. La situation *a priori* la plus critique sur le site de Matera a été étudiée : le stade de croissance où le couvert est le plus développé et la polarisation verticale.

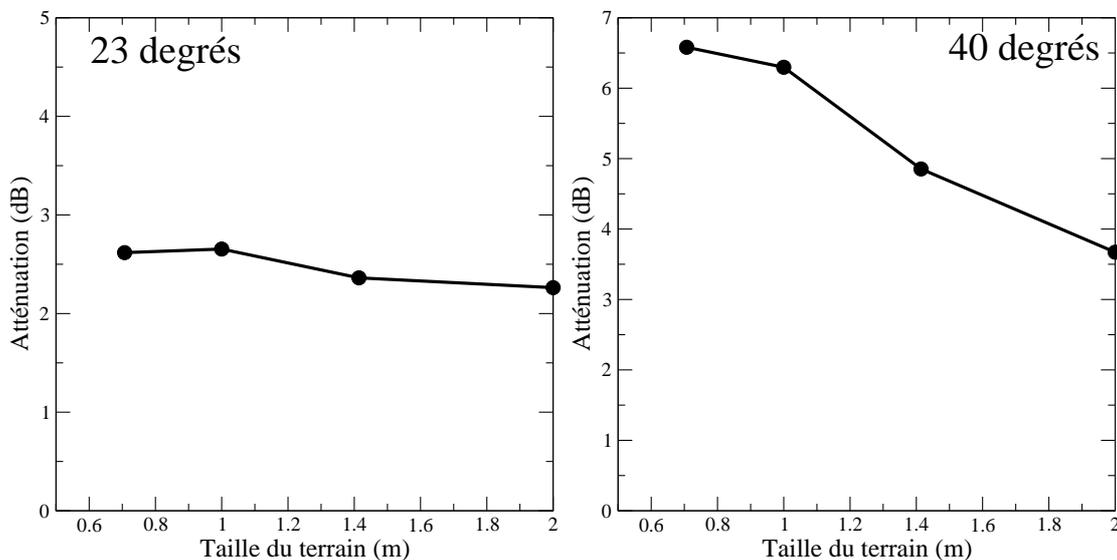


FIG. 4.17 – Variation de l'atténuation estimée en fonction du côté d'une scène carrée.

Les estimations de l'atténuation sont tracées figure 4.17 en fonction du côté de la scène. A faible incidence, l'atténuation varie d'environ 10%, ce qui, d'un point de vue expérimental, est

acceptable. Par contre à forte incidence, l'atténuation décroît sur une large gamme de 6.6dB à 3.6dB et la tendance n'évoque pas une stabilisation pour les grandes scènes. Pourtant, dans la suite, les résultats de modèle à 40° sont analysés car l'objectif initial du modèle MUSCAT est de mettre en évidence les effets de diffusions multiples sur l'atténuation et la rétrodiffusion. Or sur les petites scènes, ces effets sont sous-estimés par rapport à la réalité. Autrement dit, les limitations imposées par les ressources informatiques font du modèle MUSCAT (à 40° d'angle d'incidence en polarisation verticale), un modèle intermédiaire entre un modèle de premier ordre et un modèle exact.

Les estimations du coefficient de rétrodiffusion sont présentées figure 4.18. Les mécanismes de rétrodiffusion directe du sol et la rétrodiffusion du couvert (incluant les interactions cohérentes sol-couvert) sont séparées. Les résultats sont similaires au cas de l'atténuation. A faible

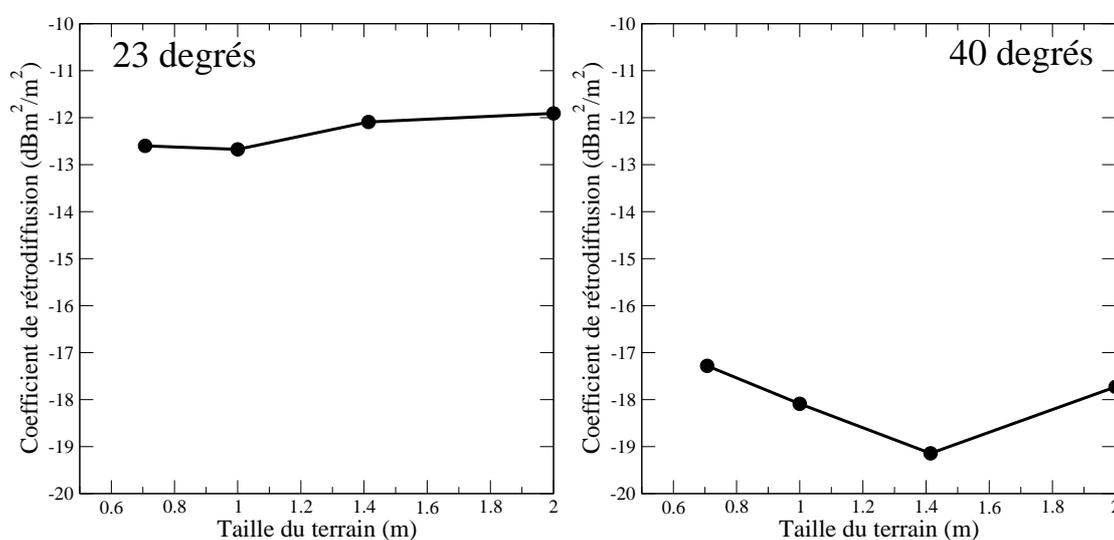


FIG. 4.18 – Variation du coefficient de rétrodiffusion estimé en fonction du côté d'une scène carrée.

incidence, le coefficient de rétrodiffusion est stable. La rétrodiffusion vient principalement du sol et est donc directement liée à l'atténuation estimée ci-dessus. A forte incidence, le coefficient de rétrodiffusion total varie d'environ 2dB, ce qui est relativement acceptable.

Les simulations du chapitre 5 sur l'analyse des résultats ont été réalisées sur des scènes de 0.7m×0.7m.

A cette erreur systématique, s'ajoute l'erreur d'estimation du coefficient de rétrodiffusion due aux nombres restreint de réalisations. Pour l'analyse de l'atténuation, section 5.1.2, 10 réalisations ont été calculées. Ceci conduit à une erreur d'estimation de $\pm 30\%$ soit $\pm 1.2\text{dB}$ sur l'énergie

diffusée dans une direction. Mais dans l'équation (4.26) l'intégration sur l'ensemble des directions de diffusion tend à réduire cette erreur pour l'estimation de l'atténuation σ_{ext} (l'atténuation au premier ordre n'est pas sujette au speckle et une seule réalisation suffit à une estimation exacte). Les estimations des coefficients de rétrodiffusion présentées section 5.2, ont été calculées sur 30 réalisations, ce qui conduit à une erreur de ± 0.7 dB.

Dans le chapitre suivant, les barres d'erreur ne sont pas tracées sur les graphiques pour des raisons de lisibilité, mais l'erreur systématique liée à la taille de la scène et l'erreur d'estimation du coefficient de rétrodiffusion doivent être gardées à l'esprit.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE

Les campagnes de mesures de Marestaing (France) et de Matera (Italie) ont permis de mesurer des paramètres adaptés à la modélisation des couverts de blé. De plus, les données radar acquises par diffusiomètre sur le site de Matera, offrent une répétitivité temporelle et une large variété de configurations pour l'analyse des mécanismes d'interaction onde-couvert. La présentation des modèles a mis en évidence deux difficultés théoriques, d'une part le calcul des matrices de diffusion des feuilles et des épis, et d'autre part, le calcul de l'atténuation et de la rétrodiffusion dans un milieu dense.

Chapitre 5

Analyse des données expérimentales

Sommaire

5.1 Atténuation	166
5.1.1 Mise en évidence expérimentale.	167
5.1.2 Atténuation due aux tiges.	168
5.1.3 Atténuation due aux feuilles et aux épis.	175
5.2 Rétrodiffusion	177
5.2.1 Rétrodiffusion en bande C	178
5.2.2 Autres fréquences	185

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les variations temporelles de la rétrodiffusion des couverts de blé en bande C. Dans un premier temps, l'atténuation du couvert est étudiée car elle détermine la contribution du sol au signal rétrodiffusé. En particulier, il s'agit de comparer l'atténuation estimée sous l'hypothèse des diffuseurs indépendants, et l'atténuation estimée par le modèle MUSCAT. Dans un deuxième temps, les résultats des modèles WheatBorn et MUSCAT sont comparés aux données radar afin de déterminer les mécanismes prépondérants et les diffuseurs principaux.

En bande C, deux questions majeures se posent à propos de la rétrodiffusion des couverts de blé. La première concerne la contribution du sol, et la deuxième le rôle des épis et des feuilles :

La contribution du sol dépend principalement de l'atténuation dans le couvert. Il est donc nécessaire d'estimer correctement l'atténuation et de déterminer sa sensibilité aux paramètres du couvert. Si l'onde incidente pénètre le couvert et interagit avec le sol, la relation entre la biomasse et le signal radar est perturbée par les paramètres du sol. En particulier, les variations de l'humidité du sol sont généralement plus rapides que la répétitivité des mesures radar ou que l'échelle de temps caractéristique des changements du couvert. Du point de vue de l'inversion, ces variations sont un bruit qu'il faut éliminer.

L'analyse expérimentale des variations du coefficient de rétrodiffusion a montré un changement de comportement à partir de l'épiaison. Ceci signifie que la relation entre le signal et la biomasse change à partir de ce stade de croissance. La modélisation doit clarifier le rôle des épis sur le signal, tout en sachant que ces diffuseurs sont modélisés de façon approximative. La même question se pose pour les feuilles, surtout avant l'épiaison, et les difficultés sont du même ordre.

Dans la première partie de ce chapitre, les modèles sont utilisés pour évaluer l'atténuation dans le couvert. En particulier, les variations de l'atténuation en fonction des paramètres du couvert sont mises en évidence. Dans la seconde partie, les variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion mesuré sur les sites de Marestaing et Matera sont analysés et comparés aux résultats de modélisation.

5.1 Atténuation

Les études précédentes en bande C et en polarisation VV [Cookmartin et al., 2000] [Del Frate et al., 2001], basées sur des modèles de premier ordre, montrent que l'atténuation dans le couvert

de blé est importante dès lors que le blé est bien développé. Les simulations conduites avec le modèle WheatBorn sur le site de Marestaing et de Matera confirment ces conclusions. L'atténuation est estimée aux alentours de -20dB (polarisation V, à 23° d'angle d'incidence), c'est à dire que les modèles de premier ordre prévoient que le sol ne contribue pas à la rétrodiffusion.

Pourtant, des faits expérimentaux indiquent le contraire. Ces faits seront présentés dans la première section. Dans la deuxième section, les raisons de ce désaccord sont abordées en s'intéressant à l'atténuation due aux tiges. Enfin, la dernière section présente l'estimation de l'atténuation dues aux feuilles et aux épis.

5.1.1 Mise en évidence expérimentale.

1. Sur le site de Matera des mesures ont été réalisées à cinq jours d'intervalle les 4 et 9 mai. Entre ces deux dates, un événement de pluie important a fait passer l'humidité du sol de 15% à 29%. Le blé était au stade d'épiaison, c'est à dire bien développé : la hauteur du couvert était de 43cm soit 60% de la hauteur maximale atteinte trois semaines plus tard. On peut estimer que la structure du couvert change peu pendant ces cinq jours. Les données radar sont présentées dans le tableau 5.1.

	4 mai	5 mai	variation	variation estimée
VV 23°	-9.3	-5.8	+3.5	+2.1
VV 40°	-13.8	-11.8	+2.0	+2.4
HH 23°	-4.9	1.0	+5.9	+1.8
HH 40°	-7.5	-5.0	+2.5	+1.5

TAB. 5.1 – . Variation du coefficient de rétrodiffusion mesuré avant et après un passage pluvieux. Pour indication les variations simulée par le modèle de sol IEM.

Cette augmentation rapide et significative du coefficient de rétrodiffusion à toutes les polarisations et toutes les incidences, peut être attribuée au changement de l'humidité du sol. Les variations de la rétrodiffusion du sol simulée par le modèle IEM sont du même ordre de grandeur que les variations mesurées (à l'exception de la polarisation HH à 23° d'angle d'incidence). Ces variations peuvent aussi être dues à l'augmentation de la réflexion spéculaire du sol et donc l'interaction sol-couvert. Dans tous les cas, ces résultats montrent que le sol est visible ¹, même quand le blé est pleinement développé, à toutes les polarisations et aux angles d'incidence allant jusqu'à moins 40°.

¹On peut remarquer de plus que la variation mesurée est supérieure à 23° qu'à 40° et en polarisation HH qu'en polarisation VV, c'est à dire dans les deux cas quand le sol est moins atténué.

2. L'imagerie SAR tridimensionnelle permet de connaître l'origine du signal radar. Les expériences menées à SCEOS, Sheffield, UK avec GB-SAR [Brown et al., 2000][Brown et al., 2001] montrent que la diffusion provenant du sol est dominante pour toutes les incidences entre 20° et 50° pour la polarisation HH et jusqu'à 35° d'incidence pour la polarisation VV. Afin de quantifier ces observations, des mesures d'atténuation ont été conduites. Le principe est d'imager une barre de métal posée au niveau du sol sous le couvert, puis de recommencer après avoir coupé le blé. L'atténuation est le rapport de la section équivalente radar (RCS) de la barre avant et après la moisson. Ces mesures donnent juste une estimation grossière de l'atténuation. Les atténuations aller-retour présentées au tableau 5.2 confirment les conclusions précédentes².

Angle d'incidence	polarisation H	polarisation V
20°	3.0	4.5
30°	2.1	5.8
38°	3.8	14.5

TAB. 5.2 – . Atténuation estimée expérimentalement en bande C.

Ces résultats expérimentaux montrent que le sol joue un rôle important en bande C et sont donc en désaccord avec l'atténuation estimée par les modèles de premier ordre.

5.1.2 Atténuation due aux tiges.

L'évolution de la biomasse partitionnée des tiges, des feuilles et des épis (figure 4.5 page 139 sur le site de Matera) montre, si on exclue le début de la saison, que la masse des tiges est toujours supérieure à la masse des feuilles. En première approximation, les tiges constituent donc le principal atténuateur du milieu, au moins en polarisation verticale.

Le désaccord entre l'expérience et l'estimation de l'atténuation par le modèle de premier ordre semble être dû à la densité particulièrement élevée des couverts de blé. Les résultats théoriques sur l'atténuation dans les milieux denses montrent que l'atténuation est en général plus faible que celle estimée au premier ordre [Tsang et al., 1985, p 428][Chuah et al., 1996][Tsang et al., 1995]. Ceci peut s'expliquer qualitativement par analogie avec l'optique. Si on considère des tiges parfaitement opaques, "l'atténuation" est due à l'ombre des tiges. Si les tiges sont très espacées, la surface totale d'ombre est le produit du nombre de tiges par la surface de l'ombre d'une tige (l'atténuation au premier ordre est proportionnelle à la densité de tige). Par contre, si les tiges sont proches les unes des autres, les ombres se recouvrent partiellement et la surface

²Les données ont été fournies par Pr S. Quegan

totale d'ombre est inférieure au produit du nombre de tiges par la surface de l'ombre d'une tige. Si la densité de tiges augmente considérablement, la surface totale d'ombre devient constante (saturation de l'atténuation). La figure 5.1 montre (à gauche) un cas où les ombres des tiges ne se recouvrent pas (la surface totale des ombres est proportionnelle au nombre de tiges), et (à droite) un cas où les ombres se recouvrent.



FIG. 5.1 – Ombres portées par 5 cylindres à gauche et 50 cylindres à droite.

Le modèle de diffusions multiples MUSCAT permet de calculer l'atténuation dans un milieu dense. La figure 5.2 montre l'atténuation au premier ordre et celle estimée par le modèle MUSCAT en fonction de la densité de tige (et donc en fonction du volume fractionnel). Les autres paramètres du couvert sont ceux mesurés à Matera le 24 mai pour un blé au stade de maturation. Ces résultats imposent plusieurs commentaires :

- L'atténuation est, en général, inférieure à celle estimée au premier ordre. La différence est d'autant plus importante que la densité est grande.
- L'atténuation de la polarisation verticale est très supérieure à celle de la polarisation horizontale. Ceci s'explique par l'orientation verticale des tiges. Les ondes polarisées verticalement interagissent plus fortement que les ondes polarisées horizontalement avec les cylindres verticaux³. Par conséquent, les effets d'ordres supérieurs apparaissent pour des volumes fractionnels plus faibles en polarisation V : L'écart entre l'atténuation et l'estimation du premier ordre est significatif (écart relatif supérieur à 20%) au delà d'un volume fractionnel de 0.6%, soit 500 cylindres/m² en polarisation H, et seulement 0.06%, soit 50 cylindres/m² en polarisation V.
- Dans la littérature, un volume fractionnel de 0.1% à 1% est généralement admis comme limite entre milieu dilué et milieu dense [Chuah et al., 1996][Lopes and Mougin, 1990]. Cette limite est variable car les caractéristiques du milieu influencent beaucoup les effets d'ordre supérieur. Dans notre cas, ces effets apparaissent pour des volumes fractionnels un peu plus faibles en polarisation verticale pour plusieurs raisons : (i) Dans la plupart des

³L'écart relatif entre les deux polarisations diminue quand le rayon augmente pour s'annuler dans la région optique ($ka \gg 1$)

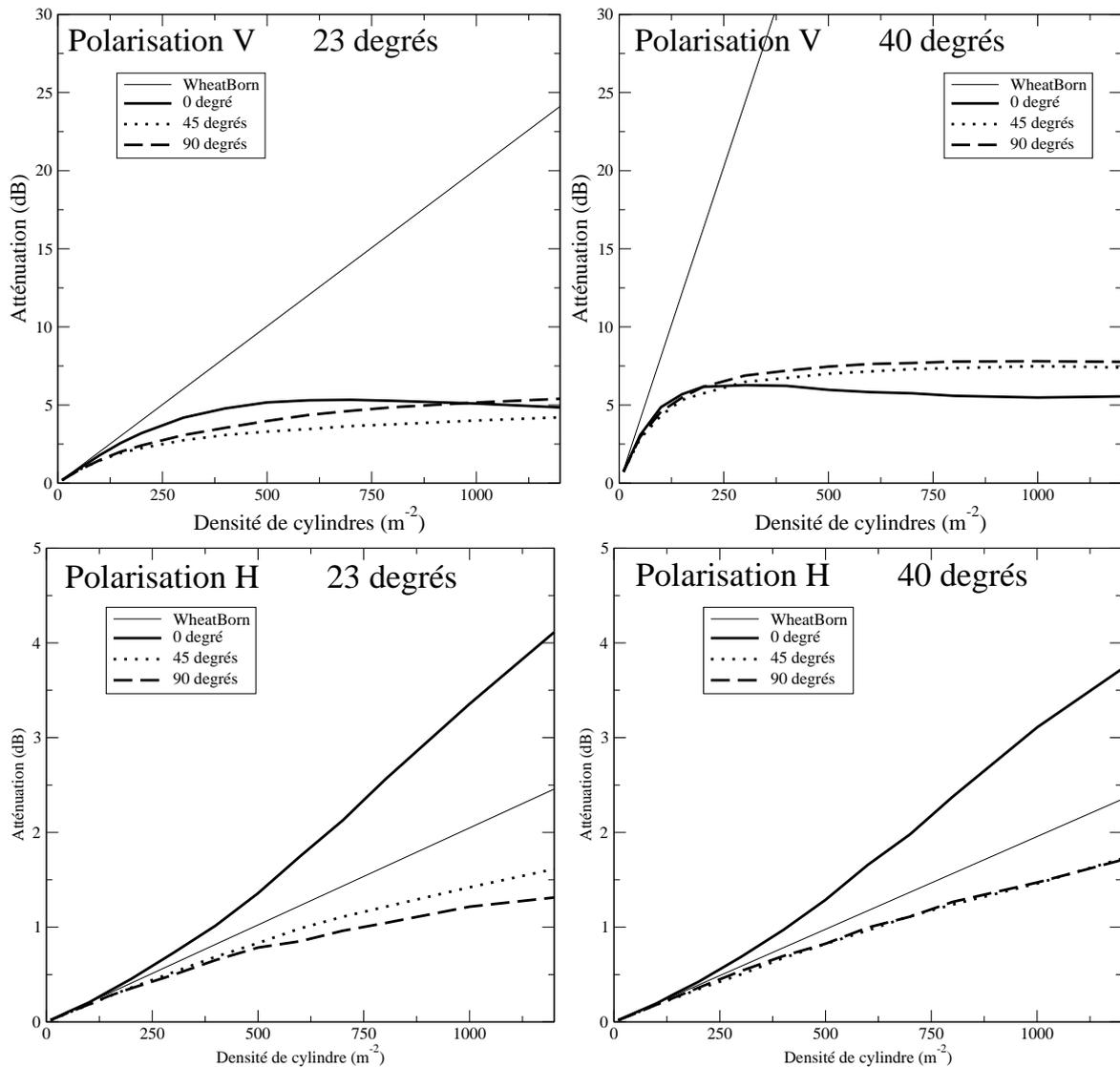


FIG. 5.2 – Atténuation en polarisation verticale (en haut) et en polarisation horizontale (en bas) en fonction de la densité de diffuseurs. Sur un même graphe, les différentes courbes correspondent à l’atténuation au premier ordre, et aux atténuations estimées par MUSCAT pour différents angles d’azimut.

études, les diffuseurs sont sphériques ou sphéroïdaux. La forme cylindriques et l’orientation parfaitement verticale des diffuseurs favorisent les interactions entre cylindres, en particulier pour la polarisation verticale. (ii) Les tiges sont concentrées dans les rangées, le volume fractionnel “local” est donc supérieur à la moyenne. Le volume fractionnel local peut atteindre 3% pour un volume fractionnel moyen de 0.6%. La figure 5.3 montre l’atténuation pour une distribution homogène et une distribution en rangées des tiges en fonction

de la densité de cylindre. (iii) Les travaux de Chuah et al. [1996] ont montré que les dif-

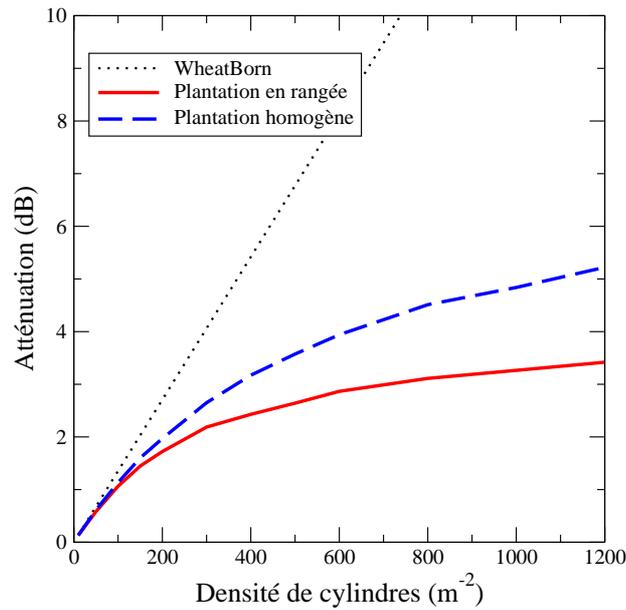


FIG. 5.3 – Atténuation en polarisation verticale à 23° d'angle d'incidence en fonction de la densité de cylindres pour une plantation en rangées et une plantation homogène.

fusions multiples sont plus importantes pour un grand nombre de petits diffuseurs qu'un faible nombre de gros diffuseurs à volume fractionnel constant. Cette étude porte sur des sphères de $k_0a = 0.5$ à $k_0a = 5$. Dans le cas des cylindres, en poursuivant les simulations pour les plus faibles rayons, la tendance s'inverse. En fait, les effets d'ordres supérieurs sont maximum autour de la résonance. La figure 5.4 montre l'atténuation en fonction du rayon des cylindres pour un volume fractionnel fixe de 0.3%. Le maximum est atteint pour $k_p a \approx 2$. (iv) La constante diélectrique des tiges est particulièrement élevée ($|\epsilon_r| \approx 30$) par rapport aux constantes utilisées dans les autres études. Un contraste diélectrique élevé entre l'air et les diffuseurs implique une diffusion importante.

- On observe une saturation de l'atténuation pour les fortes densités en polarisation verticale autour de 5dB à 23° et 40° d'angle d'incidence. Ce point est en accord avec l'analogie optique décrite ci-dessus.
- L'atténuation et l'estimation au premier ordre augmentent avec l'angle d'incidence. Ceci est dû en premier lieu à l'atténuation exprimée par mètres verticaux (la distance parcourue par l'onde est supérieure à 40° qu'à 23°). Mais cette raison ne suffit pas à expliquer la variation angulaire. La raison la plus importante vient de l'augmentation de l'interaction onde/cylindre lorsque l'onde incidente se propage perpendiculairement aux cylindres. Les effets d'ordres supérieurs sont donc plus importants quand l'angle d'incidence tend vers

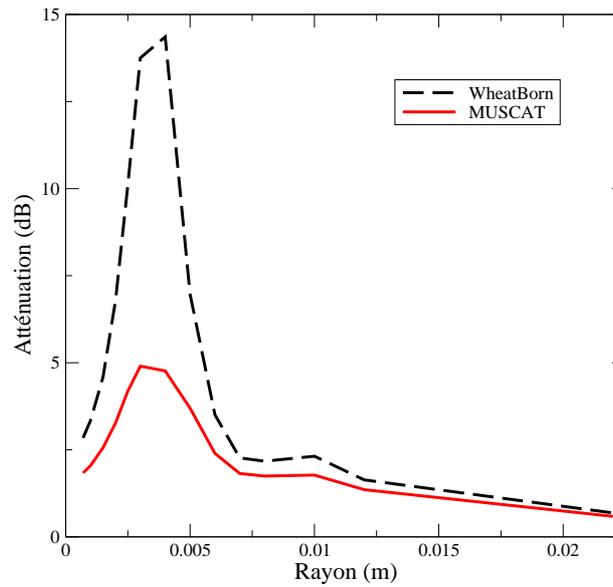


FIG. 5.4 – Atténuation en polarisation verticale à 23° d'angle d'incidence en fonction du rayon des cylindres. Le volume fractionnel est maintenu constant à 0.3%.

90° . La figure 5.5 montre les variations de l'atténuation en polarisation verticale en fonction de l'angle d'incidence.

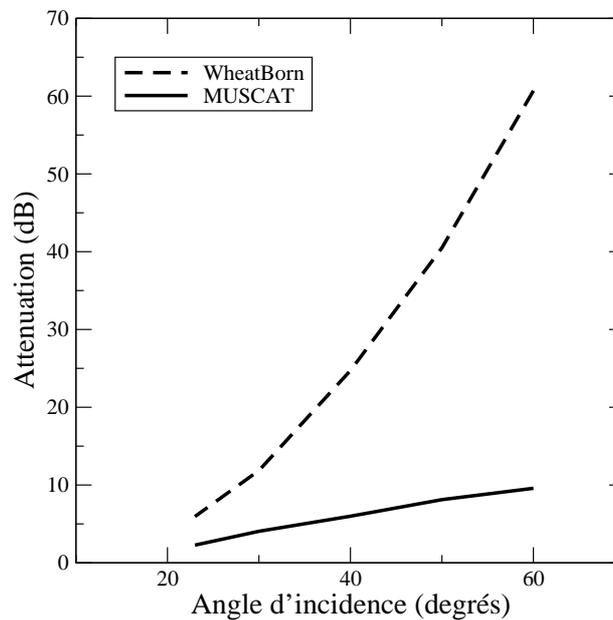


FIG. 5.5 – Atténuation en polarisation verticale en fonction de l'angle d'incidence.

– L'atténuation dépend de l'azimut entre l'onde incidente et la direction des rangées. C'est

une différence fondamentale avec l'atténuation au premier ordre qui ne dépend pas de la disposition des diffuseurs car les diffuseurs sont supposés indépendants. Cependant la dépendance à l'azimut est relativement faible, à l'exception du cas où l'onde incidente est parallèle aux rangées (0° d'azimut). En particulier pour la polarisation horizontale à 23° degrés d'angle d'incidence, l'atténuation est supérieure à l'atténuation au premier ordre. Elle atteint un maximum de 5dB pour 2000 tiges/m² et décroît ensuite (3.6dB à 3000 tiges/m²). Ceci est en contradiction avec l'analogie optique, on s'attend à mieux voir le sol entre les rangées à 0° d'azimut qu'aux autres azimuts. Il est difficile d'expliquer le comportement en azimut et de généraliser les résultats présentés.

L'ensemble de ces résultats montre que pour des couverts de blé où les densités typiques sont entre 400 et 1200 tiges/m², l'atténuation n'est pas correctement estimée par les modèles de premier ordre.

La densité de tige est un paramètre relativement stable à partir du stade du tallage, c'est à dire qu'en pratique pour un champ donné, on peut considérer la densité constante. Au contraire, certains paramètres, comme la hauteur et l'humidité des plantes, varient au cours de la croissance. Les figures 5.6 et 5.7 montrent les variations de l'atténuation en fonction de ces paramètres pour la polarisation verticale. Les résultats en polarisation horizontale conduisent aux mêmes conclusions :

- Les deux modèles prévoient une croissance approximativement linéaire de l'atténuation avec la hauteur (bien vérifié pour la polarisation horizontale, moins bien pour la polarisation verticale). Ce résultat indique que la part des diffusions multiples par rapport à la diffusion indépendante ne varie pas avec la hauteur. Une explication possible est que la part des diffusions multiples dépend du volume fractionnel et que, dans notre cas d'étude, le volume fractionnel ne dépend pas de la longueur des tiges. En effet, sur une surface d'aire A , le volume des tiges est : $V_t = (nA)(\pi a^2 l)$ où n est la densité surfacique de tige, a leur rayon et l leur longueur. Le volume contenant ces tiges est $V = Al$ car la hauteur du milieu est égale à longueur des tiges. Le volume fractionnel f est alors indépendant de la hauteur :

$$f = \frac{V_t}{V} = n\pi a^2 \quad (5.1)$$

- La variation de l'atténuation avec l'humidité est aussi linéaire. Ceci confirme que le volume fractionnel est un bon indicateur de la densité du milieu.

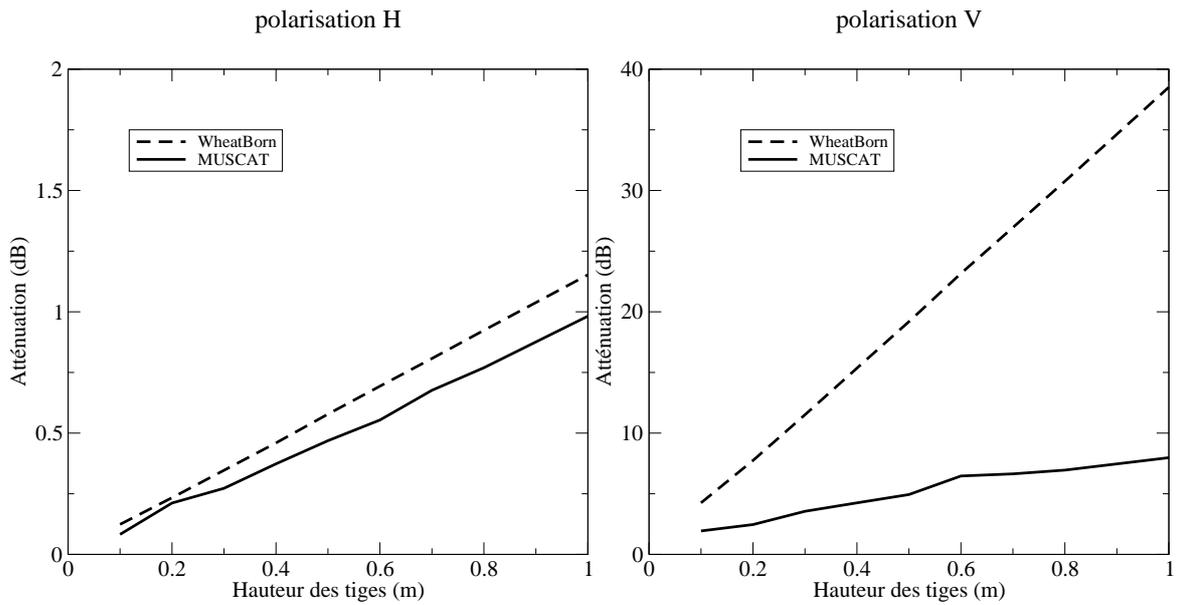


FIG. 5.6 – Atténuation à 40° d'angle d'incidence en polarisation verticale et horizontale en fonction de la hauteur du couvert.

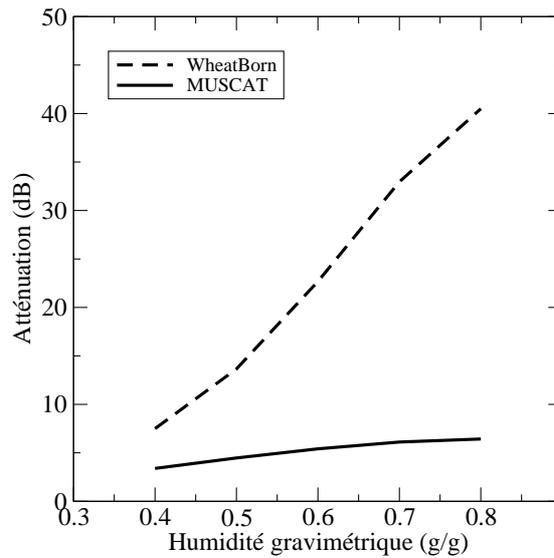


FIG. 5.7 – Atténuation à 40° d'angle d'incidence en polarisation verticale en fonction de l'humidité gravimétrique des tiges.

Le modèle MUSCAT, de part sa complexité, est un outil de recherche et est inadapté au développement d'algorithmes d'inversion. Il est donc intéressant de dériver un modèle semi-empirique de l'atténuation des tiges. Les résultats présentés montrent que l'atténuation peut

s'écrire en première approximation :

$$\text{atténuation}_{(\text{en dB})} = M_g h \cdot F(n, a, \theta, \phi, p) \quad (5.2)$$

où M_g est l'humidité gravimétrique, et p la polarisation. Si la densité est très élevée, la fonction F ne dépend pas de n . L'intérêt de cette relation vient du fait que les paramètres de la fonction F varient peu au cours de la saison (pour un champ donné et pour une configuration radar donnée). On peut remarquer de plus que le rayon des tiges a est proche sur différents sites (Matera, Marestaing) et dans différentes études [Marliani et al., 2002][Brown et al., 2000], et que la densité, si on exclut le cas atypique de Marestaing, varie entre 300 et 450 tiges/m². Le tableau 5.3 donne les valeurs de la fonction F en fonction de l'incidence et de la polarisation pour des valeurs typiques des paramètres : $a = 2\text{mm}$, $n = 400$, $\phi = 45^\circ$. Par ailleurs, les résultats montrent qu'en

	polarisation H	polarisation V
23°	1.4	≈ 4.8
40°	1.6	≈ 13.5

TAB. 5.3 – Valeurs de la fonction F (en dB/m) pour des paramètres typiques de blé.

polarisation horizontale l'effet des diffusion multiples est, certes non négligeable, mais relativement faible. L'atténuation peut donc être estimée au premier ordre à condition d'appliquer un coefficient correctif de l'ordre 0.8 pour 400 tiges/m² et 0.6 pour 1200 tiges/m².

En résumé, ces travaux ont montré que pour les couverts de blé, il est nécessaire de calculer l'atténuation par un modèle d'ordre supérieur. Les modèles de premier ordre conduisent, en général, à une surestimation de l'atténuation, et donc à une sous-estimation de la rétrodiffusion du sol et du mécanisme de double rebond.

5.1.3 Atténuation due aux feuilles et aux épis.

L'estimation correcte de l'atténuation des feuilles et des épis est difficile non seulement parce que la modélisation électromagnétique des diffuseurs élémentaires est approximative (voir section 4.2.1), mais aussi parce qu'on ne peut calculer que l'atténuation au premier ordre alors qu'il est clair que les diffusions multiples jouent un rôle non négligeable. Les résultats présentés dans la suite doivent être considérés avec précautions.

Les feuilles. La figure 5.8 présente les variations temporelles de l'atténuation pour les polarisations horizontale et verticale et pour 23° et 40° d'angle d'incidence. L'atténuation est du même

ordre de grandeur pour les deux polarisations et pour les deux angles d'incidence. C'est le comportement d'un milieu isotrope. Le milieu n'est pas strictement isotrope, mais contrairement aux tiges, les feuilles sont orientées aléatoirement en azimut et sur une gamme d'inclinaison de 20 à 40°. L'incidence locale sur les feuilles varie donc largement.

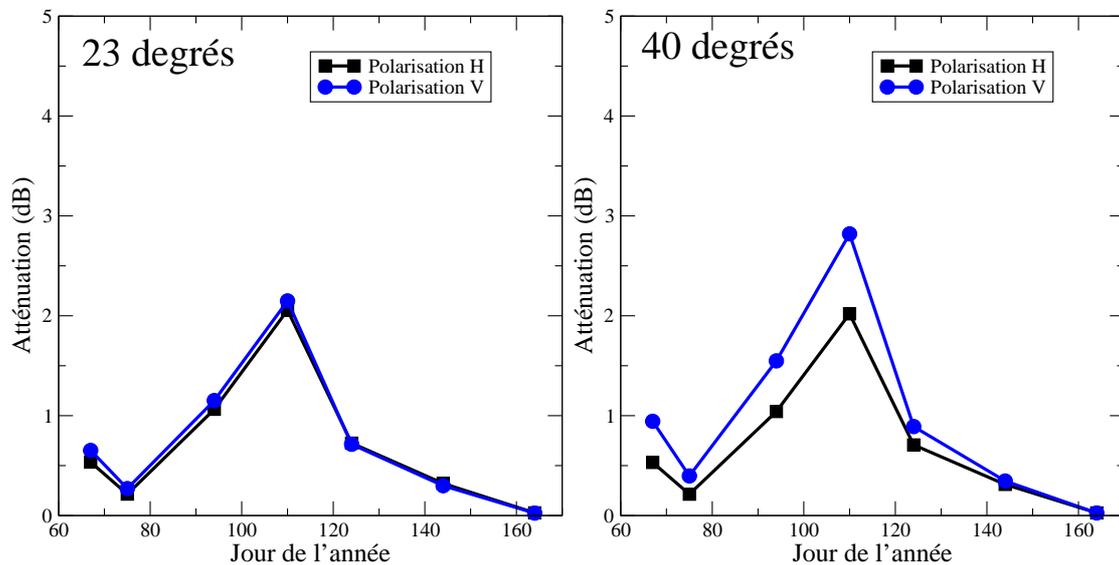


FIG. 5.8 – Variation de l'atténuation au cours de la saison pour les polarisations horizontale et verticale et 23° et 40° d'angle d'incidence.

L'atténuation dépend peu de la forme des feuilles (voir figure 5.9). C'est une caractéristique des diffuseurs dont une dimension est petite devant la longueur d'onde, car dans ce cas, l'atténuation est dominée par l'absorption qui dépend principalement du volume du diffuseur.

Enfin, ces résultats montrent que l'atténuation calculée au premier ordre est plus faible ou du même ordre que l'atténuation due aux tiges calculée avec le modèle MUSCAT.

Les épis. L'atténuation due aux épis a été évaluée de façon sommaire à cause des difficultés de modélisation présentées à la section 4.2.1. Sur le site de Marestaing, la densité de tiges et donc d'épis est élevée. Les estimations à 23° d'angle d'incidence donnent une atténuation (aller simple) de -2.5dB en polarisation horizontale et -5dB en polarisation verticale. L'écart entre les deux polarisations est dû à l'orientation verticale, comme pour les tiges. Sur le site de Matera, la densité d'épis et par conséquent l'atténuation due aux épis est à peine 3 fois plus faible. Ces résultats s'accordent qualitativement avec la nette chute du signal observée sur le site de Matera (voir la section 4.1.2) au moment de l'apparition de l'épi. En l'état actuel, il est difficile de quantifier correctement ces résultats.

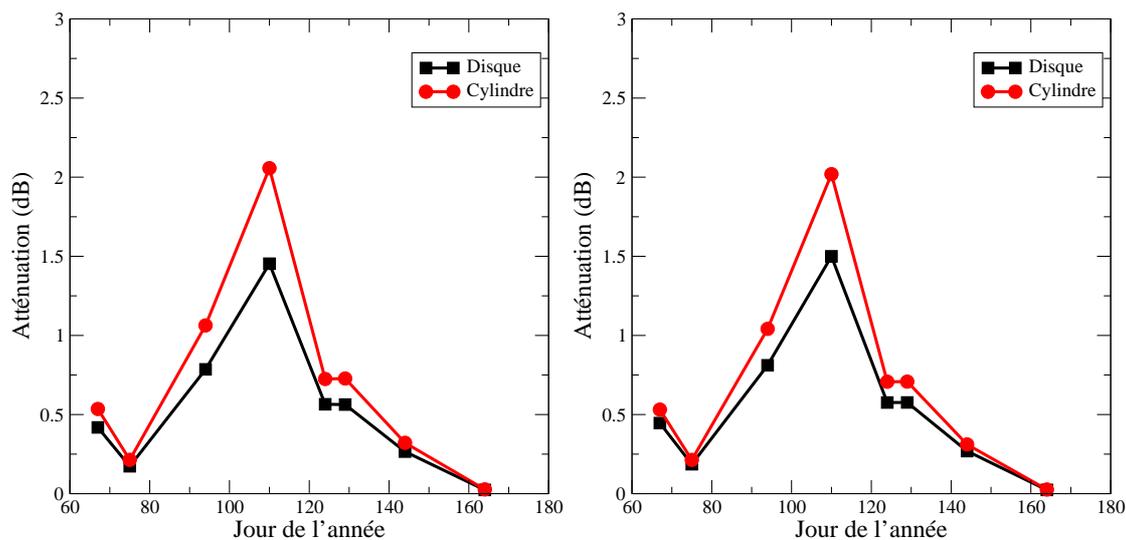


FIG. 5.9 – Variation de l'atténuation en polarisation horizontale au cours de la saison pour des feuilles modélisées par des disques elliptiques ou par des cylindres elliptiques courbes.

Dans la suite, les simulations du modèle WheatBorn ne tiennent pas compte des épis, sauf explicitement mentionné.

5.2 Rétrodiffusion

L'étude des mécanismes d'interactions permet d'interpréter et de prévoir les variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction des paramètres du couvert. A une fréquence donnée, ce sont les mécanismes prépondérants d'interaction qui changent avec l'incidence et la polarisation de l'onde incidente. Les deux modèles développés peuvent aider à la compréhension de ces changements. Avec le modèle d'ordre supérieur MUSCAT, il est seulement possible de décomposer le coefficient de rétrodiffusion total en deux mécanismes : la rétrodiffusion du sol atténuée par le couvert et la rétrodiffusion du couvert comprenant les simples diffusions, les diffusions multiples, et les interactions surface-volume (voir section 4.3). Cependant, il est aussi possible de calculer la rétrodiffusion du couvert s'il n'y avait pas de sol, ce qui donne un ordre de grandeur de la part des interactions de volume par rapport aux interactions surface-volume⁴. Le modèle de premier ordre WheatBorn donne la décomposition en mécanismes du premier ordre et la rétrodiffusion atténuée du sol.

⁴Ce n'est qu'un ordre de grandeur car la solution n'est pas la somme de la contribution sans sol et de la contribution avec sol.

5.2.1 Rétrodiffusion en bande C

Les estimations des deux modèles sont comparées aux données acquises sur les sites de Marestaing et de Matera (figures 5.10, 5.11 et 5.13). Les données acquises le 9 mai après l'évènement de pluie ne sont pas représentées pour des raisons de lisibilité des courbes.

Dans l'ensemble, le modèle MUSCAT donne des résultats plus proches des données que le modèle de premier ordre pour les raisons évoquées dans la partie précédente sur l'atténuation. Pour mener plus en détail l'interprétation, il est nécessaire de distinguer les configurations d'acquisition des données (polarisations et angle d'incidence) et les deux phases de croissance du blé (avant/après l'apparition de l'épi (Voir la section 4.1.2 sur l'analyse qualitative des mesures sur Matera). Différents point de vue peuvent être adoptés pour mener l'analyse :

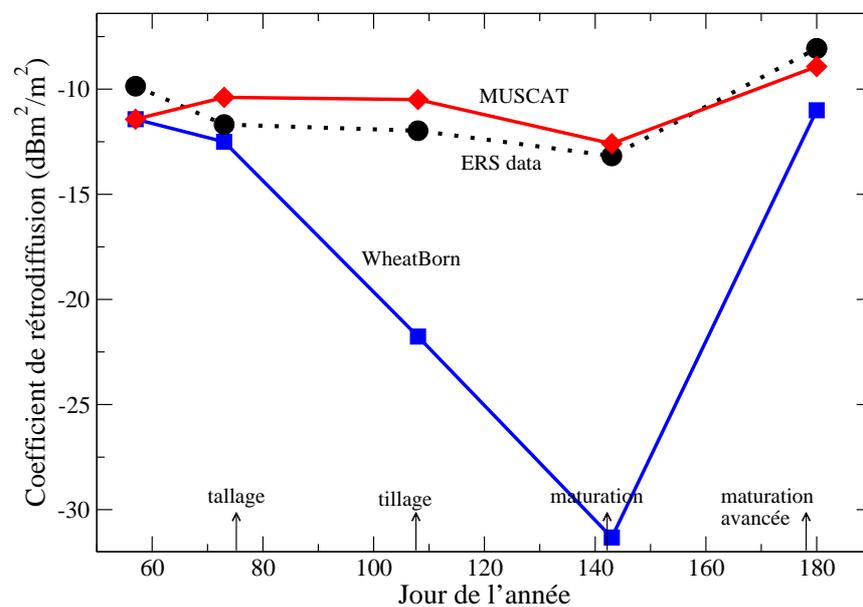


FIG. 5.10 – Comparaison entre les données ERS (23° polarisation VV), le modèle de premier ordre WheatBorn, et le modèle MUSCAT sur le site de Marestaing.

- Du point de vue des mécanismes d'interactions, l'angle d'incidence est le principal paramètre : à 23 degrés d'angle d'incidence, le mécanisme d'interaction prépondérant est la rétrodiffusion du sol. A 40 degrés, le mécanisme de double rebond (ou plus généralement l'interaction sol-couvert) est significatif voire prépondérant.
- Du point de vue de l'inversion, distinguer les phases de croissance est fondamental car l'apparition de l'épi provoque une nette chute du signal et change la relation potentielle entre les paramètres du couvert et le coefficient de rétrodiffusion.
- Du point de vue de la modélisation, le modèle MUSCAT s'avère mieux adapté à la polarisation VV car les tiges jouent le rôle prépondérant, alors que le modèle de premier ordre

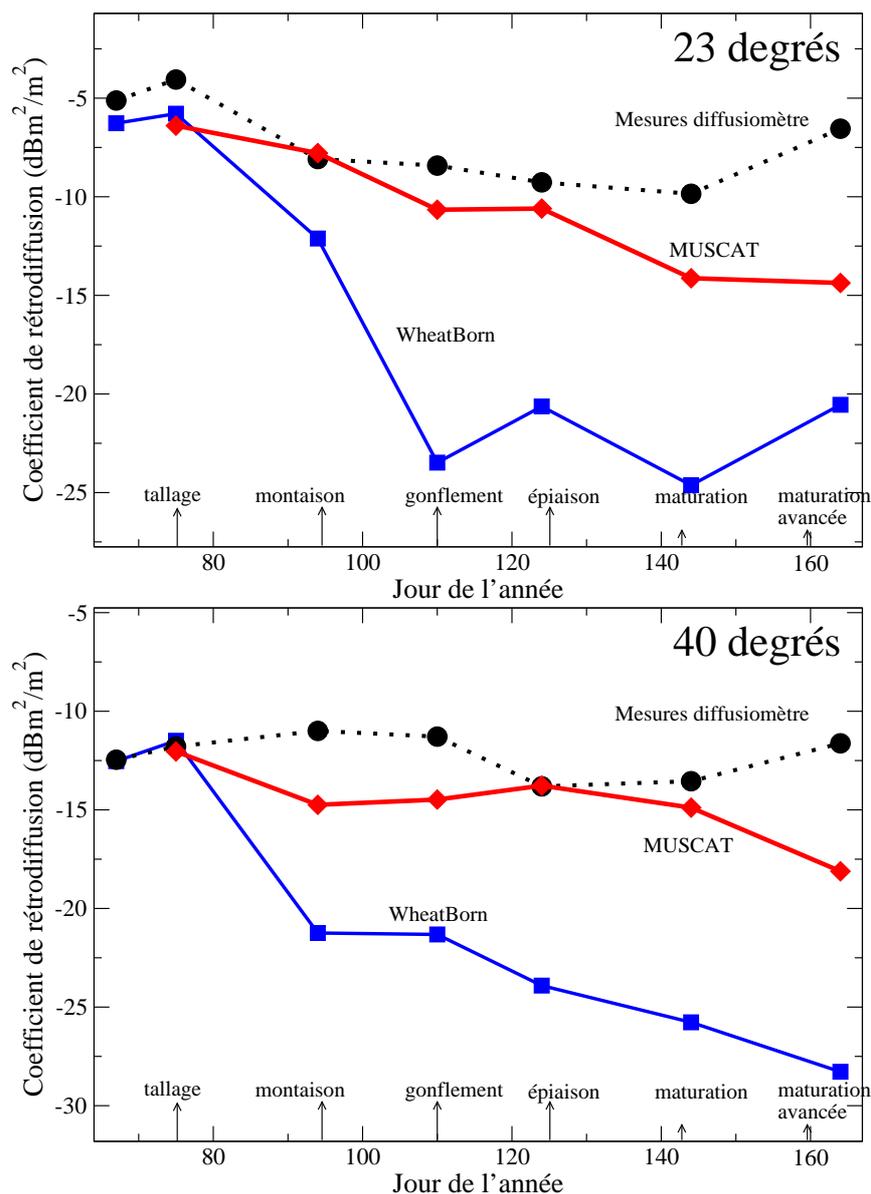


FIG. 5.11 – Variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion en polarisation VV sur le site de Matera mesurées par le diffusiomètre, et estimées par les modèles WheatBorn et MUSCAT

est le seul à pouvoir modéliser les feuilles qui semblent intervenir en polarisation HH. La polarisation HV n'est pas étudiée car les données disponibles ne sont pas calibrées.

Nous avons choisi d'aborder cette étude en distinguant les résultats en fonction de la polarisation.

polarisation VV

Le rôle des tiges est primordial en polarisation verticale à cause de leur orientation. L'interaction des tiges avec l'onde incidente est environ 10 fois plus importante en polarisation verticale qu'en polarisation horizontale.

A 23° d'angle d'incidence, la rétrodiffusion vient essentiellement du sol après atténuation par le couvert. La diffusion du couvert est faible car l'onde a une incidence rasante sur les tiges. Le signal est gouverné par les paramètres du sol (rugosité et humidité) et par les paramètres qui affectent l'atténuation (cf la section 5.1.2). Les variations temporelles du signal sont donc dues à la variation de l'humidité du sol et à la croissance des plantes. Le rôle important de l'atténuation explique la mauvaise estimation du modèle de premier ordre sur le site de Matera (figure 5.11), et plus encore sur le site de Marestaing (figure 5.10) dès lors que le blé est développé (à partir de la montaison). Le modèle MUSCAT est en bon accord avec les mesures radar au moins jusqu'à l'apparition de l'épi. La sous-estimation du signal mesuré après l'épiaison (au stade de maturation et maturation avancée) suggère que l'épi contribue significativement à la rétrodiffusion. Pourtant le modèle de premier ordre estime la rétrodiffusion des épis négligeable, aux alentours de -25dB. Même avec la modélisation imparfaite de ces diffuseurs, il n'est pas possible qu'ils contribuent significativement au signal rétrodiffusé. Il est donc plus probable que la sous-estimation par le modèle MUSCAT soit une erreur de modélisation ou de caractérisation des tiges.

A 40° d'angle d'incidence, les interactions avec les tiges sont plus importantes qu'aux faibles angles d'incidence car l'onde est moins rasante sur les tiges. La figure 5.12 montre la contribution des mécanismes d'interactions au cours de la saison. Les mécanismes ont été estimés pour quelques dates sur des scènes de 2m de côté (deuxième graphe) à cause du problème exposé à la section 4.3.5. La différence entre les deux simulations est faible (au maximum 2dB sur les mécanismes). Toutefois, il convient d'être prudent sur l'interprétation quantitative de ces résultats.

La diffusion de volume (interaction avec le couvert seul) est négligeable (de l'ordre de -35dB), mais la diffusion surface-volume (interaction entre le sol et le couvert) devient prépondérante sur la rétrodiffusion du sol à partir du stade du gonflement. Cette compétition entre mécanismes pose des difficultés tant du point de vue de la modélisation que de l'inversion car la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion total aux paramètres est plus complexe. Par exemple, une augmentation de la rugosité provoque une augmentation de la rétrodiffusion du sol, mais une diminution de l'interaction surface-volume. Un autre exemple, plus complexe : la croissance du blé (augmentation de la hauteur) provoque une augmentation de l'atténuation, donc une diminution de la rétrodiffusion du sol, et une variation dans un sens ou l'autre de l'interaction surface-volume en fonction de la part de l'augmentation de la diffusion et la diminution due à l'atténuation. Les modèles permettent au cas par cas de répondre à ces questions, mais il est

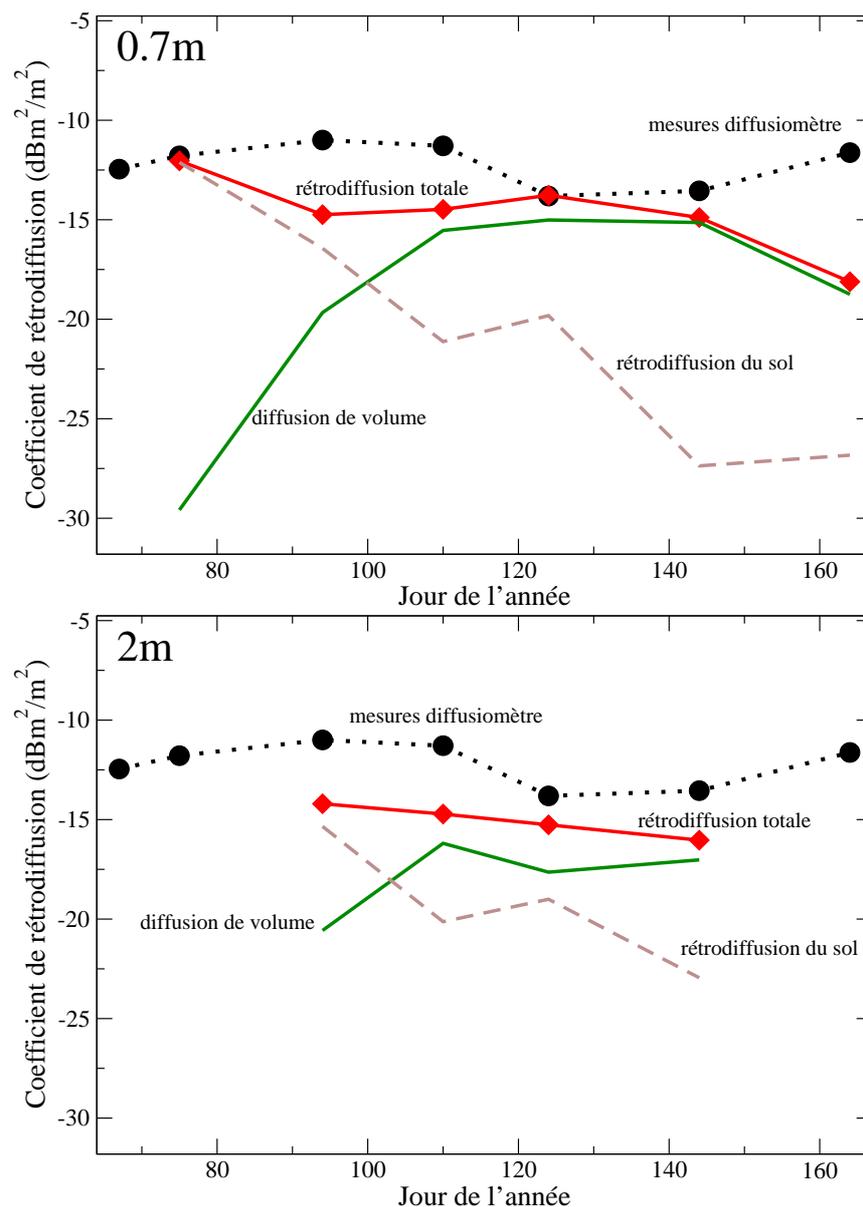


FIG. 5.12 – Décomposition en mécanismes de rétrodiffusion en polarisation VV à 40° d'angle d'incidence sur le site de Matera. Les simulations ont été réalisées sur des scènes carrées de 0.7m de coté pour le premier graphe et de 2m pour le second

difficile de généraliser les résultats. Pour l'inversion, cette compétition entre mécanismes peut induire une perte de sensibilité du signal aux paramètres d'intérêt.

Dans la première phase de la croissance, avant l'apparition de l'épi, le modèle MUSCAT sous-estime le signal. Si on admet que l'atténuation estimée par ce modèle est correcte⁵, ceci

⁵Pour avoir un signal plus fort, il faudrait avoir soit un sol qui rétrodiffuse plus, or l'estimation au tout début de

indique que les feuilles jouent un rôle important. Les simulations avec le modèle WheatBorn ne mettent pas en évidence ce rôle. Il faut cependant remarquer que les feuilles drapeau, inclinées d'environ 30° par rapport à la verticale, peuvent être, selon leur azimut, quasiment perpendiculaire à l'onde incidente.

Dans la deuxième phase, l'apparition de l'épi (124^e jour) provoque une diminution nette du signal mesuré (-3dB et seulement -1dB à 23°). Le modèle MUSCAT, qui ne modélise pas l'épi ne prévoit pas de diminution du signal. Ceci semble indiquer que l'épi atténue significativement l'onde incidente, et ne contribue pas à la rétrodiffusion (du moins la rétrodiffusion ne compense pas l'atténuation). L'estimation au premier ordre de l'atténuation est de 5.4dB, c'est à dire que le modèle WheatBorn surestime la chute du signal. La rétrodiffusion est estimée négligeable, aux alentours de -25dB.

L'ensemble de ces résultats montre que le modèle MUSCAT donne des estimations meilleures que le modèle de premier ordre WheatBorn et donc que les diffusions multiples jouent un rôle fondamental dans l'interaction des ondes polarisées verticalement avec les couverts de blé. Même dans les cas où les feuilles et les épis contribuent au signal, l'analyse conjointe des résultats de modélisation et des mesures aide à la compréhension du signal. Cependant, la description simple du couvert de blé dans le modèle MUSCAT (tiges verticales, pas de feuille et pas d'épi) est une faiblesse si les tiges ne dominent pas la diffusion ou l'atténuation, ce qui semble être le cas en polarisation HH.

polarisation HH

La comparaison entre les résultats des modèles et les mesures (figure 5.13) semble indiquer que le modèle MUSCAT donne de meilleurs résultats que le modèle de premier ordre. Mais cela est dû au fait que le modèle MUSCAT ne prend pas en compte l'atténuation due aux feuilles.

Les deux modèles prévoient que la majeure partie de la rétrodiffusion provient du sol après atténuation par le couvert. Il est alors possible d'ajouter de façon *ad hoc* l'atténuation des feuilles estimée au premier ordre⁶. Les estimations des deux modèles (figure 5.14) sont alors similaires surtout à 40° d'angle d'incidence. L'écart entre les estimations et les mesures est important. La différence atteint environ 6 à 7dB aux deux incidences. Il est possible que l'atténuation des feuilles, calculée au premier ordre soit surestimée.

la croissance indique le contraire, soit une atténuation plus faible, ce qui est peu probable car le modèle MUSCAT ne prend pas en compte l'atténuation due aux feuilles et ne semble pas surestimer l'atténuation due aux tiges.

⁶L'addition des atténuations en polarisation horizontale doit donner un bon ordre de grandeur de l'atténuation totale car il a été montré à la section 5.1.2 que le comportement du milieu est proche d'un milieu dilué. Comme ce n'est pas le cas en polarisation verticale, l'atténuation des feuilles n'a pas été ajoutée

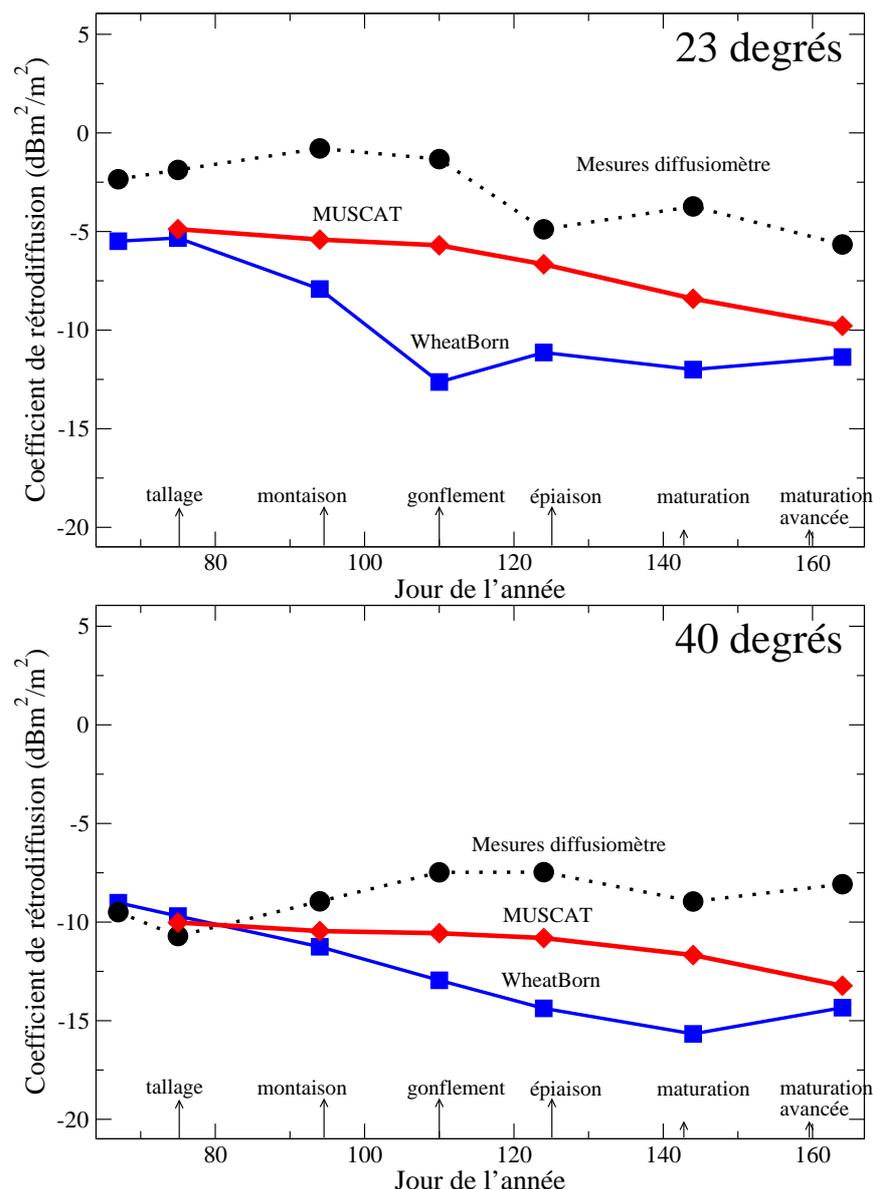


FIG. 5.13 – Variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH sur le site de Matera mesuré par le diffusiomètre, et estimé par les modèles WheatBorn et MUSCAT

Mais l'écart important entre les modèles et les mesures ne s'explique pas seulement par une atténuation mal estimée. La rétrodiffusion estimée par WheatBorn en supprimant totalement l'atténuation est présentée figure 5.14. Le modèle prévoit une diminution du signal au cours de la croissance (à l'exception du stade du gonflement), qui est due à l'assèchement du sol, alors que la rétrodiffusion mesurée augmente jusqu'à l'apparition de l'épi (à 23° et plus encore à 40° d'angle d'incidence). Ces résultats indiquent que la rétrodiffusion du sol n'est pas le mécanisme

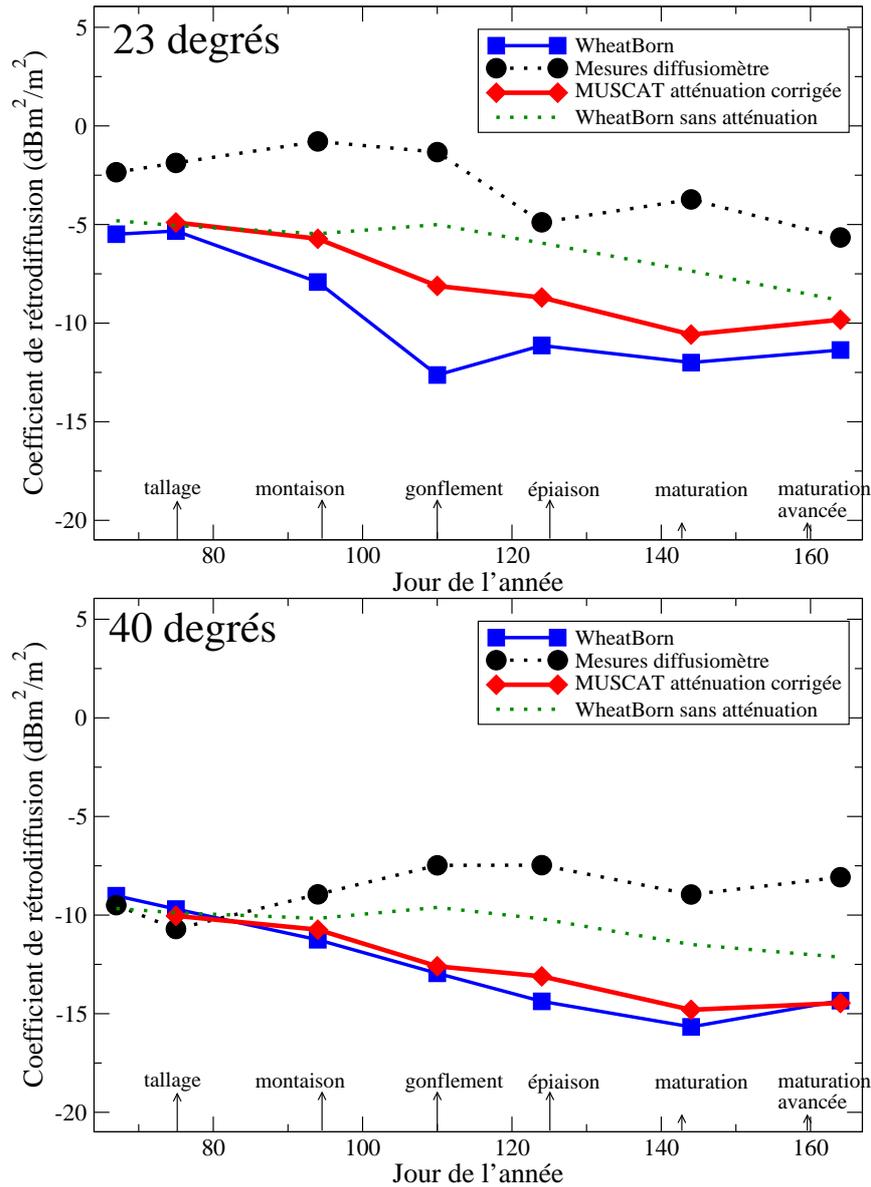


FIG. 5.14 – Variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion en polarisation HH sur le site de Matera mesurés par le diffusiomètre, et estimé par les modèles WheatBorn, MUSCAT corrigé de l'atténuation estimée des feuilles et WheatBorn sans atténuation.

prépondérant. Le mécanisme non prévu par les modèles peut avoir deux origines :

- **L'interaction sol-tige.** Le modèle WheatBorn sous-estime cette interaction pour les deux polarisations VV et HH, même en l'absence d'atténuation, car il ne prend pas en compte les diffusions multiples. Quant au modèle MUSCAT, il sous-estime cette interaction car les tiges modélisées sont parfaitement verticales (uniquement en polarisation horizontale). Un

argument en faveur de cette hypothèse est la nette augmentation du signal le 9 mai après un événement de pluie (voir tableau 5.1 page 167) : le signal augmente plus en polarisation HH que n'augmente la rétrodiffusion directe du sol estimée par le modèle IEM. Il est alors possible qu'une partie de l'augmentation s'explique par une augmentation de l'interaction sol-tige.

- **La rétrodiffusion des feuilles.** La biomasse partitionnée par diffuseurs (figure 4.5 page 139) indique que les feuilles représentent une partie non négligeable de la biomasse (entre 20% et 50% en fonction du stade de croissance), et donc que potentiellement elles contribuent à la rétrodiffusion. Les données radar semblent indiquer la même chose, même si l'interprétation est sujette à caution 4.1.2. Cependant, la modélisation au premier ordre des feuilles montre qu'elles ne rétrodiffusent pas assez pour expliquer le signal. La contribution estimée par le modèle WheatBorn est aux alentours de -25dB à 23° d'angle d'incidence et entre -15dB et -20dB à 40°. Les résultats de Marliani et al. [2002] à 23° conduisent à la même conclusion. Le rôle des feuilles reste une question ouverte.

Dans la deuxième phase de la croissance, l'apparition de l'épi provoque une diminution du coefficient de rétrodiffusion de l'ordre de -4.5dB à 23° et de l'ordre de -1.5dB à 40° (on observe aussi un décalage dans le temps). Les estimations d'atténuation dues aux épis sont du même ordre de grandeur à 40°, mais plus faibles à 23° (voir section 5.1.3).

résumé des mécanismes et diffuseurs prépondérants

L'ensemble des résultats sur les polarisations HH et VV est résumé dans le tableau 5.4. Ces résultats, issus de l'analyse croisée des données et des modèles, peuvent être spécifiques aux sites étudiés et plus ou moins certains, en particulier en polarisation HH.

5.2.2 Autres fréquences

Les perspectives d'utilisation des modèles WheatBorn et MUSCAT aux fréquences autres que la bande C sont discutées.

En bande X et aux plus hautes fréquences, les tiges contribuent moins qu'en bande C au coefficient de rétrodiffusion. Les feuilles ont un rôle prépondérant jusqu'à l'épiaison, puis les épis deviennent les diffuseurs principaux. Enfin, pendant la maturation avec l'assèchement des feuilles, l'interaction sol-tiges devient importante [Ulaby et al., 1987, p 1867-1868][Huet, 1983]. Les feuilles et les épis sont difficiles à modéliser en bande C, elles le sont plus encore en bande X car leurs dimensions sont plus grandes par rapport à la longueur d'onde, sans toutefois atteindre des dimensions "optiques" où des approximations seraient possibles. Cependant, comme l'atténua-

	VV	HH
23°. Avant l'apparition des épis	Rétrodiffusion du sol	Rétrodiffusion du sol et des feuilles
23°. Après l'apparition des épis	Rétrodiffusion du sol et des épis	Rétrodiffusion du sol, des épis et des feuilles
40°. Avant l'apparition des épis	Rétrodiffusion du sol et des feuilles	Rétrodiffusion du sol, double rebond sur les tiges, et rétrodiffusion des feuilles
40°. Après l'apparition de l'épi	Double bond sur les tiges, rétrodiffusion des feuilles	Rétrodiffusion du sol et des feuilles et double rebond sur les tiges

TAB. 5.4 – Mécanismes principaux par ordre d'importance avant et après l'apparition des épis pour différentes configurations radar

tion est plus importante qu'en bande C, les mécanismes de rétrodiffusion du sol et d'interaction sol-végétation sont plus faibles. La rétrodiffusion est donc dominée par un unique mécanisme, la rétrodiffusion du couvert. Le modèle WheatBorn peut être utilisé à condition d'améliorer le calcul de la diffusion des feuilles et des épis. A cause de la description simpliste du milieu, le modèle de diffusion multiple MUSCAT est inadapté. Il n'y a cependant pas de limitation théorique ou pratique au calcul de la diffusion d'un champ de tiges en bande X.

Le modèle cohérent de Stiles and Sarabandi [2000] a été appliqué à la modélisation du blé en bande L [Stiles et al., 2000]. Ces travaux ont mis en évidence les effets cohérents à la disposition en rangées. De la même façon, le modèle cohérent WheatBorn s'applique. Comme les interactions entre l'onde et les diffuseurs sont plus faibles en bande L qu'en bande C, les effets de diffusions multiples sont *a priori* moins importants. Le modèle MUSCAT est donc moins utile, et pose de plus, un problème technique : la taille de la scène modélisée doit être adaptée à la plus grande longueur d'onde, c'est à dire que la scène doit être environ 4 fois plus longue et plus large. Le nombre de cylindres est alors multiplié par 16, ce qui demande beaucoup plus de ressources informatiques qu'en bande C⁷.

⁷En bande C, les scènes, de 0.5m², contiennent environ 200 cylindres dans le cas du site de Matera. En bande L, les scènes adaptées contiennent environ 3200 cylindres. La limite pratique actuelle, avec 1.5Go de mémoire vive, est au alentour de 1500 cylindres en bande C (limite basse car en redémarrant fréquemment GMRES, on ne dépasse pas la mémoire, mais la convergence est moins rapide). En bande L, cette limite peut être dépassée car les interactions entre cylindres sont plus faibles, donc le système est plus proche de l'identité, et donc la convergence de l'algorithme GMRES est plus rapide et moins coûteuse en mémoire.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE

L'interprétation des données radar présentées dans ce chapitre conduit à deux résultats importants.

- Le modèle MUSCAT a montré l'impact de la densité du milieu sur le calcul de l'atténuation. Les résultats quantitatifs sont sujets à caution étant données les difficultés de modélisation, mais les conclusions qualitatives sont claires : la contribution du sol au signal rétrodiffusé en polarisation VV est plus importante que celle estimée par les modèles de premier ordre. En polarisation HH, les phénomènes d'ordres supérieurs sont moins importants qu'en polarisation VV, mais ils ne sont pas négligeables.*
- Les variations du coefficient de rétrodiffusion au moment de l'épiaison semblent s'expliquer par l'atténuation due aux épis. Mais le calcul précis de l'atténuation et de la rétrodiffusion nécessite de nouveaux travaux. Pour les feuilles, l'analyse expérimentale ne permet pas de déterminer avec certitude leur contribution à la rétrodiffusion et à l'atténuation. Le modèle WheatBorn prévoit une faible atténuation, et une rétrodiffusion négligeable. Mais ce résultat est incertain car le calcul de la matrice de diffusion des feuilles est approximatif. Des travaux supplémentaires sont nécessaires.*

Conclusions

Dans les années à venir, plusieurs radars embarqués sur satellites vont fournir des données à plusieurs fréquences, polarisations et incidences sur la surface terrestre. Cependant, les phénomènes d'interactions entre l'onde radar et les couverts végétaux sont complexes. Leur compréhension est un prérequis aux développements de méthodes d'inversion du signal en paramètres bio-géophysiques.

Le travail présenté dans ce manuscrit vise à contribuer à la compréhension de l'interaction entre l'onde radar et les couverts végétaux. L'approche choisie repose sur la modélisation électromagnétique. Les travaux de la modélisation consistent à améliorer deux aspects. D'une part les milieux végétaux sont complexes, leur caractérisation expérimentale est difficile. Les améliorations ont pour objectif d'adapter les théories électromagnétiques afin de décrire de façon plus réaliste le milieu. D'autre part, l'interaction entre l'onde et le couvert est complexe, car elle fait intervenir de nombreux mécanismes. Les améliorations consistent à prendre en compte un plus grand nombre de mécanismes d'interaction.

Cette étude porte sur deux types de couverts : les couverts forestiers de pins, et les couverts de blé. Les modèles développés ou adaptés lors de ce travail sont spécifiques à chaque type de couvert. Mais même pour un type de couvert, plusieurs modèles ont dû être développés afin de répondre à la variété des configurations des capteurs ou à la variété des conditions sur différents sites.

Jusqu'à récemment, les modèles de transfert radiatif pour milieux aléatoires et homogènes ont été largement utilisés afin d'interpréter les mesures de rétrodiffusion des couverts. Lorsque des mesures radar plus variées ont été disponibles, est apparu la nécessité de disposer de modèles plus élaborés.

C'est ainsi que les profils verticaux de rétrodiffusion mesurés par les diffusiomètres aéroportés ont conduit à la prise en compte de la structure tridimensionnelle du couvert. Le modèle RT3D a permis de faibles améliorations des estimations de profil, et a mis en évidence l'impact important des trouées et de la forme de la couronne des arbres sur l'estimation de la rétrodiffu-

sion du sol. L'impact important de la structure du couvert se retrouve aussi dans les estimations de phase interférométrique, notamment pour l'extraction de la hauteur du couvert. Le modèle cohérent BORN3D développé dans ce but a montré des différences notables de l'ordre de 3m pour des couverts de hauteurs comprises entre 7 et 20m.

Les mesures radar en polarisation croisée disponibles en bande C (ENVISAT/ASAR) et en bande L (ALOS-PALSAR à partir de 2004) sont en général sous-estimées par les modèles de premier ordre qu'ils soient basées sur le transfert radiatif ou l'approche cohérente. Il a été nécessaire de développer un modèle plus adapté pour prendre en compte les diffusions multiples et les interactions incohérentes entre le sol et le couvert. Le modèle DORT (*discret ordinate radiative transfer*) basé sur la théorie du transfert radiatif montre une nette amélioration des estimations en polarisation croisée en bande C. Les résultats en bande L montrent que les diffusions multiples et les interactions incohérentes avec le sol sont des mécanismes secondaires.

Les travaux sur les couverts de blé porte essentiellement sur l'estimation de l'atténuation en bande C. En effet, des travaux précédents ont montré un désaccord entre les données radar et les modèles de premier ordre. Ce désaccord a été attribué à une surestimation de l'atténuation calculée au premier ordre. Un modèle d'ordre supérieur basé sur l'équation de diffusions multiples de Foldy-Lax a été développé et a confirmé les suppositions qualitatives. Mais, ce modèle ne modélise que les tiges, et présente de nombreuses limitations liées à son implémentation numérique. Toutefois, il est utilisé pour estimer, en première approximation, le coefficient de rétrodiffusion d'un couvert de blé. En polarisation VV, les résultats sont en meilleur accord avec les données radar que les modèles de premier ordre et montrent que la rétrodiffusion du sol est importante quelle que soit l'incidence. En polarisation HH, le principal problème ne vient pas de l'atténuation mais probablement de la modélisation des feuilles et les épis.

En résumé, les travaux réalisés pendant cette thèse ont contribué à améliorer les modèles existants soit vers une description plus détaillée du milieu, soit vers un calcul électromagnétique plus complet. Le compromis nécessaire entre ces deux voies a entraîné des difficultés lors de l'interprétation des résultats. Il apparaît désormais nécessaire d'unifier les modèles, c'est à dire à la fois de décrire des milieux plus réalistes, et de modéliser correctement les interactions électromagnétiques. Ce besoin est particulièrement marqué pour les couverts de blé, car la complexité de l'interaction électromagnétique est incompatible aujourd'hui avec une description détaillée du milieu.

La grande variété des mesures radars disponibles dans le futur devrait permettre le développement de méthodes d'inversion du signal radar en paramètres d'intérêt du couvert (biomasse,

hauteur, etc). En particulier, les futures données en bande L seront mieux adaptées à l'observation des couverts forestiers que les données actuelles en bande C. Lorsque les modèles reproduisent correctement les observations, ils permettent d'étudier la sensibilité du signal aux paramètres d'intérêt et aux paramètres perturbateurs (espèce, humidité du sol, etc). Cette étude de sensibilité, combinée avec une approche statistique basée sur les mesures expérimentales, doit conduire à des méthodes d'inversion robustes dont les domaines de validité sont bien définis.

Bibliographie

- M. Abramowitz and I.A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publication, New York, 1972.
- L. Angot-Petit. *Modélisation de l'interaction d'une onde électromagnétique avec un objet : application à l'observation d'une forêt dans le domaine des fréquences VHF*. PhD thesis, Université Paris VI, 2000.
- E.P.W Attema and F.T. Ulaby. Vegetation modelled as a water cloud. *Radio Science*, 13(2) : 357–364, 1978.
- A. Beaudoin, T. Le Toan, S. Goze, E. Nezry, A. Lopes, E. Mougin, C.C. Hsu, H.C. Han, J.A. Kong, and R.T. Shin. Retrieval of forest biomass from SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(14) :2777–2796, 1994.
- J. M. Bourgeois and G. S. Smith. A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar : FDTD theory compared with experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 :36–44, January 1996.
- S.C.M. Brown, G. Cookmartin, K. Morrison, A.J. McDonald, S. Quegan, C. Anderson, R. Cordery, and P.M.R. Dampney. Wheat scattering mechanisms observed in near-field radar imagery compared with results from a radiative transfer model. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Honolulu, HA, USA*, pages 2933–2935, July 2000.
- S.C.M. Brown, S. Quegan, K. Morrison, J. C. Bennett, and G. Cookmartin. High resolution measurements of scattering in wheat canopies - implications for crop parameter retrieval. In *Retrieval of Bio- and Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield*, pages 57–62, September 2001.
- T. Castel. *Estimation de paramètres de la ressource forestière par télédétection radar à synthèse d'ouverture. Apport du couplage d'un modèle architectural de plantes avec un modèle de*

- diffusion électromagnétique*. PhD thesis, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 1998.
- T. Castel, A. Beaudoin, J.F. Barczy, Y. Caraglio, N. Floury, and T. Le Toan. On the coupling of backscatter models with tree growth models. part 1 : A realistic description of the canopy using the AMAP tree growth model. In *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, pages 784–786, 1997.
- I Champion. Effect of forest thinning on the radar backscattering coefficient at L band. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11) :2233–2238, 1998.
- N.S. Chauhan and R.H. Lang. Radar backscattering from alfalfa canopy : a clump modelling approach. *International Journal of Remote Sensing*, 20(11) :2203–2220, 1999.
- T. Chiu and K. Sarabandi. Electromagnetic scattering from short branching vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2) :911–925, march 2000.
- H.T. Chuah and W.L. Kung. A microwave propagation model for estimation of effective attenuation coefficients in a vegetation canopy. *Remote Sensing of Environment*, 50 :212–220, 1994.
- H.T. Chuah and H.S. Tan. A Monte Carlo method for radar backscatter from a half-space random medium. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(1) :86–93, 1989.
- H.T. Chuah, S. Tjuatja, K.A. Fung, and J.W. Bredow. A phase matrix for dense discrete random medium : evaluation of volume scattering coefficient. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5) :1137–1143, 1996.
- C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Lalo e. *Mécanique quantique, tome 1*. Remote sensing library. Hermann, 1994.
- G. Cookmartin, P. Saich, S. Quegan, R. Cordey, R. Burgess-Allen, and A. Sowter. Modeling microwave interactions with crops and comparison with ERS-2 SAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2) :658–670, 2000.
- M. Davidson, T. Le Toan, F. Mattia, G. Satalino, T. Manninen, and M. Bourgeaud. On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), 2000.

- F. Del Frate, P. Ferrazzoli, L. Guerriero, T. Strozzi, U. Wegmueller, G. Cookmartin, and S. Quegan. Monitoring crop cycles by SAR using a neural network trained by a model. In *Proceedings of Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield*, volume 1, pages 239–244, September 2001.
- P. Ferrazzoli. SAR for agriculture : advances, problems and prospects. In *Proceedings of Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield*, volume 1, pages 47–56, September 2001.
- N. Floury. *Modélisation radar des couverts forestiers. Applications à la télédétection*. PhD thesis, Université Paris VII, 1999.
- N. Floury, G. Picard, T. Le Toan, J.A. Kong, T. Castel, A. Beaudoin, and J.F. Barczi. On the coupling of backscatter models with tree growth models. part 2 : RT modelling of forest backscatter. In *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, pages 787–789, 1997.
- A. K. Fung, Z. Li, and K. S. Chen. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2) :356–369, 1992.
- Adrian K. Fung. *Microwave scattering and emission models and their applications*. Remote sensing library. Artech House, 1994.
- J.O. Hagberg, L.M.H. Ulander, and J. Askne. Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33 :231–240, 1995.
- M.T. Hallikainen, T. Tares, J. Hyyppa, E. Somersalo, P. Ahola, N. Toikka, and J. Pulliainen. Helicopter-borne measurements of radar backscatter from forests. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7) :1179–1191, 1990.
- M.T. Hallikainen, F.T. Ulaby, M.C. Dobson, M.A. El-Rayes, and L.K. Wu. Microwave dielectric behavior of wet soil - part I : empirical models and experimental observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23 :25–34, 1985.
- F.D. Hastings, J. B. Schneider, and S. L. Broschat. A Monte-Carlo FDTD technique for rough surface scattering. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 43 :1183–1191, November 1995.
- J. Helbert, P. Boissard, and J.P. Buis. A theoretical study of an electrostatic multipole to assess the horizontal and vertical distribution of the in situ water content of vegetation canopies. *Agronomie*, 21(2) :127–138, 2001.

- C.C. Hsu. *Theoretical models for microwave remote sensing of forests and vegetation*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering and Compute Science, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- C.C. Hsu, C. Han, R.T. Shin, J.A. Kong, A. Beaudoin, and T. Le Toan. Radiative transfer theory for polarimetric remote sensing of pine forest at P band. *International Journal of Remote Sensing*, 15(14) :2943–2954, 1994.
- M. Huet. *Evolution des paramètres de structure et de biomasse d'un couvert de blé. Utilisation des techniques de télédétection micro-ondes*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse., 1983.
- A. Ishimaru. *Wave propagation and scattering in random media*. The IEEE Series on Electromagnetic Wave Theory, 1997.
- John David Jackson. *Classical electrodynamics*. Wiley & Sons Inc., 1962.
- Ya-Qiu Jin. *Electromagnetic scattering modelling for quantitative remote sensing*. World Scientific, Singapore, 1993.
- M. Karam and A.K. Fung. EM scattering from a randomly oriented circular dielectric, finite-length cylinder. In *International union radio science commission F : wave propagation and remote sensing*, 1986.
- M. A. Karam and A. K. Fung. Leaf-shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(6) :687–697, 1989.
- M.A. Karam, A.K. Fung, and N.S. Chauhan. A microwave scattering model for layered vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(4) :767–784, 1992.
- M.O. Kolawole. Scattering from dielectric cylinders having radially layered permittivity. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 6(2) :235–259, 1992.
- T. Le Toan, A. Beaudoin, J. Riou, and D. Guyon. Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2) :403–411, 1992.
- T. Le Toan, F. Ribbes, N. Floury, L.F. Wang, J.A. Kong, T. Kurosu, and M. Fujita. Rice crop monitoring using ERS-1 data : experiment and modeling results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1) :41–56, Jan 1997.

- Y.C. Lin and K. Sarabandi. A Monte Carlo coherent scattering model for forest canopies using fractal-generated trees. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1) :440–451, january 1999.
- A. Lopes and E. Mougin. Microwave coherent propagation in cylindrical-shape forest components : interpretation of attenuation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3), 1990.
- G. Macelloni, S. Paloscia, P. Pampaloni, F. Marliani, and M. Gai. The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4), 2001.
- F. Marliani, S. Paloscia, P. Pampaloni, and J. A. Kong. Simulating coherent backscattering from crops during the growing season. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (1), 2002.
- Jean-Michel Martinez. *Caractérisation spatialisée d'un couvert forestier : apport de la télédétection*. PhD thesis, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 2000.
- J.M. Martinez, N. Floury, T. Le Toan, A. Beaudoin, M. Hallikainen, and M. Makynen. Measurements and modeling of vertical backscatter distribution in forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2) :710–719, March 2000.
- F. Mattia, A.M. Gatti, F. Posa, A. D'Alessio, C. Notarnicola, M. Sabatelli, E. and Rinaldi, G. Satalino, G. Pasquariello, T. Le Toan, G. Picard, and M. Davidson. Radar and ground measurements on wheat fields over the matera site : an experimental study. In *Retrieval of Bio- and Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield*, pages 279–284, September 2001a.
- F. Mattia and T. Le Toan. Backscattering properties of multi-scale rough surfaces. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 13, 1999.
- F. Mattia, T. Le Toan, and M. Davidson. An analytical, numerical and experimental study of backscattering from multi-scale soil surfaces. *Radio Science*, 36(1), 2001b.
- F. Mattia, T. Le Toan, G. Picard, F. Posa, A. D'alessio, C. Notarnicola, Gatti A.M., M. Rinaldi, G. Satalino, and G. Pasquariello. Multitemporal C-band radar measurements on wheat fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, soumis.
- K.C. Mc Donald and F.T. Ulaby. Radiative transfer modelling of discontinuous tree canopies at microwave frequencies. *International Journal of Remote Sensing*, 14(11) :2097–2128, 1993.

- Pierre Melon. *Observations des couverts végétaux par radar à basses fréquences*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2002.
- S. V. Nghiem, T. Le Toan, J. A. Kong, H. C. Han, and M. Borgeaud. Layer model with random spheroidal scatterers for remote sensing of vegetation canopy. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 7(1) :49–76, 1993.
- . Oh, K. Sarabandi, and F.T. Ulaby. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 :370–381, 1992.
- A. F. Peterson, S. L. Ray, and R. Mittra. *Computational methods for electromagnetics*. IEEE Press series on electromagnetic press, 1997.
- Ghislain Picard. Modélisation transfert radiatif des couverts forestiers. Master's thesis, Université Paris 7, Denis Diderot, 1997.
- A. J. Poggio and E. K. Miller. *Computer Techniques for Electromagnetics*. Hemisphere, New York, 1987.
- P. Reffye de. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier robusta. 1ère partie. étude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs. *Café Cacao Thé*, 25(2) :83–104, 1981.
- E. Rignot and J. B. Way. Monitoring freeze-thaw cycles along north-south Alaskan transects using ERS-1 SAR. *Remote Sensing of Environment*, 49(2) :131–137, August 1994.
- E. Rignot, J. B. Way., K. McDonald, L. Viereck, C. Williams, P. Adams, C. Payne, Wood W., and J. Shi. Monitoring freeze-thaw cycles along north-south alaskan transects using ers-1 sar. *Remote Sensing of Environment*, 49(2) :145–154, August 1994.
- F. Rocca, C. Prati, and A. Monti Guarnieri. Possibilities and limits of SAR interferometry. In *Proceedings of AGARD SPP Symposium on "Remote Sensing : A Valuable Source of Information"*, pages 2 :1–2 :10, 1996.
- George T. Ruck, E. Barrick, Donald, William D. Stuart, and Clarence K. Krichbaum. *Radar Cross Section Handbook*. Plenum Press - New York - London, 1970.
- Yousef. Saad. *Iterative Methods*. <http://www-users.cs.umn.edu/~saad/books.html>, 2000.

- V. Sabatelli, D. Casarano, G. Buono, F. Paparella, and F. Posa. An FM-CW scatterometric radar : design, implementation and use on natural surfaces. *Alta Frequenza*, 11(3), 1999.
- P.J. Saich, R.A. Cordey, S. Quegan, M. Williams, J.R. Baker, A. Luckman, A. Wielogorska, and M. Wooding. SAR retrieval algorithms for land applications. Technical Report ESA Contract Report 10644/93/NL/NB, ESA, 1995.
- K. Sarabandi, P. F. Polation, and F.T. Ulaby. Monte Carlo simulation of scattering from a layer of vertical cylinders. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 41(4) :465–475, april 1993.
- K. Sarabandi and T. B. A. Senior. Low-frequency scattering from cylindrical structures at oblique incidence. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 28(5) :879–885, September 1990.
- G. Soriano and M. Saillard. Scattering of electromagnetic waves from two-dimensional rough surfaces with impedance approximation. *Journal of Optical Society of America A*, 18 :124–133, January 2001.
- J. M. Stiles and K. Sarabandi. Electromagnetic scattering from grassland-part i : A fully phase-coherent scattering model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(1) : 339–348, January 2000.
- J. M. Stiles, K. Sarabandi, and K. T. Ulaby. Electromagnetic scattering from grassland-part ii : Measurement and modeling results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(1) :349–356, January 2000.
- J.M. Stiles, K. Sarabandi, and T. B. A. Senior. A scattering model for thin dielectric cylinders of arbitrary cross section and electrical length. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44(2) :260–270, February 1996.
- G. Sun and J. Ranson. A three-dimensional radar backscatter model of forest canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2) :372–382, Mars 1995.
- G. Sun, D.S. Simonett, and A.H. Strahler. A radar backscatter model for discontinuous forest canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(4) :639–650, 1991.
- L. Tsang, C. H. Chan, J.A. Kong, and J. Joseph. Polarimetric signatures of a canopy of dielectric cylinders based on first and second order vector radiative transfer theory. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 6(1) :19–51, 1992.

- L. Tsang and A. Ishimaru. Radiative wave and cyclical transfer equation for dense nontenuous media. *Journal of Optical Society of America A*, 2(12) :2187–2193, 1985.
- L. Tsang, J.A. Kong, K.H. Ding, and C.O. Ao. *Scattering of electromagnetic waves : Numerical Simulations*. Wiley-Interscience, 2000.
- L. Tsang, J.A. Kong, and R.T. Shin. *Theory of microwave remote sensing*. Wiley-Interscience, 1985.
- L. Tsang, D. Kung-Hau, Z. Guifu, C.C. Hsu, and J.A. Kong. Backscattering enhancement and clustering effects of randomly distributed dielectric cylinders overlying a dielectric half space based on Monte-Carlo simulation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 43(5) : 488–499, 1995.
- Fawaz T. Ulaby, Richard K. Moore, and Adrain K. Fung. *From Theory to Applications*, volume 3 of *Microwave Remote Sensing : Active and Passive*. Artech House Inc., 1987.
- Fawaz T. Ulaby, Richard K. Moore, and Adrian K. Fung. *Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*, volume 1 of *Microwave Remote Sensing : Active and Passive*. Artech House Inc., 1981.
- F.T. Ulaby and M.A. El-Rayes. Microwave dielectric spectrum of vegetation - part II : dual-dispersion model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 25 :550–557, 1987.
- F.T. Ulaby, K. Sarabandi, K. Mc Donald, M. Whitt, and M.G. Dobson. Michigan microwave canopy scattering model. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7) :1223–1253, 1990.
- A. G. Voronovich. *Wave scattering from rough surfaces*. Springer, 1994.
- Y. Wang, J. Day, and G. Sun. Santa Barbara microwave backscattering model for woodlands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 14(8) :1477–1493, 1993.
- B. Wen, L. Tsang, D.P. Winebrenner, and A. Ishimaru. Dense medium radiative transfer theory : comparison with experiment and application to microwave remote sensing and polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1) :46–59, 1990.
- S.H. Yueh, J.A. Kong, J.A. Jao, R.T. Shin, and T. Le Toan. Branching model for vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 :390–402, 1992.