

Retrieval of forest biomass from spaceborne synthetic aperture radar data: on the coupling of an architectural plants model with an electromagnetic model

Thierry Castel

► To cite this version:

Thierry Castel. Retrieval of forest biomass from spaceborne synthetic aperture radar data: on the coupling of an architectural plants model with an electromagnetic model. Silviculture, forestry. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 1998. English. NNT: . tel-02152966

HAL Id: tel-02152966 https://theses.hal.science/tel-02152966

Submitted on 11 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.





THÈSE

présentée par

Thierry CASTEL

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Spécialité : Sciences Forestières

ESTIMATION DE PARAMÈTRES DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE PAR TÉLÉDÉTECTION RADAR A SYNTHÈSE D'OUVERTURE

APPORT DU COUPLAGE D'UN MODÈLE ARCHITECTURAL DE PLANTES AVEC UN MODÈLE DE DIFFUSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Soutenue le 3 juillet 1998 devant le jury composé de :

Président :	M. Claude MILLIER	Directeur scientifique, ENGREF (directeur de thèse)
Rapporteurs :	M. François HOULLIER	Directeur de recherche, INRA/CIRAD
	M. Shaun QUEGAN	Professeur à l'Université de Sheffield
Examinateurs :	M. Pierre BALLAIRE	Ingénieur de recherche, Ademe
	M. André BEAUDOIN	Maître de Conférences, ENGREF (encadrant scientifique)
	M. Frédéric BERGER	Ingénieur de recherche, Cemagref
	Mme Thuy LE TOAN	Ingénieur de recherche, CNRS/CESBIO
Membres invités	: M. Maurice BORGEAUD	Ingénieur de recherche, ESA/ESTEC
	M. Philippe DURAND	Ingénieur des travaux, ONF

Thèse préparée au

Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF - ENGREF. Montpellier, France

ADEME









THÈSE

présentée par

Thierry CASTEL

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Spécialité : Sciences Forestières

ESTIMATION DE PARAMÈTRES DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE PAR TÉLÉDÉTECTION RADAR A SYNTHÈSE D'OUVERTURE

Apport du couplage d'un modèle architectural de plantes avec un modèle de diffusion électromagnétique

Soutenue le 3 juillet 1998 devant le jury composé de :

Président :	M. Claude MILLIER	Directeur scientifique, ENGREF (directeur de thèse)
Rapporteurs :	M. François HOULLIER	Directeur de recherche, INRA/CIRAD
	M. Shaun QUEGAN	Professeur à l'Université de Sheffield
Examinateurs :	M. Pierre BALLAIRE	Ingénieur de recherche, Ademe
	M. André BEAUDOIN	Maître de Conférences, ENGREF (encadrant scientifique)
	M. Frédéric BERGER	Ingénieur de recherche, Cemagref
	Mme Thuy LE TOAN	Ingénieur de recherche, CNRS/CESBIO
Membres invités	: M. Maurice BORGEAUD	Ingénieur de recherche, ESA/ESTEC
	M. Philippe DURAND	Ingénieur des travaux, ONF

Thèse préparée au Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF - ENGREF. Montpellier, France

ADEME



×

ŗ

A ma Maman trop tôt disparue, à ma femme Nathalie, à mon père et mon frère, à ma famille et belle famille, en témoignage de mon amour.

2

.

۰.

"Je ne sais pas grand-chose, mais je sais que tout est intéressant à partir du moment où on s'y consacre vraiment".

.

.

Richard P. Feynman

Sommaire

Liminaire Abréviations et acronymes	I III
Introduction	1
Chapitre 1 Présentation du travail de recherche	5
 1.1 Situation 1.2 Bref état de l'art 1.3 Objectif des recherches 1.4 Approche méthodologique 1.5 Contexte de l'étude Références bibliographiques 	5 7 8 9 15 19
Chapitre 2 Grandeurs Physiques en télédétection radar spatioportée	21
 2.1 Principes du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) 2.2 Le vecteur d'information : le champ électrique 2.3 Capteurs RSO spatioportés 2.4 Coefficient de rétrodiffusion : cas du terrain plat 2.5 Coefficient de rétrodiffusion : cas du terrain accidenté 2.6 Conclusions Références bibliographiques 	21 25 30 34 39 50 51
Chapitre 3 Le dispositif expérimental	53
 3.1 Description du site d'étude 3.2 Mise en place des SIG et intégration des données de base 3.3 Expérimentations et mesures 3.4 Données RSO acquises sur le site 3.5 Conclusions Références Bibliographiques 	53 56 59 83 84 86
Chapitre 4 Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier	88
 4.1 Etat de l'art 4.2 Objectifs 4.3 Méthodologie 4.4 Post-traitement des images 4.5 Sensibilité du σ⁰ aux paramètres forestiers 4.6 Conclusions Références Bibliographiques 	88 90 90 91 104 121 122

Chapitre 5	
Caractérisation architecturale du milieu forestier	124
5.1 Besoins en caractérisation fine du couvert forestier	124
5.2 Caractérisation dendrométrique	126
5.3 Quelques approches récentes de modélisation	127
5.4 Caractérisation architecturale avec AMAP	129
5.5 Modélisation architecturale du pin noir d'Autriche	137
5.6 Résultats de caractérisation précise du couvert forestier	147
5.7 Conclusions	159
Références bibliographiques	161

Chapitre 6 Interprétation du signal par couplage d'AMAP et du modèle du MIT/CESBIO

6.1 Introduction	164
6.2 Principales approches de modélisation	167
6.3 Le modèle du MIT/CESBIO : un modèle hybride	174
6.4 Approche méthodologique de modélisation	180
6.5 Simulation et interprétation : cas du terrain plat	184
6.6 Simulation et interprétation : cas du terrain accidenté	209
6.7 Conclusions	220
Références bibliographiques	222

164

Chapitre 7 Approche spatialisée d'estimation des paramètres de la ressource forestière 224

Conclusions	246
Références bibliographiques	245
7.5 Conclusions	242
7.4 La simulation d'un paysage forestier	242
7.3 Résultats d'estimation spatialisée des paramètres forestiers	229
7.2 Différents scénarios d'estimation spatialisée de la ressource forestière	225
7.1 Introduction	224

Annexe A

Apports des produits interférométriques RSO en milieu forestier

Annexe B

Liste des publications réalisées dans le cadre de la thèse

Annexe o	du	Chapitre	2
Annexe o	du	Chapitre	3
Annexe o	du	Chapitre	5
Annexe o	du	Chapitre	6

<u>Résumé</u>

La possibilité de spatialiser certains paramètres forestiers comme la biomasse sur pied représente un enjeu significatif pour la gestion raisonnée de la ressource forestière, et une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers. A cette fin, l'imagerie par radar à synthèse d'ouverture (RSO), en plus de son utilisation tout temps, a montré ces dernières années de bonnes potentialités par la sensibilité de la rétrodiffusion basses fréquences (P et L) en polarisation croisée (HV) aux paramètres de la masse ligneuse, jusqu'à des volumes de l'ordre de 200-300 m³/ha. Ces études, réalisées sur des milieux forestiers simples (essentiellement plantations de résineux) ont démontré dans une certaine mesure que l'architecture de l'arbre ainsi que la topographie sont des paramètres importants à prendre en compte, nécessitant toutefois des études complémentaires. Plus globalement, la généralisation à des conditions forestières variées, nécessite une meilleure compréhension du lien biophysique entre l'écho radar et les paramètres recherchés, lien perturbé par la topographie, grâce à une approche de modélisation de la diffusion électromagnétique des ondes par le couvert. Toutefois, ce type d'approche bute sur l'absence de description précise du milieu forestier en termes géométrique et architectural des diffuseurs élémentaires (feuilles, branches, troncs). Ainsi, les récents modèles architecturaux de croissance des plantes du type AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes du CIRAD) s'avèrent intéressants à cette fin.

Le premier objectif, de type problème direct, vise à affiner la compréhension du lien physique entre la rétrodiffusion radar et les paramètres forestiers, à l'aide d'une démarche originale de couplage du modèle AMAP avec le modèle de transfert radiatif vectoriel du MIT/CESBIO. Un deuxième objectif, de type problème inverse, est d'évaluer la faisabilité d'estimation spatialisée de paramètres forestiers à l'aide de données RSO seules ou en synergie avec le modèle AMAP, intégrés dans un SIG. Dans les deux cas, les perturbations dues au relief sont abordées explicitement, et nécessite la mise en œuvre et la validation de post-traitements développés récemment au LCT.

L'étude est menée sur un site forestier "simple" de parcelles monospécifiques équiennes de pin noir d'Autriche, localisé en Lozère et situé dans différentes configurations topographiques où des données RSO variées (ERS, JERS et surtout SIR-C) ont été acquises. La méthodologie est basée sur un SIG permettant la mise en correspondance des données expérimentales (RSO, MNT, paramètres forestiers). Elle intègre également le développement et le calage du modèle AMAP pour le pin noir, et d'une nouvelle interface dénommé AMAP2SAR, permettant d'accéder à une caractérisation architecturale réaliste du couvert forestier.

Les résultats en bande L et en particulier en polarisation HV montrent une bonne sensibilité aux paramètres forestiers de la masse ligneuse, pour des volumes de fûts jusqu'à 150 m³/ha. Cette sensibilité est très similaire à celle observée auparavant en terrain plat, après l'application d'une phase de correction des perturbations radiométriques dûs au relief, impliquant le développement d'un modèle semi-empirique de correction angulaire. Par la suite, la modélisation de la rétrodiffusion prenant en compte la variabilité verticale dans le couvert grâce à AMAP a montré les faiblesses de l'hypothèse d'homogénéité verticale utilisée jusqu'à maintenant par les modèles électromagnétiques. Ceci a permis de mieux mettre en évidence le lien de la rétrodiffusion de volume dominante pour la configuration L-HV avec la densité et le diamètre des branches primaires, paramètres bien corrélés allométriquement à des paramètres plus classiques du couvert comme la densité et la section des fûts, et donc du volume à l'hectare des fûts. L'impact topographique a également été modélisé ce qui a permis de valider le modèle semi-empirique de correction angulaire précité.

Finalement, des résultats d'inversion de paramètres forestiers à partir des données radar, du modèle AMAP ou des deux couplés dans un SIG sont présentés. L'ensemble de ces résultats permet de cerner les limites de ce type d'approche et de discuter des perspectives d'applications et des travaux à mener à cette fin.

<u>Mots clés</u> : Paramètres forestiers, biomasse, télédétection radar, pin noir d'Autriche, topographie, modèle architectural de plantes, modèle de transfert radiatif, couplage de modèles, SIG, corrections topographiques, simulation, interprétation, inversion.

Abstract

Mapping forest parameters such as aerial biomass is important for sustainable forest monitoring, and highlight forest ecosystems functioning. To this aim, SAR data offer good potentialities due to their use day and night independently of cloud cover. Cross polarized HV low frequency (P- and L-band) backscatter showed good sensitivity to forest biomass up to 200-300 m³/ha. Most of past studies were realized over "simple" forest medium (homogeneous coniferous plantations over flat terrain) and demonstrated that additional works are needed to take into account architectural tree properties and topographic effects on forest SAR backscatter. Towards the use of various SAR in various forest conditions, a better understanding of the bio-physical link between SAR backscatter and forest parameters is needed by using a theoretical electromagnetic modelling approach. However, a realistic and complete canopy architectural description for all scatterers (trunk, branches, needles or leaves) as a function of growth stage is lacking. An alternative is to develop a new approach using the architectural plant model called AMAP developed by CIRAD to derive input parameters to theoretical models.

The first goal of this thesis called "direct problem" is to improve the interpretation of wavematter interaction, using a coupling approach of the vector radative transfer model developed by MIT/CESBIO with the AMAP model. The second goal called "inverse problem" is to obtain biomass map using SAR data, AMAP or driving AMAP by parameters obtained using SAR data or other sources through a GIS. In all cases, effects of terrain slope must be addressed and removed using a SAR post-processing chain developed at LCT.

The forested area under study is mainly composed of homogeneous forest stands of Austrian pine plantations located in the central part of Lozère departement (south of France) which offer a large range of topographic situations. Various spaceborne SAR data (ERS, JERS and SIR-C) have been acquired over the test site. A GIS-based methodology was developed towards the analysis of radar backscatter for different growth stages and topographics situations. On the other hand, the forest canopy description based on the AMAP model was implemented into a new interface called AMAP2SAR.

Highest sensitivity of corrected backscatter with forest parameters related to aboveground biomass was achieved at L-HV (55°) for bole volume up to 150 m³/ha. Sensitivity was found similar to the flat terrain case, after applying specific radiometric corrections using a semiempirical angular correction model. Moreover, modeling results indicates the need to take into account the vertical variability within the canopy by using the AMAP model wich was lacking before. Else, the AMAP2SAR flexibility providing information on any part of the canopy appear to be a powerful tool to interpret forest SAR backscatter. Thus, the link between L-HV backscatter and primary branches density and diameter, wich are correlated through allometric equations to forest classical parameters such as trunk density and basal area and thus with bole volume (m^3/ha) was explicited. Also, the modelling approach helped us to refine and validate the semi-empirical angular correction model.

Finally, forest parameters inversion using SAR data, AMAP, or their coupling through a GIS are presented. Results show the potentialities and limits in using such coupled tools and leaded us to discuss the potentials of these biomass retrieval methods.

<u>Key-words</u>: forest parameters, biomass, SAR remote sensing, Austrian pine, topography, plant architectural model, radiative transfer model, method coupling, GIS, topographic corrections, simulation, interpretation, inversion.

Liminaire

Mener à bien un travail de thèse nécessite à la base la confiance de plusieurs personnes et s'inscrit généralement dans un réseau de relations tissé durant les années de recherche. Ce travail n'y échappe pas. Ainsi, rédiger ce liminaire n'est pas seulement une nécessité, c'est un devoir vis à vis de l'ensemble des personnes que j'ai eu le privilège de côtoyer durant ces trois ans et demi de thèse, devoir que j'exécute avec un très grand plaisir.

C'est en juin 1994 que j'ai eu ma première entrevue avec André Beaudoin concernant le sujet de cette thèse. Bien que je n'eusse pas fait mon DEA en télédétection radar, il m'a fait confiance et a accepté de me former aux subtilités des données radar. *A posteriori*, je me rends compte de la chance que j'ai eu d'avoir été encadré par André. Outre ses qualités humaines indéniables, c'est un scientifique de premier plan fourmillant d'idées nouvelles et toujours enthousiaste à la vue de nouveaux résultats. Il est clair que j'ai beaucoup appris à son contact et je souhaite à tout doctorant de bénéficier du même encadrement humain et scientifique, merci André.

Claude Millier n'a pas hésité à prendre la direction de cette thèse malgré les nombreuses responsabilités et activités d'un directeur scientifique de l'ENGREF. Il a assuré ce rôle avec rigueur et compétence et n'a jamais manqué de me faire des remarques constructives sur le déroulement de ce travail. Ce fut pour moi une expérience enrichissante et je l'en remercie.

J'ai apprécié au sein du "Radar team" de travailler avec Nicolas Stussi puis avec Luce Castagnas. Leurs qualités humaines associées à de fortes compétences informatiques ont été pour moi une source importante et permanente d'apprentissage, merci. Récemment, Jean-Michel Martinez est venu rejoindre le groupe en entamant une thèse dans la poursuite de ce travail. Son regard sur le travail et ses nombreuses questions ont été des plus instructifs et je l'en remercie.

Merci à Gilles Lechapt, responsable du LCT, qui m'a accueilli au sein du laboratoire et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail de recherche. Je remercie également Michel Deshayes qui a suivi avec attention l'évolution de ce travail notamment par ses "fameuses" corrections.

Ce travail à fort caractère multidisciplinaire m'a amené a travailler avec de nombreuses personnes réparties dans différentes équipes.

Ainsi, la modélisation architecturale du pin noir s'est faite en étroite collaboration avec le laboratoire AMAP du CIRAD et plus particulièrement avec Yves Caraglio, Jean-François Barczi et Daniel Barthélémy. Leur vision des plantes, l'enthousiasme avec lequel ils en parlent couplé à leurs compétences et leur gentillesse m'ont permis d'apprécier leur contact et l'intérêt de leur travaux. Merci à vous trois pour m'avoir initié a cette approche et pour la nature amicale de cette collaboration qui a toujours été sous l'œil bienveillant de Philippe De Reffye et plus récemment de François Houllier.

C'est dans le cadre d'une intense collaboration avec Nicolas Floury et Ghislain Picard de l'équipe de Thuy Le Toan au CESBIO à Toulouse que la modélisation électromagnétique a été menée. Je ne compte plus le nombre de mail que nous nous sommes échangés et les nombreuses discussions sur le modèle électromagnétique mais je vous remercie pour cette collaboration fructueuse et pour l'accueil que j'ai eu lors de mes différents séjours au CESBIO.

Merci également à Philippe Durand responsable à l'ONF de Mende des forêts domaniales de l'intérêt qu'il a d'emblée porté à ce travail en déployant une grande énergie et toutes ses compétences pour que les travaux de terrain se passent toujours dans les meilleures conditions. J'associe à ces remerciements l'ensemble des personnels de l'ONF qui ont participé aux diverses campagnes de terrain (notamment Fabrice, Alex et tous les autres).

Je remercie Nabila Hamza, Jean-Guy Boureau et Sylvie Durrieu de l'IFN pour l'accès aux données de l'IFN, pour leur suivi de ce travail et les relations amicales qui en ont découlé. Merci à Pierre Couteron qui nous a permis d'accéder aux données ENGREF.

Nicolas Stach a été un collaborateur précieux. Je le remercie vivement pour son travail et pour l'ambiance d'amitiés et de "steak hachés pâtes" de nos soirées Lozériennes. J'y associe également Emmanuel Munshinzimana qui en débutant sa thèse sur ce site d'étude a été de différentes campagnes terrain.

Je voudrais remercier Pierre Belouze pour l'intérêt qu'il n'a cessé de porté à ce travail et surtout pour la relecture serrée et pertinente qu'il a fait de ce manuscrit et les nombreuses discussions qui en ont découlé. Toutefois, c'est en tant que coach de "l'Agropolis dream team" que j'ai encore plus apprécié ses qualités humaine et son amitié, merci "magic" Pierre.

Au sein du LCT j'ai également apprécié le contact et les nombreuses discussions enrichissantes avec entre autres F. Axes, N. Desbois, S. Labbé, P. Martinand, D. Troufleau, P. Truong. Je remercie également l'ensemble des membres du labo permanent(e)s et stagiaires (que je ne citerais pas nommément par peur d'en oublier) pour nos multiples discussions portant sur des sujets divers et variés et ce au cours en particulier des pauses café, "activité clé" d'un labo de recherche.

J'aurais une pensée particulière pour Jean-Marie Fotsing, Philippe Gineste, Maud Loireau, Yann Nouvellon et Pascal Viné, compagnon(e)s de rédaction et soutien moral important de ces derniers mois. Bonne continuation à vous.

Merci à mes collègues du bureau 14, Franscico et Alice, qui ont contribué à instaurer une ambiance d'amitié et de convivialité tout au long de ces années.

Je ne saurais oublier dans mes remerciements nos deux "magiciens de l'informatique" que sont Sylvain Labbé et Laurent Albrech. Je sais ce que je leur dois et ce n'est pas peu de le dire!!! Je loue leur patience à mes nombreuses questions que je ne suis pas seul à leur poser!!! Merci les gars.

Nathalie mon épouse est au cœur de ce travail. Outre son soutien permanent malgré notre éloignement géographique, elle a été une lectrice attentive et a contribué à améliorer significativement le contenu de ce document.

Rapporter et juger une thèse est essentiel et ce n'est pas une mince affaire. Je remercie donc l'ensemble des membres du jury qui ont accepté de porter leur attention sur ce travail avec un regard critique et constructif.

Que les personnes que j'ai oublié de citer ne m'en tienne pas rigueur et encore une fois merci à vous tous.

Enfin, je remercie l'Ademe et le Cemagref pour le cofinancement de ma bourse de thèse.

Liste des abréviations et acronymes

Ademe	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AIRSAR	AIRborne Synthétique Aperture Radar
AMAP	Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes
AMI	Active Microwave Instrument
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASI	Agence Spatiale Italienne
BO	Branch Order
CEMAGREF	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique et
0110110	Développement
CN	Compte Numérique
CNES	Centre National des Etudes Spatiales
CO_2	Dioxyde de Carbone
3D	Trois dimensions
4B	Décibala
dha (au dhh)	diamètre à houtour de noitrine
	Direction Département de l'Agriculture et de le Forêt
DDAF	Direction Departement de l'Agriculture et de la Foret
aeg	Degre
DLK	Allemende)
	Allemande) Escle Matimale de Cánic Devel des Escur et des Escâte
ENGREF	Ecole Nationale du Genie Rural des Eaux et des Forets
ENL	Equivalent Number of Look
ENVISAT	ENvironment SATellite, advanced polar-orbiting Earth observation satellite
EOS	Earth Observing System
EQM	Erreur Quadratique Moyenne
ERS-1/2	Earth Ressource Satellite
ESA	European Space Agency
ESTEC	European Space research and TEchnology Center
EUFORA	European Forest Observations by Radars
FFN	Fond Forestier National
FAO	Food and Agricultural Organisation of the United Nations
GCP	Ground Control Point
Ghz	Giga Hertz
ha	hectare
HH	Horizontal polarized transmission, Horizontally polarized reception
HV	Horizontal polarized transmission, Vertically polarized reception
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut Géographique National
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
JERS-1	Japanese Earth Remote-Sensing Satellite
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LANDSAT TM	Land Satellite, capteur Thematic Mapper
LCT	Laboratoire Commun de Télédétection
LightSAR	Light Synthetic Aperture Radar, advanced imaging radar system to
	monitor Earth's surface using L-band
MGD	Multi-look Ground-range Detected
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MNE	Modèle Numérique d'Elévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASDA	National Space Development Agency (Japon)
ND	Non Déterminé
ONF	Office National des Forêts
~ 1 1 1	

PRI	PRecision Image (format d'image RSO distribué par l'ESA)
RADAR	RAdio Detection And Ranging
RADARSAT	Radar Satellite, Satellite radar canadien
RAR	Real Aperture Radar
RCS	Radar Cross Section
ROR	Radar à Ouverture Réelle
RMS	Root Mean Square
RSO	Radar à Synthèse d'Ouverture
RTM	Restauration des Terrains de Montagne
SAR	Synthetic Aperture Radar
SER	Section Efficace Radar
SIG	Système d'Information Géographique
SIR-A	Shuttle Imaging Radar-A
SIR-B	Shuttle Imaging Radar-B
SIR-C	Spaceborne Imaging Radar-C
SIRS	Système d'information à référence Spatiale
SLC	Single Look Complex
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
SRL-1	Space Radar Laboratory flight 1
SRL-2	Space Radar Laboratory flight 2
SRL-3	Proposed Future Mission Space Radar Laboratory flight 3
Торо	Topographique
UC	Unité de Croissance
UTM	Universal Tranverse Mercator
VRT	Vector Radiative Transfer
VV	Vertically polarized transmission, Vertically polarized reception
X-SAR	Antenne radar bande X

Introduction



Introduction

"Ce qui limite le vrai, ce n'est pas le faux, c'est l'insignifiant." René Thom

"Révolution" épistémologique en son temps¹, le concept de **biosphère** est à l'heure actuelle largement répandu et admis dans la communauté scientifique. Toutefois, accéder à un objet global comme la biosphère nécessite d'élaborer un champ de vision lui-même global soulevant du même coup un problème d'intégration de données interdisciplinaires. Ainsi, c'est après la première guerre mondiale que des études basées sur des scénarios concernant son avenir ont reçu une impulsion décisive, parallèlement aux progrès des moyens de calcul, et des techniques d'observation spatiale.

Dans une vision plus opérationnelle du concept de biosphère, A. J. Lotka² décrit le monde comme : "une scène à trois étages : le ciel au dessus de nous, les eaux de l'océan et sous nos pieds, la terre ferme". L'évaluation de la composition chimique de ces trois compartiments et les flux qui les relient ne sont pas que de nature physique ou thermodynamique, et montre l'importance du vivant dans les cycles biogéochimiques, de l'eau et de l'énergie.

Ces cycles sont des processus clés dans le fonctionnement de la biosphère et, s'ils sont identifiés d'un point de vue qualitatif depuis longtemps, leur quantification est problèmatique. Certains, comme le carbone, sont d'autant plus étudiés qu'ils sont directement impliqués dans les changements climatiques d'origine anthropique introduisant une distorsion dans l'équilibre global définit par F. Dyson comme :

"The three smallest and most active reservoirs (of carbon in the global carbon cycle), the atmosphere. the plants and the soil, are all of roughly the same size. This mean that large human disturbance of any one of these reservoirs will have a large effects on all three. We cannot hope either to understand or to manage the carbon in the atmosphere unless we understand and manage the trees and the soil too". Freeman Dyson, From Eros to Gaia

Le mot "trees" employé ici fait explicitement référence aux forêts, un des quatre grands biomes terrestres avec les terres cultivées, les steppes et les déserts. Celles-ci font l'objet de toutes les attentions en raison des prévisions récentes indiquant à l'échelle mondiale un accroissement de la demande en produits d'origine forestière de + 36% entre 1970 et 1994 (source FAO 1997³).

¹ Vernadsky V. (1929), "La Biosphère", Paris, Alcan

² Lotka A. J. (1925), Element of physical biology, Reprint, New York, Dover. Cité par J-P Deléage (1997), "Wladimir Vernadsky, penseur de la biosphère", Ed. Diderot, Paris.

³ FAO (1997), State of the world's forests, United Nations, Roma Italy, 200 p.

Inversement, les rapports récents de la FAO (1995⁴ et 1997) indiquent qu'entre 1990 et 1995 la ressource s'est amenuisée de façon critique dans plusieurs pays en développement avec un recul des superficies boisées de près de 65,1 millions d'hectares (près de soixante cinq fois la superficie de la forêt des Landes!) compensée par un accroissement dans les pays développés de près de 8,8 millions d'hectares.

Le bilan net reste toutefois fortement négatif (-56,3 millions d'hectares) et alarmant car outre la superficie, la perte en richesse spécifique n'a rien de comparable avec celle des Landes, soulevant également de réels problèmes.

Dans ce contexte de "crise écologique", exacerbé en cela par les incendies survenus très récemment en Asie du sud-est et en Amazonie, on peut raisonnablement penser à d'importantes répercussions socio-économiques et environnementales. Face à ce problème majeur de fin de siècle, l'inventaire de la ressource forestière, l'estimation des paramètres forestiers ainsi que le suivi de l'évolution temporelle s'avèrent nécessaires afin d'acquérir une meilleure connaissance des écosystèmes forestiers, et de contribuer à une gestion rationnelle et durable des massifs forestiers exploitables. L'accès à ces informations peut également nous aider après couplage, à initialiser des modèles climatiques et de fonctionnement des écosystèmes afin de mieux comprendre le fonctionnement global de l'écosystème "terre" et de prévoir son évolution future (en fonction notamment de perturbations d'origine climatique et/ou anthropique). Ainsi, une des questions est de savoir si la végétation, et plus particulièrement la forêt, va ralentir la croissance du gaz carbonique (CO₂) atmosphérique en piégeant davantage de carbone ou au contraire l'accélérer ?

La gestion durable des forêts apparaît donc comme une exigence nouvelle au niveau mondial comme au niveau local, qui fait surgir de nouveaux acteurs et de nouvelles attentes. A l'égal de l'eau, la forêt est l'un des principaux facteurs de régulation de la biosphère.

De ces considérations générales émerge la nécessité 1) d'obtenir des informations sur le milieu forestier (ressource, richesse spécifique...) à différentes échelles spatiales et temporelles permettant d'appréhender l'impact de phénomènes locaux sur le fonctionnement global de la biosphère, et *vice versa*, 2) d'obtenir des informations aussi précises que possible en adéquation avec les exigences des approches de gestion locale ou globale mise en œuvre.

Parmi les informations forestières intéressant la gestion durable des forêts figurent l'estimation spatialisée de paramètres de la ressource. Le terme de ressource forestière regroupe la ressource génétique et la production de bois. C'est sous cette dernière acception que sera implicitement utilisé ce terme et en particulier celle concernant le volet quantitatif (volume des arbres sur pied, surface des peuplements.....) en laissant de coté le volet qualitatif (qualité du bois....).

La pérennisation des programmes spatiaux d'observation de la terre (SPOT, LANDSAT, ERS, ENVISAT...) fait de la télédétection satellitale une approche essentielle pour répondre aux objectifs formulés de changement d'échelle. Toutefois, concernant l'estimation précise de paramètres de la ressource forestière, cela reste limité avec les

⁴ FAO (1995), Evaluation des ressources forestières, n° 112, 124 et 130, United Nations, Roma Italy.

données satellitales "classiques" optiques et thermiques. Les données récentes de télédétection radar en particulier des Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO), grâce à leur capacité de pénétration des milieux imagés, font naître des espoirs quant à l'estimation spatialisée de la ressource forestière. Ce nouveau type de données se positionne donc comme complémentaire des données satellitales existantes.

Schématiquement, on peut qualifier le radar de "sondeur" hydrique des milieux. Or, dans les milieux naturels, l'eau est confinée dans les éléments constituant ce milieu : sol et troncs, branches, aiguilles ou feuilles pour la forêt. Indirectement, le radar apparaît donc sensible aux paramètres géométriques des éléments du milieu constituant de la ressource (diamètres, longueurs, orientations...). En ce sens, des résultats ont montré *des relations quantitatives existant entre le signal radar et les paramètres mesurés de la cible*.

Inférer les paramètres de la ressource forestière à partir de données de télédétection RSO est l'archétype d'un problème inverse où les propriétés d'un milieu sont approchées sur la base des mesures réalisées sur le champ électromagnétique diffusé par le dit milieu. Se focaliser sur le problème inverse nécessite *a priori* une bonne connaissance du problème direct. Ce dernier est loin d'être bien identifié en raison de la complexité des phénomènes mis en jeu, mais il est primordial dans une optique de généralisation de l'utilisation de ce type de données de télédétection. En préalable à l'utilisation des données RSO, il convient donc de bien *comprendre ce que l'on mesure réellement* en fonction des conditions d'acquisition du signal radar et des caractéristiques forestières.

La nature des questions se posant à la télédétection radar des milieux naturels, et en particulier aux milieux forestiers concerne trois niveaux :

- le premier a trait à la *cartographie* des surfaces forestières, à l'*identification* des espèces et à leur *évolution*. Même si de bons résultats sont généralement obtenus avec les données optiques, la complémentarité entre capteurs représente un atout non négligeable surtout pour les zones fortement ennuagées. En particulier, le radar a un rôle majeur à jouer dans le suivi des forêts tropicales humides;
- le deuxième concerne une phase *exploratoire* visant à estimer la potentialité des différentes quantités radar (polarimétrique, interférométrique) dans *l'extraction quantitative* de paramètres forestiers pour différentes configurations "biotiques" (essences, architecture.....) et "abiotiques" (topographie, vent...) des cibles;
- enfin, le troisième point se situe en amont des deux précédents s'attachant à *mieux comprendre pour mieux prédire*. Il s'agit en fait, par des approches théoriques mettant en jeu des modèles de diffusion électromagnétique, *d'interpréter l'interaction* ondes-matière. Toutefois, cette démarche achoppe sur l'obtention de descriptions précises et souples du milieu en terme de distributions géométriques (taille, orientation, densité) des diffuseurs élémentaires. Cette étape est pourtant très importante dans le processus de modélisation et d'interprétation de l'écho radar des surfaces naturelles.

Ces deux derniers points font l'objet du travail présenté dans cette thèse.

Les aspects abordés ci-dessus ne donnent qu'une conception générale du problème. Le chapitre 1 de ce document s'attache donc à formaliser l'ensemble des questions et objectifs, ainsi que l'approche méthodologique générale adoptée pour y répondre. La situation de la problématique et le contexte multidisciplinaire y sont également décrits.

Puis, les différentes quantités physiques issues des RSO manipulées sont décrites dans le *chapitre 2*. Outre les données utilisées dans l'approche pragmatique (statistique) visant à caractériser les liaisons existant ou non entre ces quantités et les paramètres de la cible, les quantités intervenant dans la modélisation électromagnétique sont introduites. Les principales sources d'erreurs susceptibles d'affecter le signal sont également présentées.

Comme un préalable à l'évaluation des informations véhiculées par les images radar passe par une bonne connaissance des propriétés générales du milieu imagé, la description du site d'étude et les mesures terrain réalisées font l'objet du *chapitre 3*.

Au *chapitre 4*, une analyse pragmatique détaillée est conduite sur le comportement du signal radar en fonction des configurations de visée et de cible. Une première phase d'interprétation phénoménologique est ensuite menée sur la liaison du signal radar avec les propriétés de la cible. L'impact du paramètre perturbateur de la topographie est également présenté accompagné par le développement d'une modélisation semi-empirique et d'une phase d'interprétation phénoménologique.

De plus, la modélisation de la diffusion électromagnétique des couverts forestiers nécessite une description précise du milieu comme une collection de diffuseurs diélectriques élémentaires (cylindres, sphères...) généralement difficile à obtenir. Le *chapitre 5*, présente donc une nouvelle méthode générique, précise et souple de caractérisation "électromagnétique" du milieu forestier basée sur un modèle architectural de plantes permettant d'alimenter les modèles théoriques de diffusion électromagnétique.

Mieux comprendre les résultats expérimentaux de manière théorique, tel est l'objectif du *chapitre 6*. Après avoir défini les exigences de ce type d'approche, le modèle théorique utilisé est validé expérimentalement avant d'entreprendre une première phase d'interprétation de l'interaction des ondes électromagnétique avec le milieu forestier. Dans une deuxième phase, le modèle théorique est utilisé pour valider le modèle semi-empirique de comportement angulaire du signal radar développé pour les zones forestières situées en terrain plat et accidenté. Les configurations optimales pour l'inversion sont ensuite définies à partir d'interprétation fine de l'interaction ondes-matière.

Finalement, le *chapitre* 7 présente sur la base de l'ensemble des résultats obtenus, une phase préliminaire d'inversion du coefficient de rétrodiffusion en paramètres de la ressource forestière selon différents scénarios. Une évaluation des erreurs d'inversion est également conduite afin de cerner les avantages et limites des approches.

Chapitre 1

Présentation du travail de recherche



Chapitre 1

Présentation du travail de recherche

1.1 Situation	5
1.2 Bref état de l'art	7
1.3 Objectif des recherches	8
Problème direct Problème inverse	8 9
1.4 Approche méthodologique	9
1.4.1 Dispositif expérimental 1.4.2 Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier plat et	11
accidenté 1.4.3 Caractérisation architecturale du milieu forestier : l'interface	12
AMAP2SAR 1.4.4 Interprétation du signal radar par couplage d'AMAP et du modèle du MIT/CESPIO	13
1.4.5 Approche spatialisée d'estimation des paramètres de la ressource	13
forestière Estimation de paramètres forestiers à l'aide des données RSO Estimation de paramètres forestiers à l'aide du modèle AMAP	$14 \\ 14 \\ 14$
1.5 Contexte de l'étude	15
1.5.1 Contexte institutionnel 1.5.2 Collaborations et financement	$\begin{array}{c} 15\\ 16\end{array}$
Références bibliographiques	19

,

Chapitre 1

Présentation du travail de recherche

"La compréhension a un axe dynamique, c'est un élan spirituel, c'est un élan vital." Gaston Bachelard

1.1 Situation

Les forêts tempérées apparaissent comme des "puits" de stockage majeur du carbone terrestre (D'Arrigo et al. 1987; Tans et al. 1990). Or, ces biomes forestiers sont sensibles aux changements climatiques, en particulier aux variations de l'évapotranspiration directement reliée à l'augmentation de température et de CO_2 (Bonan et al. 1990). Selon Gates (1990), ces changements pourraient se traduire par la substitution de séries de végétation accompagnée par des migrations d'espèces vers de plus hautes latitudes. Toutefois, ces changements seront mieux approximés si l'on a accès à des informations précises sur la végétation actuelle (composition, répartition, ressource...), en d'autres termes si l'on a la possibilité d'initialiser "correctement" les modèles de fonctionnement globaux actuels (Bonan 1995). Ainsi, l'activité physiologique et le devenir de la biomasse morte sont les principaux facteurs qui déterminent les flux de carbone de la biosphère et l'accumulation et la disparition des gaz d'origine végétale (dioxyde de carbone, méthane) dans l'atmosphère. Ces processus dynamiques sont sujets à des changements en réponse à de nombreux facteurs environnementaux (température, humidité, nutriments....) et aux perturbations naturelles (chablis, attaques d'insectes....) ou anthropiques (déforestation, appauvrissement des sols...).

La caractérisation de ces biomes forestiers à différentes échelles reste néanmoins limitée et délicate, en raison de la difficulté d'obtention d'informations précises et représentatives d'une région ou d'un type d'écosystèmes particulier (Dixon *et al.* 1994; Smith *et al.* 1993). Si les expérimentations terrain permettent de les approcher, leur mise en œuvre est lourde, coûteuse en temps de travail et comporte souvent des difficultés pour accéder au site d'étude et pour spatialiser l'information récoltée.

Parmi les outils susceptibles de contourner ces limitations de caractérisation de peuplements forestiers, figure la télédétection satellitale optique et radar couplée aux systèmes d'information géographique (SIG). Grâce à la vision synoptique, la répétitivité assurée par la transparence de l'atmosphère de jour comme de nuit pour le radar et la sensibilité à certaines caractéristiques des couverts végétaux, la télédétection satellitale présente un potentiel élevé pour l'obtention de données spatialisées utiles sur les écosystèmes forestiers. A des fins d'applications, cette information spatialisée prend toute sa valeur lorsqu'elle est intégrée dans un SIG, en synergie avec des données issues d'autres sources. En ce sens, Kasischke and Christensen (1990), Ustin *et al.* (1991) et plus récemment Field *et al.* (1995), Schimel (1995) ont proposé des approches de couplages des données de télédétection optique et radar avec **des modèles écologiques** à des fin de simulation de succession de végétaux, de production primaire nette ou de flux de carbone. Le jeu de paramètres requis par les modèles écologiques, de transfert biosphèreatmosphère ou d'échange de carbone peut se diviser en deux groupes (Hall *et al.* 1995) :

1. la composition des communautés végétales selon une certaine typologie (les forêts de conifères, de feuillus, la toundra...);

2. la structure et les caractéristiques des communautés au travers, entre autres, de la biomasse, du LAI (*Leaf Area Index*), de la densité ou encore de la FPAR (*Fraction of incident Photosynthetically Active Radiation absorbed by canopy*)...

Outre l'aspect de paramétrisation des modèles écologiques, les résultats de l'inversion des données de télédétection peuvent également servir pour l'évaluation et la comparaison des sorties des modèles d'écosystèmes terrestres concernant en particulier leur productivité (Bergen *et al.* 1998).

Le caractère intégrateur des problématiques liées aux variations des écosystèmes forestiers tempérés en liaison avec les changements climatiques globaux peut apparaître à première vue éloigné des préoccupations du gestionnaire forestier. Néanmoins, cette dimension commence à l'heure actuelle à être prise en compte explicitement par les gestionnaires de l'Office National des Forêts (ONF) se traduisant en particulier par des inflexions qu'il est souhaitable d'opérer au niveau de la sylviculture :

"Les résultats régulièrement fournis par l'Inventaire Forestier National (IFN) permettent d'évaluer, par département ou groupe de départements, la production biologique des forêts domaniales et communales et d'apprécier son évolution d'un cycle d'inventaire à l'autre.

Dans la quasi-totalité des cas, la comparaison indique une nette augmentation de cette production. (La somme des résultats départementaux obtenus lors du premier cycle d'inventaire donne, avant toute actualisation, une production biologique de plus de 8,6 millions de m³ pour l'ensemble des forêts domaniales et 12,1 millions de m³ dans les forêts des collectivités). Si une partie de cette progression résulte de l'évolution des types de peuplement (augmentation des surfaces en futaie), l'essentiel provient **d'une augmentation généralisée de la croissance des forêts, en liaison avec les modifications de leur environnement**. Ce fait aujourd'hui établi fait l'objet du Bulletin Technique n° 29 sur le CO_2 et la forêt.

Il est donc indispensable que les forestiers prennent en compte ces phénomènes dans leurs opérations sylvicoles, notamment dans les programmes et la désignation des coupes. La présente note de service définit les premières mesures d'adaptation à prendre dès maintenant."

(ONF, note de service n°96-G697 du 11 janvier 1996 de la DTC.2)

Ces chiffres globaux donnés dans la citation cachent des disparités d'accroissement en fonction des peuplements forestiers (essence, structure, sylviculture..), de leurs fonctions (protection, production), et de leur localisation (plaine, montagne..). On peut également raisonnablement penser qu'au sein même de massifs forestiers, les réponses ne soient pas homogènes suivant les stations forestières. La dimension spatiale de cette répartition doit être intégrée dans une gestion raisonnée et cohérente des écosystèmes forestiers. Cette démarche de spatialisation s'insère dans une démarche générale dans laquelle la télédétection satellitale a un rôle prépondérant à jouer en complément des méthodes classiques d'inventaires, en particulier pour l'actualisation des bases de données spatiales (SIG).

1.2 Bref état de l'art

Si la télédétection satellitale a montré sa capacité à générer des cartes d'occupation du sol avec des précisions acceptables pour différentes échelles, sa capacité à quantifier les caractéristiques (ex : paramètres de la ressource) des différents thèmes restait relativement limitée avec les données optiques classiques, et a pu s'élargir avec les données radar. L'arrivée récente de capteurs radar spatiaux (ERS-1, ERS-2, SIR-C/X-SAR, J-ERS-1 et RADARSAT-I) ainsi que la planification et la mise en service d'autres capteurs radar dans un avenir proche (ASAR, RADARSAT II et III, JERS-2, LIGHTSAR) offrent des configurations radar permettant d'envisager des applications intéressantes en milieu forestier (Le Toan 1992; Way et al. 1990). L'intérêt réside surtout dans la sensibilité au biovolume des couverts, grâce au pouvoir pénétrant des ondes basses fréquences (bande L de J-ERS-1 et LIGHTSAR ou probablement RADARSAT III). Cependant, les meilleures données RSO spatiales permettant d'évaluer l'apport des données RSO pour ce type d'application sont sans aucun doute celles fournies par SIR-C/X-SAR, acquises lors de 2 missions en 1994. Malgré la brièveté de ces missions, leur configuration multi-fréquences, polarimétrique (SIR-C) et multi-incidences permet d'aborder la détermination de configurations optimales réalisables depuis l'espace dans un avenir plus ou moins proche.

La possibilité d'estimer des paramètres forestiers à partir de données RSO passe par des analyses statistiques et, mieux, par la connaissance du **lien physique** existant entre le signal mesuré et les paramètres d'intérêt. En effet, compte tenu du nombre important de paramètres affectant le signal radar, ce lien est perturbé par exemple par la structure du couvert et la topographie, et l'approche statistique ne permet qu'une interprétation limitée (Beaudoin 1992). Entre autres, concernant la topographie, son impact n'est pas anecdotique si l'on considère que près de 40% de la forêt française hors peupleraies ($\approx 5,4$ millions d'hectares) se situe sur des pentes de plus de 8% (IFN 1994), ou encore 50% des forêts exploitables canadiennes se situent en régions montagneuses (Guindon *et al.* 1982). Ainsi ce problème doit être abordé et analysé.

Il est donc judicieux, dans un souci de généralisation de l'utilisation des données satellitales radar pour inférer les paramètres forestiers, d'utiliser une approche de modélisation théorique basée sur des données expérimentales. Les modèles théoriques du type transfert radiatif ou cohérent (*full wave*) sont arrivés à des degrés de développement assez avancés pour appréhender le comportement radar de plusieurs situations forestières rencontrées (peuplement homogène ou non, peuplement mixte, couvert discontinu, terrain plat ou accidenté.....). Après une phase de validation, ces modèles permettent de décomposer les contributions des mécanismes de rétrodiffusion, et d'identifier pour chacune d'elles les principales sources de diffusion (tronc, différents ordres de branches, aiguilles), à mettre ensuite en relation avec les paramètres forestiers d'intérêt.

La finesse des descriptions du milieu utilisées par ces modèles est un frein majeur à leur utilisation. Ces descriptions sont dictées par le type d'approche utilisé par le modèle, ce qui laisse peu de place pour tester des idées et des hypothèses. Un besoin en description spécifique précise et souple du milieu se fait sentir pour passer à une étape supérieure d'interprétation de l'interaction ondes-matière, que ce soit en terrain plat ou accidenté. Un couplage des modèles théoriques avec des modèles architecturaux de croissance du type AMAP (Reffye de *et al.* 1997) prend ici tout son sens. On peut qualifier cette voie de prometteuse comme l'avait mentionné précédemment Mougin (1989).

Des études menées durant les 10 dernières années ont démontré le potentiel élevé des données radar pour 1) l'estimation de la biomasse ligneuse à l'aide de données basses fréquences (bandes P et L) et 2) la discrimination des types de formations forestières à l'aide de données multi-configurées. Nous ne nous intéressons ici qu'au premier point qui fait l'originalité des données radar. En vue d'applications de ces données en situations forestières représentatives (forêts tempérées et boréales), parmi les principales questions restant à élucider figurent :

- l'impact de la topographie (pente et azimut);
- l'impact du type de peuplement (essence et structure);
- l'impact des conditions météorologiques (humidité et précipitations..).

Un état de l'art plus détaillé sera abordé au Chap. 4. Malgré des résultats très intéressants, ces études étaient jusqu'à présent limitées surtout à des plantations de résineux en terrain plat (Dobson *et al.* 1992; Le Toan *et al.* 1992). Des études de sensibilité ont démontré que le type de peuplement (architecture d'une essence donnée et structure du peuplement) et la topographie sont des paramètres à appréhender pour l'inversion en biomasse (Beaudoin *et al.* 1994). Cependant, peu d'études ont permis d'observer expérimentalement et de modéliser les effets de ces paramètres.

De façon plus large, le potentiel des données RSO reste moins connu que celui des données de télédétection optique (Holmes 1992). Ainsi, l'expérimentation radar SIR-C/X-SAR à laquelle nous avons participé a été le moyen de se focaliser, entre autres, sur la détermination des configurations optimales (incidence, fréquence et polarisation) pour le futur dans différentes applications disciplinaires : écologie, géologie, hydrologie, océanographie, ainsi que pour l'étalonnage des données et la modélisation électromagnétique (Stofan *et al.* 1995). Dans le domaine écologique forestier, l'emphase a été mise en particulier sur la sensibilité aux bio-volumes en liaison avec les effets perturbateurs mentionnés ci-dessus.

1.3 Objectif des recherches

Les objectifs de cette thèse s'insèrent dans une problématique générale d'estimation de paramètres de la ressource forestière (bio-volume ligneux sur pied et compartimenté) par télédétection RSO. Ces objectifs peuvent se décliner selon :

1. d'une part, le <u>problème direct</u> de meilleure compréhension du contenu informatif du signal radar en termes de paramètres liés à la ressource forestière, et la façon dont ce contenu est modifié en présence de topographie,

2. d'autre part, le <u>problème inverse</u> d'estimation spatialisée de paramètres forestiers à partir de données RSO.

Problème direct

Il s'agit dans un premier temps d'étudier la nature du lien existant entre l'écho radar et les propriétés de la cible (peuplements forestiers) d'un point de vue pragmatique (analyse statistique) en prenant en compte les effets perturbateurs liés à la topographie.

Dans un deuxième temps, cela consiste à interpréter l'interaction ondes-matière par le biais du couplage d'un modèle architectural de plante avec un modèle théorique de diffusion électromagnétique, afin d'identifier, plus clairement que ce qui a été fait par le passé, ce que l'on mesure effectivement. Ce point s'accompagne également de l'interprétation de l'impact de la topographie sur l'interaction.

Problème inverse

Dans ce cas, cela concerne le développement et l'essai de méthodes de spatialisation de paramètres de la ressource forestière par différentes voies intégrées au sein d'un SIG, et mettant en jeu différents outils que sont la télédétection RSO et le modèle architectural de croissance d'arbre AMAP.

Finalement, il s'agit d'esquisser un cadre méthodologique (intérêts et limites) de cartographie de paramètres de la ressource forestière intégrant ces divers outils.

Ce travail de recherche, se situant dans la ligne droite des travaux exposés dans la thèse de doctorat du Dr. A. Beaudoin (Beaudoin 1992), fait appel aux hypothèses issues de ces travaux et d'autres récents précédemment cités, selon lesquelles l'écho radar est lié à certains paramètres du couvert, reliés eux-mêmes à la biomasse ligneuse. Cependant, cette double liaison reste à éclaircir, et elle est perturbée par la topographie. Nous avons donc posé comme hypothèses de base à ce travail de thèse la possibilité :

- d'utiliser AMAP comme source de description du milieu forestier nécessaire aux modèles de diffusion électromagnétique, à des fins d'interprétation fine du lien entre l'écho radar et les paramètres forestiers ;
- d'interpréter et de modéliser de façon semi-empirique les effets perturbateurs de la topographie sur le signal, ceci afin de s'en affranchir;
- d'associer les divers outils que sont le SIG, les images RSO et le modèles AMAP dans une démarche d'inversion pour la spatialisation de paramètres forestiers.

1.4 Approche méthodologique

La démarche adoptée par rapport aux travaux antécédents est de type ascendante (bottom-up), visant ici à partir d'une situation "simple" à mieux comprendre la liaison signal radar-paramètres forestiers en terrain accidenté, pour pouvoir l'extrapoler ensuite à des situations variées plus complexes. Le site choisi présente la particularité d'être composé essentiellement de peuplements homogènes équiennes monospécifiques de pins noirs d'Autriche (*Pinus nigra* Arn. ssp. *nigricans* Host.) situés en conditions topographiques variées (département de la Lozère, région des grands Causses).

La méthodologie développée dans le cadre de cette étude est basée sur la mise en place d'un SIG à partir duquel l'ensemble des manipulations et des extractions de l'information sont réalisées. Le SIG tient une place centrale dans notre dispositif car il nous permet, entre autres, d'intégrer d'une part l'information géolocalisée issue des images radar corrigées, et d'autre part l'information expérimentale permettant leur mise en correspondance afin de réaliser l'analyse données radar-données terrain (paramètres forestiers, topographie...). L'approche générale est reprise en détail à la Figure 1-1 et synthétise les principales étapes de ce travail, où un chapitre correspond à une étape.



Figure 1-1 : Approche méthodologique générale adoptée durant le travail de recherche, A) problème direct, B) problème inverse.

1.4.1 Dispositif expérimental

Cette étape, cruciale dans un travail de télédétection, vise à caractériser les conditions de l'expérimentation pour la mise en relation des données terrain et de télédétection au travers d'un SIG afin de faire émerger les liens existants. Une bonne connaissance du site est également un préalable à la compréhension des informations véhiculées par le signal radar. Trois principaux points composent cette étape :

1. le premier a consisté à compiler des données existantes complétées par des campagnes de mesures, afin de caractériser les paramètres de la ressource forestière et les paramètres botaniques de calage du moteur architectural de croissance AMAP;

2. le deuxième s'est attaché à identifier et à post-traiter (corrections radiométriques et géométriques) les données de télédétection radar acquises sur le site d'étude;

3.le dernier point concerne la constitution d'une base de données géographiques sous la forme d'un SIG permettant de mettre en correspondance l'ensemble des données recueillies sur le site.

L'appréhension d'informations forestières spatialisées, liées à la notion de ressource en bois, amène à s'intéresser aux 4 niveaux schématisés à la Figure 1-2. Dans le cadre de l'approche, l'échelle de la parcelle a été le point d'entrée pour le radar, vu sa résolution décamétrique (20-30m) et les particularités du signal radar ne permettant de travailler qu'à l'échelle de l'hectare. Quant à la caractérisation des paramètres de la ressource à l'aide de mesures de terrain et du modèle AMAP, elle se fait à l'échelle de l'arbre dans ses conditions stationnelles, et une intégration spatiale doit être faite afin de travailler à l'échelle d'observation du radar. Et enfin, l'intégration à l'échelle supérieure d'une forêt est réalisée au travers de l'information spatialisée que sont les images radar dans le SIG, aboutissant à la caractérisation d'un ensemble de parcelles forestières représentatives d'une forêt

Ces échelles ne sont pas indépendantes, et c'est sciemment qu'aucune liaison entre ces différents niveaux n'est figurée en raison de l'imbrication et de la nature de ces articulations qui ne sont pas résolues, se trouvant au cœur de questions scientifiques et techniques actuelles. Les données expérimentales ont donc concerné les deux échelles les plus fines, l'approche spatiale permettant ensuite d'intégrer ces niveaux de manière à passer au niveau de la forêt.


Figure 1-2 : Emboîtement des échelles spatiales en foresterie (d'après Houllier 1992).

1.4.2 Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier plat et accidenté

L'analyse s'effectue par la confrontation des différentes sources de données intégrées au sein du SIG permettant :

• tout d'abord, grâce aux spécificités du site d'étude et à la chaîne de posttraitement des images RSO acquises en terrain accidenté, d'étudier l'effet perturbateur de la topographie, afin de développer un modèle empirique de comportement angulaire du signal radar. Ce modèle est ensuite utilisé pour corriger les images radar dans le but de dériver des modèles statistiques liant les données radar aux paramètres de la ressource forestière;

• de quantifier la sensibilité aux paramètres de la ressource forestière d'intérêts pour différentes configurations radar (fréquence, polarisation, incidence).

Enfin, les deux points précédents sont étayés par une première phase d'interprétation phénoménologique visant à expliciter qualitativement la nature des liens existant entre l'écho radar et les paramètres forestiers, ainsi que la façon dont ce lien est perturbé par la topographie.

Toutefois, la détermination des possibilités de généralisation du modèle de correction angulaire et des lois statistiques pour l'inversion en paramètres forestiers nécessite une interprétation de nature plus physique. Celle-ci repose sur l'utilisation d'un modèle de diffusion électromagnétique basé sur les équations du transfert radiatif. Malheureusement, ces modèles sont gourmands en paramètres d'entrée (géométriques et diélectriques) permettant une description "électromagnétique" du milieu forestier sur laquelle se fonde les calculs de diffusion. Pour cela, l'étape suivante de la méthodologie s'est axée sur la modélisation architecturale du milieu forestier et le développement d'une interface spécifique permettant d'alimenter le modèle de diffusion électromagnétique du MIT/CESBIO (Hsu *et al.* 1994).

1.4.3 Caractérisation architecturale du milieu forestier : l'interface AMAP2SAR

Parmi les différentes voies de caractérisation du milieu forestier, la modélisation architecturale et en particulier le modèle architectural de plantes AMAP (Reffye de *et al.* 1997) apparaît des plus prometteurs pour répondre aux besoins de caractérisation électromagnétique nécessaire au modèle théorique.

Les mesures botaniques et architecturales sont à la base du paramétrage du moteur de croissance AMAP simulant la croissance et l'architecture des arbres. Ce moteur est intégré dans une nouvelle interface appelée AMAP2SAR développée dans le cadre de ce travail. Elle permet dans un premier temps la simulation d'arbres représentés sous la forme de fichiers numériques et de maquettes 3D, à partir desquels l'extraction d'informations "électromagnétiques" de nature géométrique peut s'opérer. Ces informations sont comparées dans une phase de validation aux données dendrométriques de terrain.

Dans un deuxième temps, les maquettes d'arbres validées sont utilisées pour caractériser précisément la géométrie et l'architecture du milieu afin d'alimenter les modèles théoriques. Les résultats de simulations issues d'AMAP2SAR peuvent directement être utilisés comme description du milieu. Toutefois, le niveau de caractérisation architecturale atteint est trop élevé pour les modèles théoriques actuels, nécessitant le passage par une phase de simplification du milieu. A l'issue, les statistiques des paramètres géométriques sont calculées sur un jeu de simulations d'arbres 1) de même âge visant à reproduire la variabilité interne aux peuplements, et 2) d'âges différents pour reproduire la dynamique des paramètres forestiers sur le site.

1.4.4 Interprétation du signal radar par couplage d'AMAP et du modèle du MIT/CESBIO

Faisant suite à l'analyse statistique et à la caractérisation "électromagnétique" du milieu forestier, l'étape de modélisation théorique vise à interpréter l'interaction du signal radar avec le milieu forestier, par une approche originale **de couplage avec AMAP** via l'interface AMAP2SAR. Le modèle théorique simule le coefficient de retrodiffusion qui est ensuite comparé avec celui issu des images.

Le modèle validé de la meilleure façon possible est ensuite utilisé pour :

- affiner l'interprétation ondes-milieu forestier en:

• décomposant les mécanismes de rétrodiffusion et identifiant les principales sources de la diffusion des ondes;

• étudiant l'impact de l'hétérogénéité verticale du couvert forestier par la génération de profils verticaux de rétrodiffusion;

- étudier la sensibilité du signal radar à la topographie pour tenter de valider le modèle angulaire empirique utilisé dans la correction des images RSO. La sensibilité aux paramètres géométriques permet 1) d'identifier la nature du lien existant entre l'écho radar et le milieu forestier, et 2) de dégager les configurations radar optimales pour estimer les paramètres de la ressource forestière en terrain plat et accidenté. L'objectif final de l'interprétation est guidé par le développement d'un modèle d'inversion optimisé vis-à-vis des paramètres perturbateurs, qui soit validé par la théorie et portable à d'autres conditions forestières.

1.4.5 Approche spatialisée d'estimation des paramètres de la ressource forestière

Après être allé le plus loin possible au niveau du problème direct, une phase préliminaire de spatialisation de la ressource forestière a été envisagée selon deux principaux scénarios, un premier utilisant les données RSO intégrées dans le SIG, un deuxième basé sur le modèle architectural de croissance AMAP seul ou couplé avec les données RSO au sein du SIG. En effet, outre son utilisation dans le problème direct, le modèle AMAP peut aussi être utilisé pour dériver des paramètres forestiers de la ressource. Le but ici est d'explorer l'intérêt et la complémentarité de ces scénarios de spatialisation par rapport à des méthodes existantes d'échantillonnage.

Estimation de paramètres forestiers à l'aide des données RSO

Les modèles théoriques en l'état n'étant pas inversibles, on a recours pour l'inversion à des modèles au mieux semi-empiriques, ou bien statistiques validés par la théorie. L'inversion d'images radar permet de générer une carte du paramètre forestier d'intérêt. Cette carte est en soi un premier résultat très intéressant, complémentaires des méthodes classiques d'inventaires basées sur un dispositif de placettes sur une maille plus ou moins dense.

Estimation de paramètres forestiers à l'aide du modèle AMAP

Une autre approche consiste à utiliser le modèle AMAP, qui n'est pas un modèle spatialisé en soi, piloté *via* le SIG par les données de terrain permettant d'estimer des paramètres classiques ou non conventionnels de la ressource forestière. Toutefois, les données spatialisées de terrain ne sont pas toujours disponibles.

Une voie alternative consiste à utiliser les cartes de paramètres forestiers obtenues par inversion des données RSO pour piloter en synergie avec d'autres informations (densité de tiges) le modèle AMAP, permettant de générer des cartes de paramètres forestiers classiques et non conventionnels (bio-volume compartimenté, architecture, etc..).

Pour chacun de ces scénarios, la quantification des erreurs d'estimation est réalisée par comparaison aux mesures de terrain, afin de définir leurs intérêts et limites permettant de poser un cadre préliminaire de spatialisation de certains paramètres de la ressource forestière.

1.5 Contexte de l'étude

1.5.1 Contexte institutionnel

Ce travail, réalisé au LCT (Laboratoire Commun de Télédétection) sous la supervision scientifique du Dr A. Beaudoin, s'inscrit dans une démarche générale ayant eu cours ces dernières au sein du LCT quant aux travaux de télédétection et est illustrée à la Figure 1-3, déclinée pour le cas de notre étude radar. Elle vise à fournir dans les domaines de compétence des deux tutelles du LCT, l'ENGREF et le Cemagref, une information spatialisée intégrable dans un SIG, afin d'alimenter en synergie ou en complémentarité avec des données classiques, des modèles thématiques existants ou nouveaux selon les besoins exprimés par des utilisateurs potentiels ou clairement ciblés.

Pour un type de données, comme ici les données RSO, cela passe par 1) des traitements adaptés permettant d'obtenir des données "propres" ayant un contenu informatif au vu de la thématique abordée, et 2) le développement et la validation de modèles d'inversion spatialisés (au sens cartographique) permettant de remonter à une variable thématique d'intérêt. Le laboratoire s'efforce de valoriser cette démarche par l'utilisation concrète de ces variables dans des modèles thématiques spatialisés en partenariat si possible avec leurs utilisateurs, comme par exemple pour des modèles hydrologiques, de productivité forestière, de risques d'incendie, etc.

Dans le cas des données RSO beaucoup plus récentes que les données optiques et infrarouges, et vu leur potentiel entrevu sur les milieux forestiers à condition d'avoir à terme des configurations RSO adaptées qui ne sont malheureusement pas encore accessibles depuis des satellites (elles le sont depuis un avion mais les coûts demeurent hors de prix), nous nous sommes positionnés en amont sur les points 1) et 2) ci-dessus, ce qui confère aux travaux un **caractère essentiellement exploratoire de type veille technologique** un peu inhabituel au sein du LCT. Ce positionnement était d'autant plus justifiable que la recherche en télédétection, en particulier dans le domaine radar, a été ces dernières années fortement pilotée par les agences spatiales française (CNES) et européenne (ESA) (projets-pilotes, financement de la R&D, etc).

Pour le point 1), il s'agit comme nous l'avons vu de développer des traitements du relief adaptés n'existant pas encore dans les logiciels commerciaux de traitement d'images, et pour le point 2), de contribuer au développement d'un modèle d'inversion du signal radar en paramètres indicateurs de la ressource forestière. Nous entendons ici soit des paramètres classiques quantifiant la ressource sur pied comme le diamètre des tiges, le biovolume et la biomasse, ou éventuellement d'autres de type fonctionnel par exemple (variable du fonctionnement écosystémique du milieu forestier comme le LAI, etc ...). Vu le positionnement amont par rapport à l'ensemble des utilisateurs potentiels ou réels, nous les considérons à ce stade-ci comme des variables génériques pouvant trouver un intérêt à la fois dans des problématiques de gestion et d'inventaire de la ressource, et de problèmes environnementaux de type changements globaux. Ainsi, nous ne nous sommes pas attachés directement à l'utilisation qui peut être faite des paramètres forestiers estimés, qui semblait suffisamment large *a priori* pour justifier ce type de travaux au sein d'un organisme de recherche appliquée et de transfert comme le Cemagref.

Il est à noter que cette démarche est parallèle et similaire à celle adoptée par le laboratoire dans le domaine optique et infrarouge toujours sur les milieux forestiers. L'ensemble s'inscrit dans l'activité « Inventaire et suivi des couverts forestiers » du LCT, et dans le programme P1 du Département Gestion du Territoire du Cemagref : Gestion des écosystèmes forestiers et pastoraux. Les travaux menés ici pourraient intéresser d'autres programmes, ou d'autres divisions du Cemagref, dont celle des Ecosystèmes et paysages montagnards (forêt de montagne).



Figure 1-3 : Intégration du sujet dans la démarche du LCT dans l'obtention et l'utilisation de l'information spatialisée obtenue par télédétection en vue de l'intégration dans un SIG.

1.5.2 Collaborations et financement

Considérant le positionnement amont et la méthodologie mise en œuvre, les travaux ont été réalisés dans le cadre de collaborations, la plupart nouvelles et démarrées *via* cette thèse, avec quatre principaux partenaires :

- 1) l'équipe de modélisation de l'architecture des plantes AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes) du CIRAD-AMIS à Montpellier ;
- 2) l'équipe radar de modélisation électromagnétique du CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère) à Toulouse ;
- 3) le service départemental de la Lozère de l'ONF (Office National des Forêts) à Mende (dans le cadre d'un accord-cadre existant avec le Cemagref) ;
- 4) la cellule d'évaluation de la ressource de l'IFN (Inventaire Forestier National) basée à Maurin à proximité de Montpellier, qui fut l'occasion de mettre en place un accord-cadre de collaboration.

Ces collaborations peuvent se scinder en deux types :

• "amont", avec les équipes d'AMAP et du CESBIO basées sur des approches théoriques et expérimentales reposant sur des modèles existants et améliorés dans le cadre de ce travail; • "aval", avec les organismes en charge d'inventaire (IFN) et de gestion forestière (ONF) utilisateurs potentiels se positionnant au départ comme observateurs, en prise directe avec la réalité de terrain. Ces organismes ont permis aussi la compilation et l'acquisition de données expérimentales accompagnées par une expertise forestière dans le cas de l'ONF.

Ces collaborations se déclinent de façon différente selon les différentes étapes exposées de la démarche (Figure 1-1). Le Tableau 1-1 présente un synopsis des contributions respectives des différents collaborateurs en fonction des chapitres, afin d'en avoir la meilleure lisibilité possible. Il permet ainsi de faire la part du LCT, par rapport à celles des collaborateurs.

Ainsi, l'équipe AMAP dirigée par le Dr. F. Houllier qui vient de succéder au Dr. Ph de Reffye est intervenue à trois niveaux concernant, 1) la prise de mesures botaniques, leur dépouillement et l'analyse, 2) le paramétrage du moteur de croissance AMAP et le développement de l'interface AMAP2SAR, 3) la simulation 3D de paysage forestier.

Le groupe du CESBIO, dirigé par le Dr. T. Le Toan a travaillé sur 1) les améliorations et innovations à apporter au modèle du MIT, 2) la simulation et la validation de ce modèle et 3) l'interprétation physique de l'interaction ondes-matière.

Le service départemental de l'ONF à Mende (Lozère) en la personne de Mr. P. Durand avait en charge une part du support logistique et la constitution de la base de données ayant servit d'assise au SIG, qui en retour leur sera transféré. L'ONF a également été un support d'expertise forestière.

Finalement, la cellule ressource de l'IFN en la personne de Mme N. Hamza a assuré la fourniture de base de données dendrométriques sur le site. La cellule télédétection de l'IFN constituée des Drs. S. Durrieu et J. G. Boureau a contribué à la fourniture des photos aériennes accompagnée d'une expertise en photo interprétation de la zone d'étude.

Financièrement, les travaux ont pu être réalisés grâce à de nombreuses contributions qui sont principalement :

- une bourse de thèse du Cemagref co-financée par l'Ademe (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), d'une durée de trois ans ;
- un financement du CNES dans le cadre du programme AVALSAR qui s'est terminé depuis ;
- un financement du Programme National de Télédétection Spatiale ;
- et surtout, un projet européen dénommé *EUFORA (European Forest Observations by Radars*), dans le cadre du 4^{ième} PCRD (Programme Cadre de Recherche et Développement) de l'Union Européenne, et dirigé par le Dr. Thuy Le Toan du CESBIO.

Quant aux données, elles ont été obtenues principalement dans le cadre de projets-pilotes sur appel d'offre de l'ESA (ERS) et de la NASA (JPL pour les données SIR-C).

CHAPITRES	LCT	CIRAD-AMAP	CESBIO	ONF	IFN
3 Dispositif exnérimental	 Logistique Mesures terrain Dépouillement et analyse Intégration SIG 	 Mesures botaniques Dépouillement et analyse Interprétation 		 Expertise forestière Support logistique Bases de données 	 Base de donné Couverture aérienne
		Y. Caraglio D. Barthélémy		P. Durand J. P. Laganne	N. Hamza, S. Di J. G. Boureau
4 Analyse statistique	 Post-traitement RSO Analyse et modélisation Interprétation phénoménologique 				
5 Modélisation architecturale <i>AMAP</i>	 Développement AMAP2SAR Simulation et validation maquettes d'arbres Extraction paramètres électromagnétiques 	 Paramétrage AMAPsim Développement AMAP2SAR Simulation et validation maquettes d'arbres V Caraolio 			
		J. F. Barczi			
6 Modélisation radar <i>MIT/CESBIO</i>	 - Caractérisation électromagnétique du milieu - Validation modèle - Interprétation phénoménologique - Modélisation semi-empirique 		 Amélioration du modèle MIT/CEBIO Simulations et validation du modèle Interprétation électromagnétique 		
			N. Floury, G. Picard T. Le Toan		
7 Spatialisation paramètres de la	 Cartographie paramètres forestiers Simulation 3D paysage forestier 	- Simulation 3D paysage forestier dans le SIG			
ressource		F. Borne			

Tableau 1-1 : Contribution des collaborateurs.

1

T

Références bibliographiques

- Beaudoin, A. (1992). "Observation de la terre par radar imageur : estimation de la biomasse forestière", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 172p.
- Beaudoin, A., Le Toan, T., Goze, S., Nezry, E., Lopes, A., Mougin, E., Hsu, C. C., Han, H. C., Kong, J. A., and Shin, R. T. (1994). "Retrieval of forest biomass from SAR data." International Journal of Remote Sensing, 15(14), 2777-2796.
- Bergen, K. M., Dobson, M. G., Pierce, L. E., and Ulaby, F. T. (1998). "Characterizing carbon in northern forest by using SIR-C/X-SAR imagery." *Remote Sens. Environ.*, 63, 24-39.
- Bonan, G. B. (1995). "Land-atmosphere interactions for climate system models : coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes." *Remote Sens. Environ.*, 51, 57-73.
- Bonan, G. B., Shugart, H. H., and Urban, D., L. (1990). "The sensitivity of some high-latitude borel forests to climatic parameters." *Climatic change*, 16, 9-29.
- D'Arrigo, R., Jacoby, G. C., and Fung, I. Y. (1987). "Boreal forest and atmosphere-biosphere exchange of carbon dioxide." *Nature*, 329, 321-323.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C., and Wisniewski, J. (1994). "Carbon pools and flux of global forest ecosystems." *Science*, 263, 185-190.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. S., and Christensen Jr., N. L. (1992). "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 412-415.
- Field, C. B., Randerson, J. T., and Malmström, C. M. (1995). "Global net primary production : combining ecology and remote sensing." *Remote Sens. Environ.*, 51, 74-88.
- Gates, D. M. (1990). "Climate change and the response of forest." International Journal of Remote Sensing, 11(7), 1095-1107.
- Guindon, B., Goodenough, D. G., and Teillet, P. M. (1982). "The role of digital terrain models in the remote sensing of forests." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(1), 4-16.
- Hall, F. G., Townshend, J. R., and Engman, E. T. (1995). "Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters." *Remote Sens. Environ*, 51, 138-156.
- Holmes, M. G. (1992). "Monitoring vegetation in the future : radar." Botanical journal of the Linnean Society, 108, 93-109.
- Houllier, F. (1992). "Analyse et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers. Applications à la gestion des ressources forestières," HDR, ENGREF/INRA, Nancy, 73p.
- Hsu, C. C., Han, H. C., Shin, R. T., Kong, J. A., Beaudoin, A., and Le Toan, T. (1994). "Radiative transfer theory for polarimetric remote sensing of pine forest at P band." International Journal of Remote Sensing, 15(14), 2943-2954.
- IFN. (1994). Atlas forestier. La gestion durable des forêts françaises, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, Paris.
- Kasischke, E. S., and Christensen, J., N. L. (1990). "Connecting forest ecosystem and microwave backscatter models." *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), 1277-1298.
- Le Toan, T. (1992). "Radar remote sensing of vegetation." Remote Sensing Applications, 260-264.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., and Guyon, D. (1992). "Relating forest biomass to SAR data." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30(2), 403-411.
- Mougin, E. (1989). "Télédétection de la végétation par micro-ondes. Mesure et modélisation des effets des paramètres du couvert sur la propagation et la rétrodiffusion des ondes radar", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, ENSAT, Toulouse, 227p.
- Reffye de, P., Houllier, F., Blaise, F., Barthélémy, D., Dauzat, J., and Auclair, D. (1997) "Modélisation et simulation de la croissance d'une architecture végétale : une approche morphogénétique expérimentale." *Tendance nouvelles en modélisation pour l'environnement*, 91-112.
- Schimel, D. S. (1995). "Terrestrial biogeochemical cycles : global estimates with remote sensing." Remote Sens. Environ, 51, 49-56.
- Smith, T. M., Cramer, W. P., Dixon, R. K., Leemans, R., Neilson, R. P., and M., S. A. (1993). "The global terrestrial carbon cycle." Water, Air, and Soil Pollution, 70, 19-37.
- Stofan, E. R., Evans, D. L., Schmullius, C., Holt, B., Plaut, J. J., van Zyl, J. J., Wall, S. D., and Way, J. B. (1995). "Overview of results of Spaceborne Imaging Radar-C, X-band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR)." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 817-827.
- Tans, P. P., Fung, I. Y., and Takahashi, T. (1990). "Observational constraints on the global atmospheric CO2 budget." *Science*, 247, 1431-1438.
- Ustin, S. L., Wessman, C. A., Curtiss, B., Kasischke, E. S., B., W. J., and Vanderbilt, V. C. (1991). "Opportunities for using the EOS imaging spectrometers and synthetic aperture radar in ecological models." *Ecology*, 72(6), 1934-1945.

Way, J. B., Paris, J., Kasischke, E. S., Slaughter, C., Vierek, L., Christensen Jr, N. L., Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Richards, J., Milne, A., Sieber, A., Ahern, F. J., Simonett, D., Hoffer, R., Imhoff, M., and Weber, J. (1990). "The effect of changing environmental conditions on microwave signatures of forest ecosystems : preliminary results of the march 1988 Alaskan aircraft SAR experiment." International Journal of Remote Sensing, 11(7), 1119-1144.

Chapitre 2

Grandeurs physiques en télédétection radar spatioportée



Chapitre 2

Grandeurs physiques en télédétection radar spatioportée

2.1 Principes du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)	21
2.1.1 Résolution radiale 2.1.2 Résolution azimutale 2.1.3 L'image RSO	22 23 24
2.2 Le vecteur d'information : le champ électrique	25
2.2.1 Le champ électrique 2.2.2 Matrice de diffusion 2.2.3 Matrice de Stokes	25 28 28
2.3 Capteurs RSO spatioportés	30
2.3.1 Généralités 2.3.2 Description sommaire des systèmes RSO utilisés	30 31
2.4 Coefficient de rétrodiffusion : cas du terrain plat	34
 2.4.1 Restauration de σ⁰ en terrain plat et précision 2.4.1.1 Imprécision due à l'étalonnage 2.4.1.2 Imprécision due au speckle 	36 36 37
2.5 Coefficient de rétrodiffusion : cas du terrain accidenté	39
 2.5.1 Perturbations dues au relief 2.5.1.1 Perturbations géométriques 2.5.1.2 Perturbations radiométriques 2.5.2 Restauration de σ⁰ en terrain accidenté et précision 2.5.2.1 Chaîne de post-traitement LCT 2.5.2.2 Restauration et précision 	40 40 42 45 47
2.6 Conclusions	50
Références bibliographiques	51

.

Chapitre 2

Grandeurs physiques en télédétection radar spatioportée

"Le livre de la nature s'étale continuellement devant nos yeux mais on ne peut le comprendre sans apprendre d'abord le langage dans lequel il est écrit. Il est écrit en langage mathématique, et ses caractères sont des figures géométriques." Galilée

Les données des Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) sont d'utilisation très récente pour l'observation de la biosphère terrestre. Le principe de l'imagerie RSO utilisant des rayonnements micro-ondes est de nature entièrement différente de celle réalisée dans les autres domaines du spectre électromagnétique (visible, infra-rouge, thermique...) induisant certaines propriétés (chatoiement, distorsions géométriques...) propres au mode d'acquisition de ces capteurs.

Les différentes quantités physiques obtenues dans le domaine des micro-ondes nécessitent donc d'être présentées afin de mieux cerner les principes de base sur lesquelles elles reposent. Il est important également de caractériser les différentes distorsions qui peuvent les affecter, dont celles d'origine topographique qui nous concernent ici plus particulièrement.

2.1 Principes du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)

Le principe de base d'un Radar dit à Ouverture Réelle (ROR) qui fut le premier type de radar imageur à être utilisé avant l'arrivée des Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) maintenant utilisés et utilisant à la base le même principe, est illustré à la Figure 2-1. La formation de l'image est obtenue par l'illumination du terrain par un faisceau de microondes, à l'aide d'une antenne fixe émettant séquentiellement et latéralement au déplacement du vecteur des impulsions électromagnétiques de durée finie très courte. C'est pourquoi les radars imageurs sont dits pulsés et à visée latérale. Entre les impulsions émises à une fréquence fixe, la même antenne bascule en mode réception pour recevoir et enregistrer la partie de l'énergie diffusée vers le radar, que l'on nomme en conséquence rétrodiffusion. Ainsi, le déplacement de l'antenne par le vecteur, forme la dimension azimutale de l'image (lignes successives), alors que la visée radiale et le traitement des échos successifs provenant de portions de terrain latérales au radar forme la dimension dite radiale de l'image (colonnes).

Nous allons voir que ces systèmes ROR ont de fortes limites quant à leur pouvoir séparateur définissant la résolution azimutale et radiale du système. Ces limites ont été palliées grâce aux Radars à Synthèse d'Ouverture, ayant recours à des techniques très sophistiquées de traitement du signal, améliorant grandement la résolution. Tout d'abord, dans le cas de la résolution radiale, déterminée par la durée de l'impulsion émise (Figure 2-1), la technique de compression d'impulsion est utilisée de manière à simuler une impulsion très courte améliorant de surcroît la résolution. D'autre part, au niveau de la résolution azimutale, la résolution est inversement proportionnelle à la longueur réelle l de l'antenne ; la simulation d'une antenne artificielle de longueur L beaucoup plus grande est réalisée grâce à l'effet Doppler, d'où le terme de synthèse d'ouverture par opposition à une ouverture réelle. Ces problèmes de résolution, capitaux en imagerie radar, sont quelque peu détaillés dans ce qui suit.



Figure 2-1 : Géométrie de visée d'un radar imageur dans la dimension radiale.

2.1.1 Résolution radiale

Dans le cas d'un radar pulsé, les impulsions émises latéralement sont de type rectangulaire et ont une durée et une amplitude finie. La résolution radiale Δr est la distance minimale permettant de séparer latéralement 2 cibles. Si τ est la durée d'impulsion, la résolution radiale oblique (*slant range resolution*) illustrée à la Figure 2-1 vaut :

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \tag{2-1}$$

avec c la célérité de la lumière (3.10⁸ m/s).

Cette résolution détermine ce que l'on appelle une porte radar, soit une portion circulaire interceptant le terrain. Projetée au sol là où sont les cibles, la résolution radiale (2-1) sur le terrain (ground range resolution) devient :

$$\Delta r_s = \frac{c\tau}{2\sin\theta} \tag{2-2}$$

où θ est l'incidence locale de l'onde radar. Les formules (2-1) et (2-2) permettent de voir que plus la durée d'impulsion est brève, meilleure est la résolution radiale (Figure 2-1). Aussi, plus l'angle d'incidence θ est faible (proche du nadir) et plus la résolution sera dégradée. Dans le cas idéal, et afin d'obtenir la résolution radiale optimale, il conviendrait d'avoir l'émission d'un Dirac (impulsion infiniment brève d'amplitude infiniment grande) mais ceci est impossible à réaliser (Lopes 1993). Même si l'on obtient une impulsion la plus brève possible, pour des raisons de rapport signal sur bruit, et donc de qualité de mesure, il est nécessaire que la puissance moyenne soit suffisamment élevée. Pour cela, on utilise la méthode de compression d'impulsion consistant à envoyer des impulsions de "longue" durée mais modulées linéairement en fréquence permettant par un traitement adapté de filtrage de compresser l'impulsion. C'est pourquoi les RSO sont des radars pulsés à modulation de fréquence (FM chirp radar).

Après quelques traitements mathématiques (Bruniquel 1996; Ulaby *et al.* 1982) la nouvelle durée d'impulsion devient τ ^{=0,885/ Δ f (où Δ f est la variation de fréquence utilisée lors de la modulation) et la nouvelle résolution radiale se ramène à :}

$$\Delta r_s = \frac{c\tau'}{2\sin\theta} \tag{2-3}$$

Dans le cas du RSO d'ERS-1 où $\Delta f = 15,55$ Mhz donc $\tau = 57$ ns et $\theta = 23^{\circ}$ la résolution dans la dimension radiale du RSO est de 8,54 m soit une résolution de 21,85 m au sol.

Il apparaît que la résolution radiale projetée au sol est de l'ordre de celle utilisée dans le cas des capteurs optiques haute résolution du type SPOT (résolution de 20 m en mode XS) ou LANDSAT (résolution de 30 m).

2.1.2 Résolution azimutale

Dans le cas d'un ROR, on peut démontrer que la résolution azimutale Δ_a , c'est à dire dans le sens de déplacement du satellite, est de la forme :

$$\Delta_{a} = \frac{\lambda H}{l\cos\theta} \tag{2-4}$$

où H représente l'altitude du capteur, λ est la longueur d'onde, l est la longueur de l'antenne et θ l'angle de visée. La résolution est donc inversement proportionnelle à la dimension l de l'antenne, et dépend aussi de la distance au capteur. Dans le cas d'ERS-1 qui est à une altitude d'environ 700 km, pour avoir une résolution de 20 m il faudrait une antenne à ouverture réelle de 1901m de long!, ce qui n'est évidemment pas pas réaliste. Cette limitation majeure dans le développement des radars imageurs spatioportés a été contournée en utilisant l'effet Doppler (information de phase) qui est une variation de la fréquence de réception de l'onde rétrodiffusée en fonction de la vitesse relative entre l'antenne et la cible illuminée (un détail des calculs est donné à l'annexe du chapitre 2 §A2.1). Cela revient en fait à simuler une antenne synthétique beaucoup plus longue de longueur L, améliorant d'autant la résolution. L'antenne synthétique est simulée grâce au déplacement de la plate-forme, et il est possible de mesurer et d'enregistrer en plusieurs points le signal (amplitude et phase) rétrodiffusé par une même cible (Figure 2-2).



Figure 2-2 Configuration d'une ouverture synthétique RSO où L est la dimension de l'antenne synthétique et le point P est illuminé plusieurs fois (d'après Elachi 1988).

On peut démontrer que dans le cas des RSO spatioportés actuels, la résolution angulaire est donnée par (2-5) :

$$\beta_{hs} \approx \frac{\lambda}{2L}$$
 avec $L \approx \beta_{hr} \operatorname{Rp}$ et $\beta_{hr} \approx \frac{\lambda}{l}$ (2-5)

Où L est la longueur maximale de l'antenne synthétique, β_{hr} est l'ouverture angulaire de l'antenne réelle, Rp est la distance entre l'antenne et le point **p** illuminé, et l est la longueur réelle de l'antenne (Figure 2-2). Dans ces conditions la résolution azimutale qui en découle est donnée par :

$$\Delta_a = R_p \beta_{hs} = R_p \frac{\lambda}{2L}$$
(2-6)

En intégrant (2-5) dans (2-6) il vient pour la résolution azimutale :

$$\Delta_a \approx \frac{1}{2} \tag{2-7}$$

La résolution azimutale pour les RSO devient indépendante de la distance R_p d'observation et vaut en gros la demie longueur de l'antenne. Dans le cas d'ERS-1 où l'antenne a une longueur de 10 m, la résolution azimutale théorique est de 5 m. Cette méthode basée sur un traitement des signaux utilisant leur fréquence Doppler, a donc permis le développement des radars spatioportés avec de bonnes résolutions.

2.1.3 L'image RSO

Le produit final d'un système RSO est une image numérique composée par une grille bidimensionnelle de pixels (Laur 1989). L'image est reconstruite à partir des plusieurs impulsions rétrodiffusées par chaque cible, reçues par l'antenne et enregistrées, après le traitement RSO qui ne sera pas détaillé ici, considérant sa grande complexité et par la suite aidant peu à la compréhension de la rétrodiffusion en fonction des paramètres forestiers. La notion de pixel en imagerie radar ne recouvre pas exactement les mêmes significations qu'en imagerie optique où elle est associée à la résolution. Dans le cas des RSO, la taille du pixel est toujours d'environ la moitié de la résolution expliquée plus haut (ex ERS-1 : pixel = 12,5m, résolution = 20-30m). Ceci est lié au fait que les pixels sont créés par l'échantillonnage temporel des signaux rétrodiffusés, et ainsi, c'est la fréquence d'échantillonnage qui dicte la taille des pixels.

Ce qu'il faut retenir, c'est que l'image RSO issue du processeur est un échantillonnage bidimensionnel de la rétrodiffusion des cellules de résolution sur le terrain (Figure 2-3). Cet échantillonnage forme les pixels en lignes et colonnes (i,j) de l'image, chaque pixel ayant un Compte Numérique CN codé sur 16 bits de l'amplitude de rétrodiffusion. Le vecteur d'information utile est le champ électrique rétrodiffusé que nous allons décrire dans ce qui suit.



Figure 2-3 Correspondance entre une cellule de résolution (k,l) et le pixel associé (i, j) de l'image traitée (d'après Laur 1989).

2.2 Le vecteur d'information : le champ électrique

2.2.1 Le champ électrique

Nous avons vu que le principe du radar est d'émettre à l'aide d'une antenne une impulsion électrique vers une cible, et de recevoir à l'aide de la même antenne le champ électrique diffusé par la cible. Les caractéristiques du champ rétrodiffusé par rapport à celui émis, en termes d'amplitude et de phase, permettent de mesurer des propriétés des cibles ayant éventuellement une utilité thématique.

Le principe est formalisé à la Figure 2-4 avec une cible illuminée depuis une antenne par un champ électrique avec une géométrie (θ, ϕ) , et où le champ électrique est exprimée dans un système de coordonnées propre au capteur. Le champ électrique E, de nature ondulatoire et se propageant à la vitesse de la lumière, est caractérisé par sa fréquence (ou longueur d'onde), l'état de polarisation, sa pulsation (phase), son amplitude et sa direction de propagation par rapport à une cible quelconque. On utilise la notation complexe pour le décrire mathématiquement.

Dans le cas d'un système radar monostatique, c'est-à-dire où l'antenne d'émission est située sur le même porteur que celle en réception (ce qui est toujours le cas pour les RSO spatioportés d'observation de la Terre), le champ électrique **E** à l'émission et à la réception est associé à un système cartésien orthonormé $(\hat{h}, \hat{v}, \hat{k})$ et par rapport à la direction verticale \hat{z} du système orthonormé cartésien global $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ est donnée par :

$$E(r,t) = E_h \hat{h} + E_v \hat{v} = e^{(-i(\omega t - \bar{k}\bar{\tau}))} \left[a_h e^{-i\delta_h} \hat{h} + a_v e^{-i\delta_v} \hat{v} \right]$$
(2-8)

où E_h et E_v sont les composantes complexes polarisées horizontalement et verticalement, et a_h , δ_h et a_v , δ_v sont les amplitudes et déphasages respectifs des composantes E_h et E_v , ω est la pulsation, \overline{k} est le vecteur d'onde et \overline{r} la distance antennecible. Les vecteurs $\hat{h}, \hat{v}, \hat{k}$ sont définis par (Nghiem 1991):

$$\hat{\mathbf{h}} = \frac{\hat{\mathbf{z}} \times \overline{\mathbf{k}}}{\left|\hat{\mathbf{z}} \times \overline{\mathbf{k}}\right|}, \hat{\mathbf{v}} = \frac{\hat{\mathbf{h}} \times \overline{\mathbf{k}}}{\left|\hat{\mathbf{h}} \times \overline{\mathbf{k}}\right|}$$
(2-9a)

$$\hat{\mathbf{k}} = \overbrace{|\vec{\mathbf{k}}|}^{\vec{\mathbf{k}}} \quad \text{avec} \quad \vec{\mathbf{k}} = \mathbf{k}_x \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{k}_y \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{k}_z \hat{\mathbf{z}}$$
(2-9a)

 \hat{h} et \hat{v} sont les composantes polarisées horizontalement et verticalement, et \hat{k} est le vecteur unitaire de propagation.



Figure 2-4 Le système de coordonnées dans le cas d'un RSO monostatique.

On notera à la Figure 2-4 la géométrie de visée par rapport à la cible où ϕ correspond à l'angle azimutal de la visée, et θ à l'angle d'incidence. Nous verrons que ce dernier a une grande importance par la suite. L'état de polarisation de l'onde est la description de la forme et de la position que décrit l'extrémité du champ électrique \mathbf{E} (dans le plan $\hat{\mathbf{h}} - \hat{\mathbf{v}}$ orthogonal à la direction de propagation) en fonction du temps. Dans le cas général, l'extrémité du champ électrique \mathbf{E} décrit une ellipse (Figure 2-5), on parle alors de polarisation elliptique. Celle-ci est caractérisée par les angles de polarisation : d'ellipicité χ et d'orientation ψ . Néanmoins, sous certaines conditions, l'ellipse peut se transformer en une ligne ou en un cercle, on parle alors de polarisation linéaire et circulaire. Nous verrons que la polarisation linéaire est la plupart du temps utilisée.



Figure 2-5 Ellipse de polarisation dans le plan $(\hat{h} - \hat{v})$, l'onde se déplace dans la direction \hat{k} (perpendiculairement à la page).

Le Tableau 2.1 résume la définition des 4 polarisations fondamentales en termes de χ et ψ . La méthode décrivant le sens de rotation est donnée par (Boerner 1990).

Polarisation	Angle d'orientation ψ	Angle d'ellipicité χ
linéaire horizontale (H)		
(parallèle à la surface de la terre)	0° ou 180°	0°
linéaire verticale (V)	90°	0°
(perpendiculaire à H)		
Circulaire rotation droite (R)	0°	-45°
Circulaire rotation gauche (L)	0°	+45°

Tableau 2.1 : Caractéristiques des polarisations de base.

La polarisation en radar est définie par la polarisation de l'onde à l'émission et à la réception. Une paire de lettre est utilisée où la première lettre indique la polarisation à l'émission, et la deuxième la polarisation à la réception. Pour les polarisations linéaires généralement utilisées, il y a donc 4 combinaisons possibles : VV, HH, VH et HV.

Pour une configuration donnée du RSO (fréquence, polarisation et géométrie d'observation), les propriétés de rétrodiffusion de la cible sont déterminées par les caractéristiques du champ rétrodiffusé par rapport au champ incident. Il faut donc connaître la relation qui les lie.

2.2.2 Matrice de diffusion

Les champs électriques incident E_i et rétrodiffusé E_s par la cible sont reliés par la matrice complexe de diffusion [S] qui caractérise la cible et est donnée par (Boerner 1990; Guili 1986; Huynen 1965):

$$E_{s} = \frac{e^{ikr}}{r} SE_{i} soit \begin{bmatrix} E_{vs} \\ E_{hs} \end{bmatrix} = \frac{e^{ikr}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{vi} \\ E_{hi} \end{bmatrix}$$
(2-10)

où le facteur e^{ikr}/r est dû à la nature sphérique de l'onde rétrodiffusée, et l'élément de la matrice de diffusion S_{ij} est la composante polarisée selon i de l'onde diffusée, due à la composante polarisée selon j de l'onde incidente. Cette relation indique donc que l'onde diffusée par rapport à l'incidente est modifiée en amplitude, phase et polarisation. Chaque terme de la matrice [S] s'exprime donc par une amplitude |

$$S_{ij} = \left| S_{ij} \right| e^{i\phi_{ij}} \text{ avec les indices i, } j = h \text{ ou } v \text{ (sauf pour le i complexe)}$$
(2-11)

Dans le cas de la rétrodiffusion, la réciprocité observée du milieu dicte l'égalité des termes croisés, $S_{hv} = S_{vh}$ (Nghiem *et al.* 1992; van Zyl 1990). Dans ce cas, la matrice de diffusion ne contient plus que 5 quantités indépendantes (3 d'amplitude et 2 de phase relative, la phase absolue n'étant pas connue) caractérisant entièrement les propriétés de diffusion de la cible.

Dans la pratique, un système RSO capable de mesurer ces 5 quantités de la matrice de diffusion pour chaque cellule de résolution de l'image radar est appelé **polarimètre**. La mesure des termes de la matrice [S] se fait alors grâce à un dispositif où deux antennes émettent séquentiellement une onde polarisée verticalement et horizontalement, et reçoivent simultanément la composante horizontale et verticale du champ électrique rétrodiffusé (E_s). Pour chacune des configurations, le polarimètre mesure la phase et l'amplitude du signal (voltage complexe du signal reçu). En fait, la phase absolue de chaque terme n'est pas mesurable, seule la phase relative entre les termes est accessible, la distance antenne-cible intervenant n'étant pas connue précisément.

Ces systèmes relativement complexes sont peu nombreux en orbite. La plupart des systèmes RSO actuels ne peuvent mesurer qu'un terme de la matrice de diffusion [S]. Dans ce cas, le système est beaucoup plus simple. Pour mesurer par exemple le terme S_{vv} (comme c'est le cas par exemple pour le capteur ERS-1), il suffira d'avoir à l'émission et à la réception, une seule antenne polarisée verticalement, et le problème de diffusion devient scalaire, permettant de mesurer S_{vv} .

2.2.3 Matrice de Stokes

En télédétection radar, on utilise aussi le formalisme du vecteur de Stokes pour définir les propriétés de diffusion, parce qu'il facilite le traitement mathématique des signaux polarimétriques issus de milieux dits désordonnés, et qu'il est utilisé dans la modélisation électromagnétique de ces milieux comme la forêt. Ici nous présentons le vecteur de Stockes modifié donné par (Ulaby and van Zyl 1990):

$$\vec{I} = \frac{1}{\eta} \begin{vmatrix} < |E_v|^2 > \\ < |E_h|^2 > \\ 2 \operatorname{Re} < E_v E_h^* > \\ 2 \operatorname{Im} < E_v E_h^* > \end{vmatrix} = \frac{1}{\eta} \begin{bmatrix} I_v \\ I_h \\ U \\ V \end{bmatrix}$$
(2-12)

où η est l'impédance d'onde du milieu dans lequel se propage l'onde, Re et Im désignant respectivement les parties réelle et imaginaire. Au nombre de quatre, ces paramètres ont un avantage décisif sur les autres représentations dans les problèmes de diffusion, lorsqu'il est légitime de considérer les ondes élémentaires diffusées par les constituants d'un milieu désordonné comme indépendantes entre elles. On peut démontrer que l'onde résultante a pour paramètre de Stokes la somme des paramètres de Stokes de chacune des ondes indépendantes.

On introduit alors la matrice de Stokes [M] réécriture de la matrice [S] permettant de relier linéairement le vecteur de Stokes modifié rétrodiffusé I_s au vecteur de Stokes modifié incident I_i par la relation matricielle suivante (van Zyl 1990):

$$\vec{I}_{s} = \frac{1}{r^{2}} [M] \vec{I}_{i}$$
 (2-13)

La matrice [M] est une matrice 4x4 contenant 16 paramètres réels, réduits à 9 paramètres indépendants dans le cas d'une matrice symétrique liée à un milieu réciproque. Cette matrice s'exprime par différentes combinaisons des termes de la matrice [S], et est donnée par (Manson and Boerner 1985; Ulaby *et al.* 1986; van Zyl *et al.* 1987):

$$M = < \begin{bmatrix} |S_{vv}|^{2} & |S_{vh}|^{2} & Re(S_{vv}S_{vh}^{*}) & -\operatorname{Im}(S_{vv}S_{vh}^{*}) \\ |S_{hv}|^{2} & |S_{hh}|^{2} & Re(S_{hv}S_{hh}^{*}) & -\operatorname{Im}(S_{hv}S_{hh}^{*}) \\ 2Re(S_{vv}S_{hv}^{*}) & 2Re(S_{vh}S_{hh}^{*}) & Re(S_{vv}S_{hh}^{*} + S_{vh}S_{hv}^{*}) & -\operatorname{Im}(S_{vv}S_{hh}^{*} - S_{vh}S_{hv}^{*}) \\ 2\operatorname{Im}(S_{vv}S_{hv}^{*}) & 2\operatorname{Im}(S_{vh}S_{hh}^{*}) & \operatorname{Im}(S_{vv}S_{hh}^{*} + S_{vh}S_{hv}^{*}) & Re(S_{vv}S_{hh}^{*} - S_{vh}S_{hv}^{*}) \end{bmatrix} >$$
(2-14)

où <> indique un moyennage d'ensemble sur les signaux et * le complexe conjugué.

Alors que la matrice [S] représente une description du champ électromagnétique en amplitude et phase, la matrice [M] contient quant à elle l'information de la cible sous forme de puissance et de phase relative d'une polarisation par rapport à l'autre (la phase absolue, qui ne peut être obtenue, est éliminée). L'intérêt de ce formalisme est que l'on peut additionner de façon incohérente les matrices de Stokes issues d'un milieu désordonné (van Zyl *et al.* 1987). L'ensemble du milieu peut alors être caractérisé par une matrice moyenne [M] également appelée *matrice de phase* (Chandrasekhar 1960) qui, nous le verrons au Chapitre 6, est utilisée dans les modèles de transfert radiatif, où la moyenne est effectuée sur les distributions forme, taille orientation...etc, des différents éléments diffusants constituant le milieu (Lopes 1994). Un autre intérêt de ce format se situe dans la réduction du bruit de *speckle*, par l'opération appelée multivues que l'on verra plus loin.

A partir de la matrice [S] ou [M], le coefficient de rétrodiffusion σ^0 et deux indices polarimétriques : degré de cohérence et différence de phase, peuvent être obtenus. Nous ne décrirons par la suite que le coefficient de rétrodiffusion utilisé dans l'étude, potentiellement porteur d'information thématique quant aux paramètres forestiers.

Après avoir rapidement survolé les bases, voyons tout d'abord quels sont les principaux RSO spatioportés disponibles et utilisés dans cette étude.

2.3 Capteurs RSO spatioportés

2.3.1 Généralités

Ces 8 dernières années ont vu, dans le domaine civil, le déploiement de différents RSO spatioportés, ERS-1 puis ERS-2 de l'Agence Spatiale Européenne (ESA, 1991 et 1995), JERS-1 de l'Agence spatiale japonaise (NASDA, 1992) et plus récemment RADARSAT de l'Agence Spatiale Canadienne (ASC, 1995). Ce sont des satellites à vocation préopérationnelle, parfois opérationnelle pour certaines applications spécifiques. Ces systèmes sont tous monoconfigurés, c'est-à-dire opérant avec une seule fréquence, un seul état de polarisation, et une incidence fixe, hormis RADARSAT présentant la multi-incidence et la multi-résolution. Ces missions seront pérennisées bientôt grâce à 1) l'ASAR de la mission ENVISAT pour l'ESA, qui étendra les capacités d'ERS à la multi-incidence, la multipolarisation et la multi-résolution, et 2) RADARSAT II dont la configuration est la même.

Dans le cas de tous ces systèmes, on mesure l'amplitude de l'onde rétrodiffusée, à partir de laquelle on remonte au coefficient de rétrodiffusion σ^0 . La façon dont on restaure σ^0 à partir des images sera détaillée dans les sections qui suivent.

A noter que tous ces systèmes mesurent également la phase de l'onde rétrodiffusée, mais qui en elle-même, n'apporte pas beaucoup d'information liée à la cible. Cependant, lorsque l'on utilise cette phase mesurée à plusieurs reprises lors de passages successifs du capteur sur une orbite donnée et imageant la même zone, la différence de phase entre ces mesures est elle très utile, car elle permet d'appliquer la technique particulière dite d'interférométrie radar. Le potentiel des données interférométriques ERS-1 a été exploré durant la thèse, mais les travaux sont reportés en annexe A, afin de garder l'homogénéité de l'essentiel du travail réalisé à l'aide du coefficient de rétrodiffusion σ^0 .

En parallèle avec ces systèmes, des prototypes de nouveaux systèmes plus complets sont testés soit sur des avions, et plus rarement sur une plateforme orbitale. On retrouve alors des systèmes multi-polarisation ou polarimétriques opérant éventuellement en multifréquences et/ou multi-incidences. En mode orbital, les deux capteurs SIR-C (Shuttle Imaging Radar - C) et X-SAR ont été utilisés simultanément en 1994 dans le cadre de deux vols expérimentaux à bord de la navette spatiale américaine décrits plus loin. En particulier, SIR-C fut le premier RSO spatioporté à la fois polarimétrique et multifréquence (bandes L et C), et constituait de loin le capteur RSO le plus performant jamais mis en orbite, présupposant des futurs capteurs RSO qu'il serait possible de mettre en orbite à moyen terme (1^{ère} décennie après l'an 2000). Cette possibilité d'accéder à des images utilisant plusieurs configurations et ayant donc plusieurs canaux, est sans doute vitale pour le devenir de la technique radar. Il n'y a qu'à imaginer qu'il faille utiliser qu'un seul canal XS de SPOT par exemple !

Ces missions se sont développées essentiellement à cause de leur capacité tout temps, de jour comme de nuit, permettant d'observer des régions régulièrement ennuagées, mais aussi considérant leur complémentarité avec les données optiques et infrarouges. Les missions assignées à ces satellites sont axées sur l'observation et le suivi de la biosphère, et plus particulièrement du domaine océanique pour ERS. Elles vont de l'amélioration des connaissances des phénomènes d'interaction océan-atmosphère et de circulation des océans ou de l'évolution des glaces aux pôles, jusqu'à des applications plus concrètes comme la surveillance de la pollution par hydrocarbures, l'aide à l'inventaire et la gestion des ressources continentales renouvelables, etc...

Divers instruments radar spécifiques ont été embarqués sur les plates-formes des satellites ERS-1/2 et JERS-1. Nous ne nous attacherons ici à ne présenter que les instruments micro-ondes actifs de type RSO (sachant qu'il existe d'autres systèmes radar, comme les diffusiomètres et les altimètres). Nous décrivons dans ce qui suit les 2 principaux systèmes opérationnels (du moins au démarrage de cette thèse, depuis est apparu en 1995 RADARSAT, qui n'a pas été étudié car présentant la même fréquence que ERS) : ERS-1/2 et JERS-1, en plus du capteur SIR-C vu sa configuration multiple et ses grandes performances permettant d'envisager un élargissement de la palette d'applications possibles dans un avenir proche à l'aide de données RSO spatioportées.

2.3.2 Description sommaire des systèmes RSO utilisés

Rappelons que les caractéristiques de rétrodiffusion radar, et donc des cibles observées, dépendent de la configuration radar utilisée essentiellement par la fréquence, la polarisation et l'angle d'incidence utilisés. C'est aussi par ces paramètres que diffèrent essentiellement les différents systèmes.

Les autres paramètres importants participant à la formation de l'image RSO et devant être prises en compte sont essentiellement de deux natures :

- géométrique : la fauchée, soit la largeur de la bande du globe imagée, la résolution et la taille des pixels dans les dimensions azimutales et radiales de l'image, la direction de azimutale de visée par rapport au nord et l'angle d'incidence local évoqué ci-dessus ;
- radiométrique : le nombre de vues de l'image (*looks*), la résolution radiométrique des images, le niveau de bruit thermique.

Ceux-ci sont beaucoup plus semblables entre capteurs, hormis pour SIR-C présentant des caractéristiques différentes et modulables.

<u>ERS-1/2</u>

Lancé à la mi-juin 1991, le satellite ERS-1 de l'ESA avait pour vocation première l'observation des océans et de la glace et s'est avéré potentiellement intéressant pour l'étude des terres émergées. ERS-1 a été placé à une altitude de 785 km sur une orbite héliosynchrone circulaire et sub-polaire, lui permettant d'observer tous les points du globe sauf à proximité des pôles. ERS-2 a succédé à ERS-1 à l'été 1995, et les deux satellites ont ainsi pu voler en tandem pendant une période de plusieurs mois en 1995 et 1996. Les caractéristiques d'ERS-2 sont identiques à celles d'ERS-1. La configuration adoptée pour ce radar ainsi que ses principales caractéristiques sont données au Tableau 2.2.

Configuration de base	Fréquence	5,3 GHz (5.6cm, bande C)
	Polarisation	VV
-	Angle d'incidence	23° à mi scène
	Revisite	35 jours (+2 phases à 3 jours)
paramètres géométriques	largeur fauchée	100 km
	taille des pixels	12.5 x 12.5 m
	Résolution spatiale	≈25 m
paramètres radiométriques	nombre de vues	3 vues

Différents produits sont proposés en fonction des traitements effectués sur les images. Nous avons utilisé les données *Precision Range Image* dites PRI, qui après traitement RSO à partir des produits bruts (RAW), ont subit une réduction du bruit de *speckle* par le processus de multivue (3 vues) et un rééchantillonnage de la distance radiale à la distance au sol sur l'ellipsoïde, permettant d'obtenir des pixels carrés de 12,5 x 12,5.

Le produit PRI reste de loin le plus utilisé pour des applications en terrain plat où le géoréférencement est aisé à l'aide d'outils classiques de corrections géométriques. Cependant, les distorsions dues au relief ne sont pas corrigées, ni radiométriquement, ni géométriquement. A noter cependant qu'il existe des produits géocodés ERS (produits GEC et GTC), mais ceux-ci sont très peu généralisés, sont coûteux et difficiles à obtenir. De plus, ces produits ne sont pas corrigés radiométriquement des effets du relief. C'est pourquoi il a fallu appréhender les problèmes d'utilisation et de correction des images RSO en zones de relief.

JERS-1

Lancé en février 1992 sous l'égide de la NASDA (National Space Development Agency of Japan) le satellite JERS-1 avait entre autre pour mission d'obtenir une observation globale de la terre par RSO et capteurs optiques. Ce satellite évolue à une altitude de 568 km sur une orbite héliosynchrone avec une répétitivité de 44 jours. La configuration adoptée pour ce radar ainsi que ses principales caractéristiques sont données au Tableau 2.3. Elle offre d'une part une configuration très différente d'ERS et donc complémentaire, en plus d'offrir une plus grande longueur d'onde (25 cm au lieu de 5,6 cm), permettant de sonder plus profondément les milieux forestiers et d'obtenir comme nous le verrons une meilleure sensibilité à ces paramètres.

Configuration de base	Fréquence	1,275 Ghz (25cm, bande L)
	Polarisation	HH
	Angle d'incidence	38° à mi scène
	Revisite	44 jours
paramètres géométriques	largeur fauchée	75 km
	taille des pixels	12.5 x 12.5 m
	Résolution spatiale	≈25 m
paramètres radiométriques	nombre de vues	3 vues

Tableau 2.3 : Caractéristiques du RSO de JERS-1.

Ici aussi différents niveaux de traitement sont proposés. Dans notre cas, il s'agissait du niveau 2.1, pratiquement équivalent au produit PRI d'ERS, correspondant à un produit image standard géoréférencée en projection UTM (en considérant uniquement l'ellipsoïde) avec un pixel rééchantillonné à 12,5m, et une réduction du bruit par multivue (3 vues). Aucune distorsion due au relief n'est compensée.

SIR-C/X-SAR

La mission SIR-C/X-SAR est la toute dernière des missions radar à bord de la navette spatiale, commencées avec SIR-A (1981) puis SIR-B (1984) et finalement SIR-C (1994). Cette mission fut la première mettant en œuvre un polarimètre RSO (SIR-C) spatial réalisant 8 mesures simultanées du champ rétrodiffusé complexe (2 fréquences pour 4 états de polarisation) (Freeman *et al.* 1995; Jordan *et al.* 1995) permettant d'en déduire les 9 termes indépendants de la matrice de Stokes décrite plus tôt. De plus, il était adjoint d'un autre RSO, le X-SAR qui est lui non-polarimétrique, et qui a été développé conjointement par les agences spatiales Allemande (DLR) et Italienne (ASI). Cependant, il n'est pas abordé ici. Sa haute fréquence (bande X, 9 GHz) ne perçoit que le haut des couverts et ne présente pas d'intérêt pour l'estimation de paramètres forestiers.

Ce vol expérimental s'inscrit dans une démarche prospective d'évaluation des futures configurations radar qui seront embarquées sur les futures plates-formes telle que EOS (Earth Observation System) ou LIGHTSAR (polarimètre bande L, autour de l'an 2000). Cette mission a consisté en deux vols de 10 jours au cours des mois d'avril et septembre/octobre 1994 à bord de la navette Américaine Endaevour évoluant à une altitude de 225 km sur une orbite circulaire mais peu inclinée sur le plan de l'écliptique, ne permettant pas ainsi d'acquérir des images au-delà des latitudes de 50°N et 50°S. Les caractéristiques nominales de ces RSO sont résumées dans le Tableau 2.4.

Configuration de base	Fréquence	1,249 GHz (bande L 23,5 cm)
		5,298 Ghz (bande C 5,8 cm)
	Polarisation	Matrice de Stokes complète
		(HH, VV, VH, HV)
	Angle d'incidence	20-55 deg selon le mode
	Revisite	pratiquement journalière sur 10 j
paramètres géométriques	largeur fauchée	15-90 km selon le mode
	taille des pixels	12.5 x 12.5 m
	Résolution spatiale	≈25 m
paramètres radiométriques	nombre de vues	8 vues

Tableau 2.4 : Caractéristiques nominales du RSO SIR-C

Le capteur SIR-C opérait selon 16 modes distincts suivant l'incidence, la largeur de la scène, la polarisation (Jordan *et al.* 1995). Les images sur le site d'étude sont acquises avec les modes 11 et 13 correspondant à des incidences supérieures à 48 degrés, de l'ordre de 52-55 degrés où seulement une information partielle sur la matrice de Stokes est obtenue. En effet, l'acquisition polarimétrique complète ne pouvait être réalisée qu'à des incidences inférieures 48°. Dans notre cas, seules deux polarisations sont enregistrées (HH et HV) en mode complexe (conservation de la phase).

Il est dommage que nous n'ayons pu obtenir des acquisitions polarimétriques complètes afin d'étudier l'apport non seulement des coefficients de rétrodiffusion, mais aussi des indices polarimétriques. Ces derniers, partiels dans notre cas, ont été étudiés à l'aide des canaux HV et HV, et les résultats médiocres (attendus avec ces 2 deux seuls canaux) sont reportés en annexe B pour information. Cependant, nous pouvons dire que nous avons eu beaucoup de chance d'obtenir des données SIR-C, car 1) les images étaient programmées et acquises initialement que pour des investigateurs désignés, nous nous sommes alors joint au CESBIO (Dr. T. Le Toan), 2) peu d'orbites ont été utilisées pour réaliser des acquisitions, et malgré la faible largeur de la fauchée (15-90km), nous avions l'opportunité qu'une des orbites passe par hasard au-dessus de notre site d'étude. Cependant, seulement 2 passages sur la période de 10 jours étaient utilisables, les autres omettant une trop grande partie du site ou passant à côté.

Les images obtenues sont du type MLC (*Multi-Look Complex data*) incluant l'amplitude et la phase des signaux rétrodiffusés en polarisation HH et HV. Ce produit est non-géocodé avec une réduction du bruit (multivue : 8 vues) et une résolution d'environ 25 m pour une taille des pixels à 12,5 m. Aucune distorsion due au relief n'est corrigée.

Nous allons maintenant voir comment le **coefficient de rétrodiffusion** σ^0 est mesuré par ces types de capteurs et comment on peut le restaurer à partir des images RSO fournies. Nous distinguerons le cas simple du **terrain plat**, et ensuite celui plus complexe du **terrain accidenté** qui nécessitera d'expliciter comment la topographie perturbe la mesure de σ^0 et nécessite donc une méthode de restauration particulière qui a été développée au LCT.

2.4 Coefficient de rétrodiffusion : cas du terrain plat

Considérons le cas tout d'abord d'un terrain plat, dénotant ici une surface très peu accidentée sur l'ellipsoïde terrestre.

Pour une combinaison de polarisation pq, le coefficient de rétrodiffusion σ^0 est proportionnel au terme de la matrice S_{pq} , et est donc lié au rapport entre les champs électriques rétrodiffusés E_s et incident E_i (2-10). Pour une cible naturelle étendue (par opposition à une cible ponctuelle), il s'exprime à partir des termes de la matrice [S] (ou [M]) selon la relation :

$$\sigma_{pq}^{0} = \frac{4\pi}{A} < \left| S_{pq} \right|^{2} >$$
(2-15)

avec A l'aire illuminée du terrain. Cette quantité s'exprime en m^2/m^2 et est donc adimensionnelle. Le moyennage > réalisé sur plusieurs mesures de S_{pq} est nécessaire considérant le bruit de *speckle* ou chatoiement. Nous y reviendrons plus loin.

En fait, pour une combinaison de polarisation pq, l'image RSO est une mesure indirecte des termes de la matrice S, car en fait elle mesure la puissance reçue à l'antenne P_r liée au champ rétrodiffusé E_{sp} . Connaissant la puissance transmise P_t à l'émission lié au champ incident $E_{iq,}$, le rapport de ces deux puissances est proprortionnel au terme recherché S_{pq} de la matrice [S] et donc à σ^0 .

Dans la pratique, les images fournies contiennent pour chaque pixel un Compte Numérique CN codé sur 16 bits, qui est une mesure de l'amplitude de l'onde rétrodiffusée $A=|E_{sq}|$, dont la valeur au carré, dite intensité $I=A^2$, est proportionnelle à la puissance reçue P_r à un terme constant près q (lié aux divers gains et pertes dans le système hors antenne).

Sous ces considérations, et dans le cas d'un terrain plat, le coefficient de rétrodiffusion propre à la surface observée est alors relié à la puissance moyenne reçue par l'antenne au travers de l'équation radar (Laur 1989; Ulaby *et al.* 1986) :

$$\langle CN^2 \rangle = q \langle P_r \rangle = qP_t \frac{G_r G_t \lambda^2}{(4\pi R)^3} A_{plat} \sigma^{\circ}$$
 (2-16)

où $\langle CN_2 \rangle$ et $\langle P_r \rangle$ sont respectivement la moyenne sur les états du *speckle* de l'intensité des pixels et la puissance reçue correspondante, P_t la puissance transmise, A_{plat} l'aire du pixel en terrain plat, R la distance cible-antenne, G_t et G_r les gains d'antenne respectivement à l'émission et à la réception, λ la longueur d'onde et σ^0 le coefficient de rétrodiffusion à restaurer.

Heureusement, les agences fournissent des données compensées pour les paramètres du système n'intéressant pas les utilisateurs, variables selon la géométrie de visée: $G(\theta,\phi)$, $R(\theta)$ et $A_{plat}(\theta)$. Ce dernier terme, qui aura son importance dans le cas du terrain accidenté, est donné par :

$$A_{plat}(\theta) = \frac{\delta a \delta r}{\sin \alpha}$$
(2-17)

où δ_r et δ_a sont respectivement la taille du pixel en distance radiale et azimutale, et sin α intervient dans la projection de la taille du pixel en distance au sol. α est l'incidence locale sur l'ellipsoïde, qui est une fonction des paramètres de ce dernier et de θ . Restent des termes constants qui sont regroupés au travers d'une constante K dite d'étalonnage.

Du coup, à partir de l'équation (2-16) et considérant le *speckle* S qui est un bruit multiplicatif (nous y reviendrons), le compte numérique pixel à pixel est donné simplement par :

$$CN^2 = I = K\sigma^{\circ}S$$
(2-18)

Cette équation constituera ce que l'on appellera modèle d'image en terrain plat. Cependant, afin d'estimer correctement σ^0 d'une surface donnée considérant (2-16), l'utilisateur doit procéder à un moyennage (ou mieux, un filtrage adaptatif basé sur les propriétés statistiques du *speckle*) sur plusieurs pixels, et l'on obtient simplement :

$$\sigma^{\circ} = \frac{\langle CN^2 \rangle}{K} \tag{2-19}$$

Finalement, comme σ^0 présente une très forte dynamique (jusqu'à 10⁵) pour différentes surfaces (très peu rétrodiffusantes : plan d'eau calme ; très fortement rétrodiffusantes : milieux urbains), il est généralement exprimé sur une échelle logarithmique, soit en décibels (dB : 10log₁₀), par :

$$\sigma^{\circ}(dB) = 10\log(\langle CN^2 \rangle) - 10\log(K)$$
(2-20)

Ce coefficient de rétrodiffusion radar est la variable radiométrique utilisée dans toute application thématique, et est équivalente à la notion de réflectance utilisée dans l'optique.

2.4.1 Restauration de 0º en terrain plat et précision

L'équation (2-18) est utilisée pour restaurer σ^0 à partir des comptes numériques CN de l'image RSO. La précision de cette restauration dépend de la précision sur la constante d'étalonnage K et sur la capacité à s'affranchir au maximum du *speckle* matérialisé par S.

2.4.1.1 Imprécision due à l'étalonnage

En général, et suivant l'objectif à atteindre au travers de l'analyse des données radar, l'étalonnage s'avère être une étape indispensable afin de réaliser une analyse quantitative, permettant entre autres de comparer σ^0 acquis à plusieurs dates ou par divers capteurs, ou bien de comparer les observations avec celles simulées avec un modèle théorique donnant une valeur absolue.

Sur la base de l'équation radar vue auparavant (2-18), K regroupe plusieurs paramètres du système dont certains sont plus ou moins bien connus *a priori* (gains d'antenne) et qui dérivent légèrement dans le temps. Les agences spatiales estiment temporellement cette constante K à partir de cibles de référence au sol dont on connaît parfaitement le σ^0 et on obtient ainsi une statistique sur K. La constante d'étalonnage n'étant pas stable, il en résulte une certaine imprécision, variable selon les capteurs tel que présenté au Tableau 2.5 :

Capteurs	K (dB)	Sources
ERS-1	$58,2 \pm 0,75$	(Laur 1992)
JERS-1	$68,5 \pm 1,5$	(Freeman et al. 1993; NASDA 1993a; NASDA 1993b)
SIR-C (SRL-1)	$0,7 \pm 2$	(JPL 1995)
SIR-C (SRL-2)	2,3 ± 2	(JPL 1995)
X-SAR	60 ± 1	(Zink and Bamler 1995)

Tableau 2.5 : Valeur des constantes de calibration K exprimées en décibels (dB) et leur erreur associée pour les différents RSO spatioportés.

Ainsi, la précision est supérieure pour ERS-1 par rapport à JERS-1 et SIR-C. Si pour ERS-1 la constante de d'étalonnage montre une forte stabilité temporelle (Desnos *et al.* 1993; Laur 1992), pour JERS-1 de fortes variations peuvent apparaître ($\geq \pm 1$ dB) (Chapman *et al.* 1995; Freeman *et al.* 1993). L'impact de l'imprécision est d'autant important que l'on cherchera par exemple à détecter des changements temporels de σ^0 , où des variations de K pourraient être malencontreusement interprétées comme étant des variations de σ^0 . En général, on peut s'accommoder d'une précision inférieure ou égale à 1 dB.

Dans le cadre des données polarimétriques du type SIR-C, l'étalonnage du système polarimétrique s'avère beaucoup plus compliqué, il implique la correction en contamination (cross-talk) entre les 2 antennes, l'étalonnage relatif en amplitude et en phase pour le déséquilibre entre canaux et finalement l'étalonnage en niveau absolu. (Freeman *et al.* 1995) indique une contamination négligeable entre canaux inférieure à -33 dB alors que (Sarabandi *et al.* 1995) observe après correction 0,5 dB de variation sur la différence d'amplitude et 5° sur la différence de phase. Néanmoins, les incertitudes sur ces calibrations sont plus importantes pour des angles de visée supérieurs à 17,5° ou en terrain accidenté en liaison avec la variation locale de la pente pixel à pixel (Freeman *et al.* 1995). Il faut donc être prudent sur la précision radiométrique avec les données SIR-C en terrain accidenté, car elle peuvent entacher plus largement l'estimation du coefficient de rétrodiffusion que pour les autres capteurs.

2.4.1.2 Imprécision due au speckle

Nous ne rentrerons pas ici dans le détail de la description de ce bruit, ayant fait l'objet de nombreux travaux quant à son comportement, sa description mathématique et les moyens à mettre en œuvre pour le réduire au maximum (Bruniquel and Lopes 1997). Disons simplement que ce bruit est lié au fait que dans une cellule de résolution, le champ rétrodiffusé après illumination par une onde plane (rayonnement dit cohérent) est la somme de champs rétrodiffusés élémentaires issus de plusieurs diffuseurs (feuilles, troncs, sol, etc), ayant chacun une amplitude et une phase. Or, dans la plupart des milieux naturels, l'arrangement de ces diffuseurs est plus ou moins aléatoire, ce qui crée des déphasages aléatoires entre les diffuseurs. Il en résulte un effet d'interférence créant une forte fluctuation de la puissance rétrodiffusée d'une cellule de résolution à une autre, donnant aux images une apparence marquée de sel et poivre.

Heureusement, cette fluctuation est très bien décrite statistiquement par une loi gamma à deux paramètres, ce qui a permis ces dernières années :

- de développer des filtres adaptatifs basés sur les lois statistiques régissant le *speckle*, afin de réduire la variance des données au maximum ;
- de quantifier l'imprécision sur la restauration de σ^0 due au *speckle*, et ce en fonction du niveau de réduction obtenu à l'aide du filtrage ou d'un simple moyennage local.

On peut démontrer que sur la base d'une distribution gamma du *speckle* et de sa propriété multiplicative, que le coefficient de variation CV (rapport de l'écart-type à la moyenne) de l'amplitude des pixels CN ou de leur intensité I=CN², pour une zone homogène (σ^0 de la scène stable), vaut :

$$CV_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} = \frac{0.523}{\sqrt{L}}; CV_I = \frac{\sigma_I}{\mu_I} = \frac{1}{\sqrt{L}}$$
 (2-21)

où L est le nombre de vue, correspondant au nombre d'échantillons indépendants moyennés afin de réduire la variance des données. Cette réduction de variance passe donc par une technique dénommé "multivues" (*multi-look*). Il s'agit d'un moyennage incohérent (sans tenir compte de la phase du signal) de L échantillons indépendants de même distribution. Cette technique est appliquée soit directement lors du traitement RSO, soit *a posteriori* sur l'image.

Dans le premier cas, ce traitement consiste à moyenner quelques vues indépendantes de la même surface obtenues en "découpant" artificiellement le faisceau d'antenne en plusieurs secteurs, grâce au découpage de la bande Doppler du signal rétrodiffusé. Ceci entraîne une réduction de la variance mais au détriment de la résolution spatiale (on dégrade d'autant la résolution). Il est à noter cependant que les échantillons ne sont pas totalement indépendants entre eux, et on parlera de nombre de vues équivalent (*equivalent number of looks*). Ainsi, les images fournies ont subit la technique du multivue avec un nombre de vue théorique variable (ERS-1 PRI : 3-vues ; JERS-1 : 3-vues ; SIRC : 8-vues...), mais dans les faits, le nombre effectif de vue est légèrement inférieur.

Suite à ce traitement, le bruit résiduel du *speckle* reste cependant élevé. Afin de diminuer ces effets résiduels, il s'agit d'opérer un multivue *a posteriori* sur les données RSO, et deux voies sont possibles :

- la première est basée sur l'utilisation de filtres spatiaux ou temporels adaptés à l'imagerie radar et aux statistiques du *speckle* (Bruniquel and Lopes 1997; Lopes 1995). Cependant si le filtrage augmente significativement la résolution radiométrique comme nous allons le voir, il possède l'inconvénient de dégrader une fois de plus la résolution spatiale (limites floues), quoique l'intégration de détecteurs de contours permettent de préserver dans une certaine mesure ceux-ci. Récemment (Bruniquel and Lopes 1997) ont montré l'intérêt du filtrage temporel (ou fréquentiel) entre canaux acquis à différentes dates, et appliqué pixel à pixel entre les canaux plutôt que dans une fenêtre de traitement centré sur le pixel à filtrer dans le cas spatial. Ceci permet de préserver largement la résolution spatiale initiale. Dans ce cas, il convient d'avoir une série temporelle d'images de la même zone ou des images multi-fréquences multi-polarisées ce qui n'est pas toujours le cas.
- la deuxième voie plus simple consiste à moyenner les valeurs d'un certain nombre de pixels d'une même surface homogène par la convolution d'une fenêtre de taille variable ou par moyenne par blocs, ce qui est possible lorsque cette surface est peu morcelée. Mais dans ce cas, les contours seront fortement dégradés.

Ainsi, l'application du multivue aux deux niveaux permet d'augmenter le nombre de vues effectif et de réduire d'autant la variance. Voyons maintenant comment en dépend la résolution radiométrique. Elle s'exprime par un intervalle de plus ou moins 1 écart-type autour de la moyenne, et s'exprime en dB en fonction du nombre du vue par:

$$\left[10\log\left(1-\frac{1}{\sqrt{L}}\right), 10\log\left(1+\frac{1}{\sqrt{L}}\right)\right]$$
(2-22)

De là, on peut en déduire un intervalle de confiance pour l'estimation de σ^0 . La Figure 2-6 donne cet intervalle aux niveaux 90%, 80% et 50% en fonction du nombre de vues L et pour L < 50 (Lopes 1995).



Figure 2-6 : Intervalle de confiance sur l'estimation du σ^0 pour un nombre d'échantillons indépendants d'après (Lopes 1995).

Considérant tout d'abord le nombre de vue initial des images, soit 3-vues par exemple, si on prend la valeur d'un pixel et que l'on calcule σ^0 sans moyennage, σ^0 est compris à 90% dans un intervalle de [-6;+3 dB] autour de la valeur du pixel, ce qui est très mauvais. En effet, la dynamique de la rétrodiffusion radar de couverts forestiers par exemple, est souvent largement en deçà de cet intervalle. Il faut donc augmenter a posteriori le nombre de vues par un des deux moyens décrits ci-dessus.

Ceci équivaut à utiliser N pixels de l'image pour réduire le *speckle*, que ce soit spatialement (fenêtre mobile) ou temporellement entre images. Dans ce cas, le nombre de vues équivalentes devient ENL (Equivalent Number of Looks : ENL), inférieur ou au mieux égal au produit NL. Par exemple pour N= 10 et L \approx 3, donc ENL \leq 30, la Figure 2-6 donne un intervalle de confiance de [-1,5;+1,2dB] à 90% ce qui reste important comme imprécision, mais parfois suffisant. Au delà de 50 échantillons indépendants, l'approximation gaussienne peut être utilisée (les intervalles à 90 %, 80 % et 50 % sont alors obtenus respectivement à ±1,65, ±1,28 et ±1,15 fois l'écart-type autour de la moyenne).

Dans ce cadre, et en vue d'une précision acceptable sur le σ^0 , le moyennage d'un échantillon d'au moins 100 vues indépendantes est nécessaire afin d'obtenir un intervalle de confiance correct [±0,4dB] pour les besoins de notre étude.

Du coup, le moyennage de plusieurs pixels entraîne une dégradation considérable de la résolution spatiale, et va donc déterminer l'échelle d'observation finale selon le multivue appliqué. Par exemple, dans le cas de pixels faisant 12,5x12,5 m, sous-tendant une résolution de 25 m, en appliquant un simple moyennage de 100 pixels (10x10), on fait passer la résolution de 25 m à environ 250 m, avec une taille de pixel à 125x125 m. C'est pourquoi l'on préfèrera utiliser des filtres adaptatifs temporels et spatiaux, qui dégraderont moins la résolution, surtout dans le cas temporel.

Dans tous les cas, malgré une résolution de départ de 25 m, on réalise ainsi que l'échelle d'observation pour un milieu forestier ne se fait pas du tout à l'échelle de quelques arbres comme on pourrait le croire, mais au minimum à l'échelle de quelques hectares (>1ha), et le radar devient donc plutôt adapté à une observation à l'échelle d'un petit peuplement ou de la parcelle d'aménagement par exemple. Ceci peut évidemment constituer une limite pour certains types d'application, par exemple pour l'aide à une gestion locale. C'est pourquoi le radar est plutôt considéré comme un outil d'observation plutôt régional à une échelle au mieux du 1:50000.

Intéressons nous maintenant au cas de la restauration de σ^0 en terrain accidenté.

2.5 Coefficient de rétrodiffusion : cas du terrain accidenté

On se doute que le cas du terrain accidenté est plus compliqué, et un des objectifs de ce travail est de valoriser l'utilisation des données RSO en terrain montagneux, impliquant l'utilisation d'une chaîne de post-traitement développée au LCT, car ce type de traitements n'existe pas encore commercialement.

Avant d'aborder le problème de restauration proprement dit, résumons tout d'abord la nature des perturbations de σ^0 en présence de relief.

2.5.1 Perturbations dues au relief

Dû au mode de visée latéral du RSO, nous allons voir qu'il est particulièrement sensible à la topographie des surfaces imagées (Figure 2-7). Le relief introduit deux types de perturbations : géométriques et radiométriques.

2.5.1.1 Perturbations géométriques



Figure 2-7 : Effets de la topographie sur les images RSO.

La Figure 2-7 résume l'impact de la topographie dû au mode d'imagerie. Il résulte sur les flancs exposés au radar une compression radiale (A: foreshortening) qui peut aller jusqu'à un basculement du relief (B: layover) alors qu'il peut se produire un phénomène d'ombre sur les flancs opposés (C: shadowing). Des corrections géométriques spécifiques aux données RSO sont donc nécessaires pour passer de la projection RSO (i,j) à une projection cartographique donnée (x,y,z). Ce problème est relativement bien maîtrisé maintenant, et nous pouvons avoir recours à un logiciel de correction existant. Il n'en va pas de même pour les perturbations radiométiques sur lesquelles nous allons nous étendre un peu plus.

2.5.1.2 Perturbations radiométriques

En conséquence des distorsions géométriques en terrain accidenté (Figure 2-7), des distorsions radiométriques apparaissent, liées comme nous le verrons d'une part à la variation de la taille des pixels au sol (Bayer *et al.* 1991; Holecz *et al.* 1992; van Zyl *et al.* 1993), et d'autre part de l'angle d'incidence local qui ne vaut plus α (2-17), mais θ_{loc} et qui sera décrit plus loin.

Dans ce cas, il apparaît nécessaire d'établir un modèle radiométrique d'images RSO valable en terrain accidenté, qui prend en compte non seulement les paramètres RSO perturbateurs mais également la topographie. Pour ce faire, il faut repartir de l'équation radar (2-16) et l'adapter pour prendre en compte les perturbations liées à la topographie de nature géométrique, en prenant sa forme intégrale :

$$< CN^{2} >= \frac{P_{t}\lambda^{2}q}{(4\pi)^{3}} \int \frac{G_{r}G_{t}}{R^{3}} \sigma^{\circ}(\theta_{loc}) dA = C \int \frac{G_{r}G_{t}}{R^{3}} \sigma^{\circ}(\theta_{loc}) dA$$
(2-23)

où l'on retrouve les mêmes termes qu'à l'équation (2-16), sauf que cette fois-ci les termes dépendant de l'incidence locale, soit Gr, Gt et R et σ^0 , sont intégrés sur l'aire différentielle dA interceptée par un pixel, ayant les dimensions δ_r en distance radiale (*slant range*) et δ_a en azimut, et interceptant une portion de terrain caractérisée par la pente α et l'azimut β . Or, on peut démontrer que pour un RSO spatial, les termes G et R peuvent être considérés constants dans le pixel, en présence ou non du relief (van Zyl *et al.* 1993), ce qui permet de les sortir de l'intégrale. De plus, rappelons que ces termes sont compensés par les agences spatiales.

De plus, on pose l'hypothèse de stationnarité de σ^0 au sein d'un pixel. Il s'agit d'une hypothèse forte, valable pour de bonnes résolutions RSO et un paysage peu morcelé. L'équation (2-23) devient alors :

$$< CN^{2} >= K'\sigma^{\circ}(\theta_{loc}) \int dA$$
 (2-24)
surfacepixel

Il reste donc le terme de l'intégrale d'aire qui est l'aire de rétrodiffusion que l'on dénommera A_{topo}, correspondant à la superficie du terrain interceptée au sein d'un pixel slant-range et qui dans le cas général d'un repère cartésien peut s'exprimer par :

$$A_{topo} = \int_{Surface} dA = \iint_{xy} \frac{dxdy}{\cos(\theta_r)\cos(\theta_a)}$$
(2-25)

où θ_r et θ_a sont les composantes de la pente locale respectivement en azimut et en distance radiale. Les limites de l'intégrale correspondent aux coordonnées (x,y) de l'interception du pixel considéré avec le sol. La constante d'étalonnage K' est différente, puisque dans ce cas-ci, elle n'inclut pas comme à l'équation (2-18) l'aire du pixel.

Ainsi, d'après l'équation (2-24), l'intensité du pixel dépend de la surface du terrain qui interagit avec l'onde électromagnétique (Figure 2-7). Un flanc faisant face au radar donnera au sein du pixel une surface interceptée plus grande qu'un flanc opposé, entraînant un compte numérique plus élevé.

Dans ce cas, l'intensité du pixel n'est plus proportionnel à σ^0 , et on parlera alors plutôt **d'image d'intensité de rétrodiffusion (***radar brightness***)** <**C**N²>=**K'** β^0 . En tenant compte du bruit multiplicatif du *speckle*, on obtient ainsi un nouveau **modèle d'image simplifié, valable en terrain accidenté** <u>et</u> plat, qui peut s'exprimer en fonction de σ^0 que l'on cherche à restaurer par :

$$CN^{2} = K'\beta^{\circ}S = K\left(\sigma^{\circ}(\theta_{loc})\frac{A_{topo}}{A_{plat}}\right)S$$
(2-26)

où l'on retrouve le modèle d'image (2-18) en terrain plat modifié adéquatement pour être généralisé au cas du terrain accidenté : on remarque que l'on doit retirer l'effet de A_{plat} qui était intégré dans K, tout simplement pour le remplacer par la valeur de l'aire A_{topo} en terrain accidenté. Aussi, σ^0 devient une fonction de θ_{loc} .

2.5.2 Restauration de 0° en terrain accidenté et précision

On voit donc apparaître dans ce modèle simple d'image les deux perturbations radiométriques, celle liée à l'aire de rétrodiffusion A_{topo} , et l'autre reliée à l'angle d'incidence local θ_{loc} . Dans le premier cas, il s'agit d'un problème purement géométrique de prise de vue indépendant de la nature de la surface, et sa résolution concerne un problème purement d'étalonnage (normalisation). Dans le deuxième cas, σ^0 dépend cette fois-ci physiquement de l'angle d'incidence local, comportement qui dépend du type de surface et des mécanismes d'interaction ondes-matière sous-jacents.

La restauration de σ^0 en terrain accidenté, comporte encore le problème de *speckle* et de constante d'étalonnage vus auparavant. A cela s'ajoute l'effet des deux termes perturbateurs. La restauration ici passe en plus par l'estimation de ces termes, et par l'inversion du modèle d'image.

Il n'existe pas de méthodes standardisées pour estimer les termes de perturbation A_{topo} et θ_{loc} , et encore moins de logiciels commerciaux pour appliquer une correction. Ceci a emmené le LCT à examiner les méthodes existantes d'estimation de ces termes, et à proposer si nécessaire une nouvelle méthode d'estimation. Celle-ci a été intégrée dans un logiciel complet de correction radiométrique des images RSO.

Examinons maintenant la nature de chaque terme de perturbation, les solutions existantes pour estimer ces termes et leurs limites.

Angle d'incidence local et modèle empirique de comportement angulaire

L'angle d'incidence local en terrain plat θ_{loc} de l'équation (2-26) est l'angle entre le vecteur incident et la verticale du lieu (normale à l'ellipsoïde). Or, en terrain accidenté, cet angle est transformé par la pente et l'azimut, et se situe entre le vecteur incident et le vecteur normal au terrain, tel que représenté à la Figure 2-8.



Figure 2-8 : Angle d'incidence local en présence de relief.

En un point donné du terrain, l'angle d'incidence local (θ_{loc}) est donné par le produit scalaire entre les vecteurs i et n :

$$\cos\theta_{loc} = \frac{-\overline{i} \cdot \overline{n}}{|i||n|} = \cos\alpha\cos\theta - \sin\alpha\sin\theta\cos(\beta - \phi)$$
(2-27)

avec :

- θ : angle d'incidence du RSO
- ϕ : azimut de visée du RSO
- α : pente du terrain
- β : azimut du terrain

Cet angle peut être estimé facilement si l'on possède un MNT. Ensuite, cet angle aura un impact qu'il conviendra de modéliser à des fins de correction. Le coefficient de rétrodiffusion radar varie physiquement en fonction de l'angle d'incidence local, suivant différents comportements angulaires, plus ou moins connus pour certains thèmes.

Des modélisations empiriques $\sigma^0=f(\theta_{loc})$ basées sur trois catégories de modèles sont proposées (Bayer *et al.* 1991; Holecz *et al.* 1992) : 1) un modèle en cosinus, 2) des modèles semi-empiriques basés sur des fonctions trigonométriques et les mécanismes d'interactions, 3) des modèles polynomiaux ou basés sur des transformations non linéaires. En milieu forestier la deuxième catégorie de modèles basés sur l'équation générale suivante a été utilisée (Teillet *et al.* 1985) :

$$\langle CN^2 \rangle = m\cos^n(\theta_{loc}) + q$$
 (2-28)
où θ_{loc} est l'angle d'incidence local définit à partir de l'équation (2-27), m, q et n sont des coefficients déterminés empiriquement. Ce modèle empirique de comportement angulaire n'a pas été validé théoriquement à des fins de généralisation, ce qu'il a été convenu de réaliser dans le cadre d'une partie de ce travail pour l'inclure dans le modèle final de correction.

Aire de rétrodiffusion et normalisation

L'aire de rétrodiffusion $A_{topo}=\int dA$ pour le cas du terrain accidenté, représentée à la Figure 2-9, provient de la projection des dimensions azimutale δ_a et radiale δ_r du pixel *slant* range sur la topographie locale de pente α et azimut β . L'expression rigoureuse de A_{topo} est donnée à l'équation (2-25), mais son estimation pose problème.

Une première approximation de cette projection sous hypothèse de plan tangent du terrain au sein du pixel est donnée par (Ulander 1996; van Zyl *et al.* 1993) :

$$A_{topo} = \frac{\delta_r \delta_a}{\sin \theta_{loc}}$$
(2-29)

avec θ_{loc} donné par l'équation (2-27). Cependant, une projection plus rigoureuse est réalisée en décomposant la projection selon δ_a et δ_r (van Zyl *et al.* 1993) :

$$A_{topo} = \frac{\delta_r}{\sin(\theta_r + \theta)} \cdot \frac{\delta_a}{\cos\theta_a}$$
(2-30)

où θ_r et θ_a sont respectivement les composantes de la pente du terrain dans la dimension azimutale et radiale de l'image, calculables à partir des angles de l'équation (2-27).



Figure 2-9 : Aire de rétrodiffusion Atopo au sein d'un pixel RSO slant-range.

En fait, cette estimation n'est valable que lorsque le terrain est localement assimilable à un plan, permettant la projection plane des tailles de pixel sur celui-ci (Figure 2-9). Or, dans le cas général, la topographie n'est évidemment pas plane au sein du pixel, en particulier dans des reliefs chahutés situés dans les zones de compressions radiales de l'image RSO (pentes faces au radar). On en revient donc au problème de trouver une solution numérique approchée à la résolution de l'intégrale :

$$A_{topo} = \int dA = \iint_{xy} \frac{dxdy}{\cos(\theta_r)\cos(\theta_a)}$$
(2-31)

Le LCT a donc développé une chaîne de post-traitement radiométrique permettant une meilleure estimation des termes de perturbation, et leur correction.

2.5.2.1 Chaîne de post-traitement LCT

L'implémentation d'une chaîne de correction des images radar acquises en terrain accidenté a débuté au sein du LCT avec les travaux basés sur les concepts de lancer de rayon et d'intégration de facettes, décrits par (Beaudoin *et al.* 1994; Beaudoin *et al.* 1995) pour les données ERS-1.

Cette méthode est basée sur la simulation de termes A_{topo} et θ_{loc} dans la géométrie réelle d'acquisition de l'image RSO (Figure 2-11). On y voit dans un repère cartésien un RSO en orbite observant à une distance R le terrain avec son ellipsoïde et la topographie représentée par le MNT. L'image bidimensionnelle RSO est composée de pixels dont chacun en distance radiale intercepte une portion de terrain plus ou moins grande selon la topographie, avec un angle d'incidence local variable.

Ce principe de simulation est intégré au sein de 5 étapes partant du MNT pour aboutir aux simulations utilisées pour corriger les images brutes β^0 (Figure 2-10) suivi seulement après cela de l'étape de géocodage. Nous reprenons ici dans ses grandes lignes les différentes étapes :



Figure 2-10 : Synopsis des différentes étapes de la chaîne de post-traitement ; A : corrections radiométriques ; B) géocodage.



Figure 2-11 : Principe de simulation par lancer de rayon et d'intégration par facettes à partir d'un modèle numérique de terrain (étape A3).

A1- le MNT dans une projection cartographique donnée (Lambert III pour notre site) est tourné et rééchantillonné dans l'espace radar (axe y parallèle à l'axe azimutal i.e. à la trace du satellite, et l'axe x parallèle à l'axe radial) par interpolation bilinéaire;

A2- le nouveau MNT, le capteur RSO et sa géométrie de prise de vue sont projetés dans un système cartésien ayant pour origine le centre de la terre qui est assimilée à une sphère ;

A3- est l'étape de simulation proprement dite, intégrant les notions de lancer de rayon et d'intégration de facettes. Arrivé à ce niveau-ci (Figure 2-11), une ligne de pixel dans la dimension radiale de l'image radar correspond à une ligne du MNT, et chacun des pixels successifs de cette ligne correspond au signal intégré dans les portes radar successives en distance radiale croissante R interceptant le MNT à X_{min} et X_{max}, d'où la notion de lancer de rayon. Suivant la topographie et la pente locale, le pixel radar inclut un nombre variable de facettes de terrain dans la direction radiale, d'où la notion d'intégration de facette. A partir du MNT, il est donc possible pour chaque facette i d'obtenir sa composante radiale θ_r et azimutale θ_a de la pente du terrain. La surface de chaque facette est alors estimée à partir de l'équation (2-30) approximée sous la forme d'une sommation discrète. L'angle d'incidence local est également calculé pour chaque facette à partir de la formule (2-27). Ensuite, au pixel est attribuée l'aire issue de la sommation de toutes les facettes en pondérant par un facteur F_i tenant compte de la fraction réelle de facette réellement comprise dans le pixel. Quant à l'angle d'incidence local du pixel, il sera la moyenne des angles d'incidence locaux calculé sur l'ensemble des facettes et pondéré par le facteur F_i;

A4- l'étape suivante consiste à superposer les images d'aire et d'angle d'incidence local à l'image radar réelle β^0 par la prise de quelques points d'amer et par transformation polynomiale d'ordre 1, afin de rattraper les erreurs planimétriques (translation) dues à l'imprécision des paramètres RSO utilisés;

A5- à partir de là, les simulations sont superposées aux images, et on applique les corrections radiométriques à l'aide du modèle d'image (2-32). Nous y reviendrons;

B- Enfin, la dernière étape est la correction géométrique permettant de géocoder l'image en la replaçant dans le système cartographique de départ (Lambert III), donnant la possibilité d'introduire ces images dans des bases de données géoréférencées comme les SIG. Cette dernière étape, dans le cadre de cette chaîne, a été réalisée en utilisant la méthode développé par (Guindon 1993; Guindon and Adair 1992) implémentée dans un logiciel commercial, qui reprend les étapes A1 à A5 sous une autre forme mathématique plus simple et sans effectuer de simulations fines comme nous le faisons à l'étape A3.

La chaîne d'un point de vue logiciel est représentée à la Figure 2-12, où l'on retrouve les deux étapes A et B, avec en entrée l'image et les paramètres RSO, et le MNT. En sortie, on retrouve les images corrigées à différents niveaux, géocodées ou pas, donnant ainsi beaucoup de souplesse dans l'utilisation de cette chaîne.

Cette chaîne de correction a été validée dans un premier temps pour les images RSO d'ERS-1 pour la discrimination forestière sur des forêts du Tarn et l'estimation de l'humidité de surface sur le site de Walnut-Gulch au USA (Beaudoin *et al.* 1995; Beaudoin *et al.* 1994; Piet 1994; Troufleau *et al.* 1994). Faisant suite à cette première étape nous avons, dans le cadre de ce travail, étendu la validité de la chaîne de correction à SIR-C/X-SAR et JERS-1 pour l'estimation de la biomasse forestière en terrain accidenté. Ces résultats, et ainsi que la méthode de correction sont présentés dans l'article de (Stussi *et al.* 1995) figurant en annexe du chapitre.

Cependant, cette méthode initiale de correction présente quelques limitations. Entre autres le géocodage n'est pas intégré directement dans la chaîne de correction nécessitant le passage à un logiciel commercial (PCI) dont le modèle géométrique utilisé fait appel à plusieurs simplifications altérant quelque peu la qualité finale du géocodage. Sachant qu'il existe des modèles géométriques plus performants, par exemple celui utilisé par l'IGN, et qu'il est possible de s'appuyer entièrement sur celui-ci afin de prendre en compte de façon plus rigoureuse les problèmes de distorsions radiométriques, une nouvelle méthode intégrée de corrections géométriques et radiométriques en terrain accidenté a été développée (Beaudoin *et al.* 1996; Castagnas *et al.* 1997) mais n'a pu être utilisée dans le cadre de ce travail.

2.5.2.2 Restauration et précision

Restauration

La restauration par correction radiométrique dans la pratique se passe selon les étapes de la Figure 2-12 et sont repris dans ce qui suit. Tout d'abord après simulation et superposition des termes perturbateurs à l'image, on peut appliquer les corrections radiométriques dans la géométrie des images d'origine (i,j); rappelons le modèle d'image en terrain accidenté, mis sous une forme légèrement différente pour commodité, et soustendant les indices i,j pour la position du pixel en ligne-colonne, sauf pour K :

$$CN^{2} = K\sigma^{\circ}C_{\theta}C_{A}S$$

avec:
$$C_{\theta} = f(\theta_{loc}) \qquad (2-32)$$
$$C_{A} = \frac{A_{topo}}{A_{plat}}$$

où les deux termes additionnels par rapport au modèle en terrain plat sont les termes perturbateurs $C_{\!\theta}$ et $C_{\!A}.$



Figure 2-12 : Chaîne de post-traitement des images RSO développée par le LCT.

48

Chapitre 2

La première étape est d'obtenir une intensité de pixel normalisée par l'aire réelle du terrain A_{topo} , par l'application d'un premier facteur de correction C_A :

$$CN'^{2} = \frac{CN^{2}}{C_{A}} = K\sigma^{\circ}C_{\theta}S$$
(2-33)

La deuxième étape est d'obtenir σ^0 compensé angulairement à l'aide d'une fonction angulaire $C_{\theta}=f(\theta_{loc})$, qui dans notre cas, sur la base de l'équation empirique (2-28), et dont le développement sera détaillé au Chapitre 4 et la validité seront étayés par la théorie au chapitre 6, vaut :

$$C_{\theta} = \frac{\cos^{n}(\theta_{loc})}{\cos^{n}(\theta)}$$
(2-34)

Dans ce cas, l'intensité du pixel totalement corrigé est simplement :

$$CN''^{2} = \frac{CN'^{2}}{C_{\theta}} = K\sigma^{\circ}S$$
(2-35)

où l'on retrouve en théorie une valeur proche de celle d'un terrain en terrain plat, et où l'estimation passe par le moyennage de CN^{"2} en présence de *speckle*.

Quant au géocodage, appliqué après correction, il consiste à projeter les comptes numériques CN, CN' ou CN" selon, de la projection image (i,j) à la projection cartographique (x,y,z), ce qui se fait par l'inversion du modèle géométrique de Guindon (Guindon and Adair 1992) implémenté dans le logiciel PCI.

<u>Précision</u>

En dB, l'estimation globale de σ^0 se fait par :

$$\sigma^{\circ}(dB) = 10\log < CN^{2} > -10\log K - 10\log C_{\theta} - 10\log C_{A}$$
(2-36)

Ainsi, se rajoute en dB l'imprécision des termes correcteurs C, en plus de K et du moyennage par multivue < >.

Dans la pratique, il est impossible de formuler *a priori* l'imprécision sur les facteurs correcteurs, car elle dépend d'une foule de paramètres liés au MNT, aux paramètres RSO, à la simulation n'utilisant pas de modèle déterministe (lancer de rayon) et à diverses approximations utilisées, impossible à intégrer dans une formulation analytique simple.

Dans ce cas, la façon dont nous allons procéder pour estimer l'imprécision, lors de la phase d'analyse, est de comparer la variabilité de σ^0 restauré en terrain accidenté par rapport à σ^0 en terrain plat, pour le même type de cible. L'analyse du coefficient de

variation devrait en effet permettre de préciser l'erreur supplémentaire sur l'estimation de σ^0 apportée par les termes de correction. Il apparaît évident que l'erreur globale d'estimation sera au moins légèrement dégradée.

2.6 Conclusions

Nous avons vu que les bases physiques concourant à la formation d'une image de σ^0 sont relativement complexes et très différentes de celles utilisées en optique, ce qui rend peu intuitives les images issues d'un RSO. Nous avons également vu que cette quantité est entachée de sources d'erreurs multiples dues au type de rayonnement utilisé (cohérent) et à son mode d'acquisition (visée latérale sur le relief), pouvant avoir un impact important en vue de l'accès à l'information thématique nous intéressant et contenue dans σ^0 .

Heureusement, il est relativement aisé de remonter à cette quantité à partir des images RSO spatioportées, et ce grâce à un modèle simple d'image valable autant en terrain plat qu'accidenté. Il fait certes appel à des approximations, mais il devrait suffire pour la restauration de σ^0 dans beaucoup de cas de figure, par rapport aux besoins en précision recherchée. Cette restauration cependant doit passer par l'utilisation d'une chaîne de posttraitement adaptée intégrant un MNT.

A partir d'ici, on peut tenter d'analyser le contenu informatif de la rétrodiffusion radar en termes de paramètres forestiers et de perturbation topographique, grâce à un dispositif expérimental adapté et basé dans un SIG. Ce dispositif fait l'objet du prochain chapitre.

Références bibliographiques

- Bayer, T., Winter, R., and Schreier, G. (1991). "Terrain influences in SAR backscatter and attempts to their correction." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 29(3), 451-462.
- Beaudoin, A., Castagnas, L., Stussi, N., Castel, T., Gigord, P., and Sylvander, S. (1996). "Généralisation et validation d'une méthode de correction radiométrique des images radar satellitales acquises en terrain accidenté." N°95/CNES/0440, CNES, Toulouse.
- Beaudoin, A., Castel, T., and Rabaute, T. (1995). "Apport des produits interférométriques ERS à des fins d'inventaire forestier." Convention CNES #94/CNES/0239, CNES, Toulouse.
- Beaudoin, A., Deshayes, M., Piet, L., Stussi, N., and Le Toan, T. (1994). "Retrieval and analysis of temperate forest backscatter signatures from multitemporal ERS-1 data acquired over hilly terrrain." 1st Symposium on ERS-1 Pilot Projects, 283-289.
- Beaudoin, A., Stussi, N., Troufleau, D., Desbois, N., Piet, L., and Deshayes, M. (1995). "On the use of ERS-1 SAR data over hilly terrain : necessity of radiometric corrections for thematic applications." Proceedings of IGARSS'95 Symposium, 2179-2182.
- Boerner, W. M., and Yan, W. C., (1990). "Introduction to radar polarimetry, with assessements of the historical development and of the current state of art." Journées Internationales de la polarimétrie radar, 20-22 Mars, 1-64.
- Bruniquel, J. (1996). "Contribution des données multi-temporelles à l'amélioration radiométrique et à l'utilisation d'images de Radars à Synthèse d'Ouverture,", Thèse de doctorat, Univertité Paul Sabatier, Toulouse.
- Bruniquel, J., and Lopes, A. (1997). "Multi-variate optimal speckle reduction in SAR imagery." International Journal of Remote Sensing, 18(3), 603-627.
- Castagnas, L., Stussi, N., Beaudoin, A., Castel, T., Sylvander, S., and Gigord, P. (1997). "Une méthode unifiée de correction des images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) acquises en terrain accidenté." 7ième Symposium International en Mesures Physiques et Signatures en Télédétection.
- Chandrasekhar, S. (1960). Radiative transfer, New York.
- Chapman, B., Alves, M., and Freeman, A. (1995). "Validation and calibration of JERS-1 SAR imagery." Proceedings of the JERS-1 Results Reporting Meeting.
- Desnos, Y.-L., Valero, J.-L., and Loiselet, M. (1993). "Jers-1 and ERS-1 SAR calibration experiments over Flevoland." Proceedings of IGARSS'93 Symposium, 955-957.
- Elachi, C. (1988). "Spaceborne radar remote sensing : applications and techniques." IEEE Press.
- Freeman, A., Alves, M., Chapman, B., Cruz, J., Kim, Y., Shaffer, S., Sun, J., Turner, E., and Sarabandi, K. (1995). "SIR-C data quality and calibration results." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33(4), 848-856.
- Freeman, A., Alves, M., and Williams, J. (1993). "Calibration results for JERS-1 SAR data produced by the Alaska SAR facility." Proceedings of IGARSS'93 Symposium, 965-967.
- Guili, D. (1986). "Polarization diversity in radars." Proc. of the IEEE, 74(2), 245-269.
- Guindon, B. (1993). "Aspects of digital elevation data requirements for operational geocoding of radarsat imagery." Canadian Journal of Remote Sensing, 19(2), 131-139.
- Guindon, B., and Adair, M. (1992). "Analytic formulation of spaceborne SAR image geocoding and value-added product generation procedures using digital elevation data." Canadian Journal of Remote Sensing, 18(1), 2-12.
- Holecz, F., Meier, E., and Nüesch, D. (1992). "Postprocessing of relief induced radiometric distorted spaceborne SAR imagery." SAR Geocoding : Data and Systems, G. S. (Ed.), ed., 301-351.
- Huynen, J. R. (1965). "Measurment of the target scattering matrix." Proc. of the IEEE, 936-946.
- Jordan, R., Huneycutt, L., and Werner, M. (1995). "The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 829-839. JPL. (1995). "SAR leader file image : calibration data record.", NASA/JPL, Pasadena California.
- Laur, A. (1992). "Derivation of backscattering coefficient in ERS-1.SAR.PRI. products." ESA/ESRIN, 0(1), 17p.
- Laur, H. (1989). "Analyse d'Images radar en télédétection : discriminateurs radiométriques et texturaux," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 244p.
- Lopes, A. (1993). "Systèmes et modèles de mesure." Cours de DEA Astrophysique, Géophysique et Techniques Spatiales, Toulouse.
- Lopes, A. (1994). Cours du DEA Astrophysique, géophysique et Techniques Spatiales, CESR (UPS/CNRS).
- Lopes, A. (1995). "Améliorations radiométriques pour la cartographie et la classification d'images radar.", CESBIO, Toulouse.

- Manson, A. C., and Boerner, W.-M. (1985). "Interpretation of high-resolution polarimetric radar target down-range signatures using Kennaugh's and Huynen's target characteristic operator theories." Inverse Methods in Electromagnetic Imaging, W.-M. B. e. a. eds. ed., 695-720.
- NASDA. (1993a). "Image quality of SAR/OPS." JERS-1 newletter, 1, 1-8.
- NASDA. (1993b). "User's guide to NASDA SAR products.", NASDA.
- Nghiem, S. V. (1991). "Electromagnetic wave models for polarimetric remote sensing of geophysical media," Doctor of Philosophy, MIT, Boston, 192p.
- Nghiem, S. V., Yueh, S. H., Kwok, R., and Li, F. K. (1992). "Symmetry properties in polarimetric remote sensing." *Radio Science*, 27(5), 693-711.
- Piet, L. (1994). "Discrimination forestière en terrain accidenté à l'aide de données Radar.", ENGREF, Montpellier, 37p.
- Sarabandi, K., Pierce, L. E., Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Stiles, J. M., Chiu, T. C., De Roo, R., Hartikka, R., Zambetti, A., and Freeman, A. (1995). "Polarimetric calibration of SIR-C using point and distributed targets." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 858-866.
- Stussi, N., Beaudoin, A., Castel, T., and Gigord, P. (1995). "Radiometric correction of multiconfiguration spaceborne SAR data over hilly terrain." *CNES/IEEE international* symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications, 457-467.
- Teillet, P. M., Guindon, B., Meunier, J. F., and Goodenough, D. G. (1985). "Slope-aspect effects in Synthetic Aperture Radar imagery." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 39-49.
- Troufleau, D., Beaudoin, A., Vidal, A., Moran, M. S., Goodrich, D. C., and Washburn, J. "Importance des corrections radiométriques dues au relief pour les données SAR du satellite ERS-1 : applications à l'hydrologie." Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Intéractions Surface Continentale / Atmosphère, Montpellier.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1982). *Microwave remote sensing : active and passive*, Artech House, Norwood.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1986). *Microwave remote sensing : active and passive*, Artech House, Norwood.
- Ulaby, F. T., and van Zyl, J. J. (1990). "Wave properties and polarization." Radar polarimetry for geoscience applications, C. E. F. T. Ulaby, ed., Artech House, Norwood, p364.
- Ulander, L. M. H. (1996). "Radiometric slope correction of synthetic-aperture radar images." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 34(5), 1115-1122.
- van Zyl, J. J. (1990). "Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 28(3), 337-348.
- van Zyl, J. J., Chapman, B. D., Dubois, P., and Shi, J. (1993). "The effect of topography on SAR calibration." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31(5), 1036-1043.
- van Zyl, J. J., Papas, C. H., and Elachi, C. (1987). "On the optimum polarizations of incoherently reflected waves." *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, AP-35(7), 818-824.
- Zink, M., and Bamler, R. (1995). "X-SAR radiometric calibration and data quality." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 840-847.

Chapitre 3

Le dispositif expérimental



Chapitre 3

Le dispositif expérimental

3.1 Description du site d'étude	53
3.2 Mise en place des SIG et intégration des données de base	56
3.2.1 Mise en place des SIG 3.2.2 Données de bases intégrées dans le SIG	56 56
3.3 Expérimentations et mesures	59
 3.3.1 Caractéristiques et choix des parcelles échantillonnées 3.3.2 Mesures forestières 3.3.2.1 Mesures botaniques pour la caractérisation architecturale du pin noir 3.3.2.1.1 Protocole des mesures 3.3.2.1.2 Analyse des mesures Analyse des troncs (A1) Analyse des branches (A2 et A3) 3.3.2.1.3 Synthèse sur les mesures botaniques 3.3.2.1 Protocoles des mesures 3.3.2.2 Mesures dendrométriques 3.3.2.1 Protocoles des mesures Protocole pour l'estimation du cubage/ha Protocole pour l'estimation de la biomasse compartimentée 3.3.2.2 Mesures dendrométriques Estimation des volumes de fûts Erreur d'estimation Comportement et corrélation 3.3.2.3 Mesures de biomasse 3.3.2.3 Mesures de teneur en eau Mesures préliminaires Mesures simultanées au passage de SIR-C/X-SAR 3.2.4 Conséquences 	$\begin{array}{c} 60\\ 61\\ 61\\ 61\\ 64\\ 65\\ 67\\ 69\\ 69\\ 69\\ 71\\ 71\\ 71\\ 73\\ 74\\ 77\\ 80\\ 80\\ 81\\ 83\end{array}$
3.4 Données RSO acquises sur le site	83
3.5 Conclusions	84
Références Bibliographiques	86

•

Chapitre 3 Le dispositif expérimental

"Le plaisir des bois de pins : L'on y évolue à l'aise (parmi ces grands fûts dont l'apparence est entre le bronze et le caoutchouc). Ils sont bien débarrassés. De toutes les branches. Il n'y a point d'anarchie, de fouillis de liane, d'encombre. L'on s'y assied, s'y étend à l'aise. Il règne un tapis partout. De rares rochers les meublent, quelques fleurs très basses. Il y règne une atmosphère réputée saine, un parfum discret et de bon goût, une musicalité vibrante mais douce et agréable. Ces grands mâts violets, encore dans leur gangue de lichens et d'écorces ravinées, feuilletées.

Leurs branches se dépoilent et leurs troncs se décortiquent.

Ces grands fûts, tous d'une espèce parfaitement définie. Ces grands mâts nègres ou tout du moins créoles." Francis Ponge

3.1 Description du site d'étude

La zone d'étude choisie est une région d'environ 4000 km² située dans le département de la Lozère (48) correspondant à la région physiographique des grands Causses au sud du Massif central (Figure 3-1). La physiographie de cette région se résume à la présence de plateaux calcaires relevés à une altitude de 500 m à 1200 m, profondément entaillés de canyons (par exemple les gorges du Tarn et de la Jonte). Ces Causses se distinguent des autres régions naturelles par leur unité lithologique et topographique, et leur hydrologie (Marsteau and Agrech 1995). Le modelé karstique, dû à la dissolution des roches calcaires par les eaux météoriques (dolines sur les plateaux) constitue le trait original du relief caussenard. Quant aux sols, ils reflètent par leur variété la diversité des matériaux parentaux. Ils portent également les traces de la richesse en calcium du substratum et montrent les séquelles d'une longue occupation agro-pastorale (Laganne 1988). L'occupation du sol de cette région peut se séparer géographiquement en deux groupes :

- d'une part, dans les vallées on distingue des pâturages ainsi que des cultures variées et morcelées. Les cours d'eau, les axes routiers et les infrastructures humaines avec quelques villages et des petites industries sont également présents. Seule la ville de Mende présente un tissu urbain plus important,

- d'autre part, les Causses supportent en proportions variables des parcelles forestières installées sur des pelouses.

Ainsi, dans le cadre d'un programme actif de Restauration des Terrains de Montagnes (RTM), une phase de reboisement a été entreprise à la fin du 19^{ème} Siècle. La surface boisée du département de la Lozère est passée de 30 000 ha environ vers 1850 à 200000 ha en 1982 (Marsteau and Agrech 1995) modifiant la physionomie de cette zone. L'érosion des terres combinée à l'exode rural de cette région a ainsi permis la spectaculaire réussite des boisements sur les Causses. Le pin noir d'Autriche (*Pinus nigra nigricans* Host., Pinaceae) s'est révélé le plus « robuste des conifères et le moins délicat » sur le choix du terrain et a donc été majoritairement utilisé dans le reboisement (Dreyfus 1990). Notre choix des sites expérimentaux s'est porté sur deux forêts de pins noirs d'Autriche :

• d'une part, la forêt domaniale de Mende d'une superficie de 5400 ha, constituée de plus de 500 parcelles homogènes équiennes allant de 0 à 140 ans,

• d'autre part, la forêt du Causse Méjean d'une superficie de 1200 ha, composée également de parcelles équiennes de pin noir, présentant une gamme d'âges intermédiaires (20 à 50 ans) peu représentés sur la forêt domaniale de Mende.

Ainsi, sur les 5400 ha de la forêt domaniale de Mende, près de 3000 ha sont situés sur des pentes à flanc de Causse (Mende, Changefège, Sauveterre) jouant un rôle principal de protection contre les érosions. La forêt du Causse Méjean est située sur le plateau ondulé où les pentes n'excèdent que très rarement les 10° et est dédiée à la production de pâte à papier.



Figure 3-1 : Localisation de la zone d'étude.

Ces deux forêts font partie de la zone septentrionale de la région des grands Causses. Les sols forestiers des deux sites se présentent comme des reliquats de sols anciens protégés par l'introduction de la forêt de pins noirs. Ces sols sont en pleine reconstitution grâce à la présence stabilisatrice des futaies de pins noirs, phénomène plus visible sur les bordures et les pentes avec néanmoins d'importantes variations relatives d'épaisseur avec les sols du plateau. Ces variations peuvent dans une certaine limite expliquer la variation de production par la variation de la réserve utile des sols (Timbal *et al.* 1985), en liaison également avec la pente et la topographie locale comme l'a observé (Epenoux d' 1992) pour les forêts de pin noir d'Autriche des Alpes du sud, et avec la température minimale au moment de la croissance comme l'indique (Guyon 1986).



b)

Figure 3-2 : Exemple de parcelles de pins noirs d'Autriche âgés de a) 100 ans et b) 17 ans localisées en forêt domaniale de Mende sur le Causse de Sauveterre.

3.2 Mise en place des SIG et intégration des données de base

Les deux sites expérimentaux composés de peuplements monospécifiques équiennes de pins noirs (Figure 3-2), sont suivis depuis de nombreuses années par l'Office National des Forêts (ONF) pour la forêt domaniale de Mende et plus récemment par la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF) pour la forêt du Causse Méjean. Ce suivi nous a permis de disposer dans un premier temps de bases de données forestières documentées, nous permettant de mettre en place un SIG pour chaque site.

3.2.1 Mise en place des SIG

Pour la forêt domaniale de Mende, le premier document cartographique de base utilisé a été la carte du parcellaire forestier de l'ONF au 1:10 000 et reporté sur un fond de carte IGN. Ce parcellaire a été numérisé et a servi de base au SIG (plus de 500 parcelles). Les surfaces de chaque parcelle numérisée ont été comparées à des fins de validation à leurs surfaces planimétriques fournies par l'ONF. L'erreur moyenne sur la surface est de l'ordre de 2% ce qui reste très acceptable.

Dans le cas de la forêt du Causse Méjean, la numérisation s'est faite sur les parcelles forestières reportées sur un fond de carte IGN au 1:25 000. Cette forêt plantée entre 1960 et 1965 dans le cadre d'un programme de reboisement du Fonds Forestier National (FFN) est sous tutelle de la DDAF et appartient à des propriétaires privés (Figure 3-3).

L'intérêt de la mise en place de SIG est la possibilité d'incorporer et de mettre en correspondance de multiples sources d'information, du moment que celles-ci sont dans le même référentiel cartographique que la couverture de base. Différents types de données de bases (ONF, DDAF, IGN, IFN...) sont venus compléter et enrichir le SIG.

3.2.2 Données de bases intégrées dans le SIG

Seules les données intégrées dans le SIG de la forêt domaniale de Mende, où une série plus complète d'informations a pu être compilée, seront présentées. Les données sur les peuplements de la forêt du causse Méjean ayant eu principalement un rôle de compléments aux données de la forêt domaniale de Mende ne seront pas abordées.

Documents cartographiques thématiques

Ces documents sont issus de source ONF au 1:25000 et comprennent :

- les classes d'âge (0 à 140 ans par pas de 20 ans);
- les stations forestières;
- les unités de risques de glissement de terrain;
- la géologie simplifiée;
- le réseau routier simplifié;
- les principaux cours d'eau;
- les principales zones urbaines.

Modèle Numérique de Terrain

Un modèle numérique de terrain (MNT) est essentiel à l'étude. D'une part, le MNT permet d'obtenir l'information de pente et d'exposition nécessaire à la compréhension de l'interaction micro-ondes/végétation en terrain accidenté. D'autre part, ces mêmes informations permettent éventuellement de corriger les images des effets de relief (distorsions radiométriques et géométriques) grâce à une chaîne de post-traitements des données RSO acquises en terrain accidenté, développée au LCT (Beaudoin *et al.* 1994). Finalement, ces paramètres affectent potentiellement la productivité des peuplements et donc le bio-volume que l'on cherche à quantifier par télédétection RSO. Le Tableau 3-1 reprend les caractéristiques du MNT IGN utilisé et est présenté à la Figure 3-3. Mentionnons que ce MNT a été obtenu dans le cadre d'un accord de collaboration LCT-IGN portant sur les problèmes de post-traitement des données RSO en terrain accidenté et l'apport de ces données pour la cartographie.

Région	Partie département de la Lozère
Coordonnées : coin sup. gauche	44°46'N 1°1'E
coin inf. droit	44°6'N 1°27'30"E
Superficie	50 x 80 km
Maille	50 m
Projection	Lambert III
Précision altimétrique	3-5 m

Tableau 3-1 :Caractéristiques du MNT IGN sur la zone d'étude.

<u>Couverture aérienne</u>

Une couverture aérienne a été réalisée par l'IFN en 1990 pour tout le département de la Lozère. Il s'agit de clichés infrarouge couleur à l'échelle du 1:17 000 servant à dresser l'inventaire forestier par photo-interprétation. Cette couverture aérienne nous permet d'obtenir des informations visuelles complémentaires sur la nature et la structure des peuplements (composition, hétérogénéité, état des coupes et éclaircies, présence de rochers dans les zones escarpées...) par rapport à l'inventaire qui en est déduit. Ces photos permettent aussi de déterminer des surfaces homogènes au sein des peuplements, afin de sélectionner les parcelles de base présentant une superficie utilisable suffisante pour la corrélation entre données de terrain et données images (en rappelant qu'il faut un nombre minimal de pixels radar pour l'estimation du coefficient de rétrodiffusion sur une zone homogène). Ces données ne sont pas directement intégrées dans le SIG (données analogiques) mais pourraient l'être après numérisation et rectification géométrique appropriée.

Carte numérique d'inventaire de l'IFN

Dans le cadre d'un accord cadre de collaboration entre le LCT et l'IFN, la couverture des types forestiers au format Arc-Info a été récupérée et directement intégrée dans le SIG. Cette couverture comprend les 52 types forestiers définis par l'IFN.

Cette carte générée par l'IFN utilise une méthode consistant à délimiter précisément par photo-interprétation les types forestiers sur les photographies aériennes et à reporter ces limites sur un transparent de fond de carte IGN au 1:25 000 ou au 1:50 000 (Chevrou 1988; Chevrou *et al.* 1988). Puis, les divers polygones délimitant les différents types sont numérisés puis transférés sur support informatique afin d'élaborer une carte numérique.





Bases de données dendrométriques

Deux bases de données dendrométriques ont été compilées :

- une première concerne un inventaire forestier réalisé sur le Causse de Mende par les étudiants de l'ENGREF en 1988-89 et en 1990-91. Cet inventaire concerne l'ensemble des parcelles présentes sur la partie occidentale du Causse de Mende. Le mode d'échantillonnage a été réalisé selon une grille ayant un pas de 100 m où chaque nœud de la grille est systématiquement échantillonné. Au niveau des nœuds, une placette de 10 m de rayon est délimitée à l'intérieur de laquelle des mesures de hauteur dominante (sur les 3 plus gros arbres), de densité, de surface terrière et de volume sont réalisées. Au total, ce sont près de 100 placettes sur lesquelles des mesures ont été effectuées. Dans une deuxième phase, l'ensemble des coordonnées géographiques des nœuds (centres des placettes) a été numérisé de façon à générer un plan d'information (au format point) intégrable dans le SIG. Ils apparaissent sous forme de croix à la Figure 3-3;
- par ailleurs, nous avons eu accès à la base de données dendrométriques de l'IFN. Celle-ci contient les paramètres dendrométriques de base et parfois des paramètres dendrométriques secondaires (volume des branches principales, volume à hauteur de découpe...). Ces paramètres sont mesurés dans un ensemble de 3 placettes d'échantillonnage circulaires concentriques (6, 9 et 15 m de rayon), ayant ensemble une densité spatiale comprise entre 0,01/ha et 0,0025/ha. Ainsi, environ 80 points de mesures existent sur la forêt domaniale de Mende respectivement obtenus en 1979 et 1992 (2ème cycle et 3ème cycle de mesures respectivement). Ces points apparaissent sous forme d'astérisques à la Figure 3-3.

Ces bases de données sont extrêmement précieuses afin d'analyser les images RSO et d'alléger les mesures de terrain. Cependant, un jeu de placettes spécifiquement adaptées à l'étude a été utilisé, impliquant une importante phase d'expérimentation sur le terrain. En effet, nous avons vu que le phénomène de speckle (introduit au chapitre précédent) dégrade la résolution radiométrique. Afin d'améliorer cette résolution il est nécessaire de moyenner le signal soit au travers de filtres, soit comme nous l'avons vu au chapitre 2 en extrayant le signal sur des zones d'une taille suffisante (> 100 pixels soit > 1,5 ha). Ainsi, l'échelle d'échantillonnage de l'IFN n'est pas idéale pour la mise en correspondance avec les pixels radar. De plus, l'étude de l'impact de la topographie sur le signal radar implique également la sélection d'unités homogènes localement de taille supérieure à 2,5 ha situées en conditions topographiques variées.

3.3 Expérimentations et mesures

Malgré l'existence de bases de données dendrométriques sur le site, la plupart des paramètres forestiers ont été obtenus par des mesures *in situ* sur des parties de parcelles forestières échantillonnées, dénotées **unités élémentaires homogènes**.

Plusieurs campagnes ont été nécessaires (Tableau §A3.1 en annexe du Chapitre 3) en fonction des types de mesures forestières réalisées nécessaires à l'étude :

- botaniques pour la caractérisation architecturale du pin noir via AMAP;
- dendrométriques (diamètre, densité de tiges, hauteur, etc....) et de bio-volume compartimenté;
- hydriques sur la teneur en eau pondérale des troncs, branches et aiguilles.

3.3.1 Caractéristiques et choix des parcelles échantillonnées

A partir des couvertures contenues dans le SIG, nous avons cherché à sélectionner des parcelles homogènes en âge, structure et angle d'incidence local (rappel : angle entre la normale au terrain et le vecteur radar incident, introduit au chapitre 2). Ces parcelles nous ont permis d'étudier et de comparer le comportement du signal radar en prenant en compte la structure, la biomasse et les effets liés à la topographie au travers du paramètre intégrateur qu'est l'angle d'incidence local, synthétisant les conditions de site et de la visée radar. Cette sélection s'est faite selon la démarche présentée à la Figure 3-4 :



Figure 3-4 : Organigramme de la méthodologie d'obtention des unités à échantillonner à partir du SIG et du MNT.

La Figure 3-4 résume ce choix d'unités élémentaires homogènes réalisé principalement au travers du SIG. Ainsi, après l'intégration dans le SIG de l'image d'angle d'incidence local (obtenue *via* la chaîne de post-traitement développée au LCT), un croisement entre ce plan et la couverture des parcelles forestières est réalisé. Le résultat est une nouvelle couverture représentant des zones localement homogènes en âge et situation topographique. Sur ce plan intermédiaire sont ensuite appliqués les critères de sélection en taille et homogénéité spatiale visant à faire émerger des unités élémentaires homogènes à échantillonner. La démarche montre la place centrale du SIG, permettant entre autres de mettre en correspondance l'information géographique issue de différentes sources. A la fin de notre démarche, 58 unités élémentaires homogènes à échantillonner ont été sélectionnées sur les critères de taille (≥ 2 ha) et d'homogénéité du peuplement (déterminée par photo-interprétation). Les parcelles ainsi obtenues (Figure 3-3) ont fait l'objet de mesures forestières intensives : dendrométrie, biomasse (Tableau 3-3) et, pour certaines d'entre elles, des mesures hydriques et botaniques.

3.3.2 Mesures forestières

Sous le terme de mesures forestières, sont ici regroupées les mesures dites botaniques intervenant dans le calage du modèle architectural AMAP, les mesures dendrométriques classiques (diamètre, densité, hauteur....), de biomasses compartimentées (tronc, branches, aiguilles) et, enfin, les mesures de teneur en eau (du tronc, des branches, des aiguilles). Nous reprenons ici un à un chacun de ces types de mesures.

3.3.2.1 Mesures botaniques pour la caractérisation architecturale du pin noir

Ces mesures ont eu pour objectif principal de caler le moteur de croissance AMAP (Barczi *et al.* 1996). Elles nécessitent un protocole spécifique mettant en jeu un codage basé sur une représentation formelle de la plante (Godin *et al.* 1997). Le protocole et l'analyse des résultats seront essentiellement illustrés pour les arbres de 20 ans (analyses réalisées par Demers 1997).

3.3.2.1.1 Protocole des mesures

L'échantillonnage s'est effectué sur un sous-ensemble de 3 unités de pins noirs d'Autriche de 10, 20 et 40 ans. Sur chaque unité respectivement de 10 et 20 ans (unités n° 15 pour les 20 ans), 30 arbres, à structure régulière et sans traumatisme, sont sélectionnés, abattus et échantillonnés. Pour les arbres de 10 ans c'est un total de 100 arbres qui ont été mesurés en hauteur et diamètre dont 50 on été décrits sur le tronc uniquement. De la parcelle de 40 ans (unité n° 11), pour laquelle la variabilité est moins importante, seuls 3 arbres dans un premier temps ont été échantillonnés, ce qui reste néanmoins insuffisant et demanderait à être complété. Il est à noter que cet ensemble d'unités fait partie de la forêt domaniale de Mende pour des situations topographiques peu marquées (pente < 10°).

Les mesures ont été réalisées suivant un protocole ayant pour objectif la caractérisation et la quantification de l'architecture de l'arbre via une représentation formelle de celui-ci (Godin et al. 1997). La démarche repose sur la notion de gradient morphogénétique (Barthélémy et al. 1996). Puisqu'un gradient suppose une variation de paramètres en fonction de positions topologiques, il n'est alors pas nécessaire d'échantillonner l'intégralité de l'arbre. La stratégie d'échantillonnage repose donc sur une excellente connaissance architecturale a priori de l'espèce. Celle-ci permet de déterminer un minimum de paramètres requis en adéquation avec les objectifs de l'étude et la représentativité statistique recherchée de l'échantillon.

L'ensemble des mesures a été réalisé sur les Unités de Croissance (UC) correspondant à une vague de croissance (allongement) limitée par des arrêts de croissance. L'UC est, dans notre cas, l'entité botanique élémentaire de description de l'architecture de l'arbre. Pour chaque unité de croissance du tronc (dénoté A1) et des différents ordres de branches successifs dénotés : A2, A3, A4...An, les paramètres suivants ont été récoltés: • l'année de formation,

le diamètre à la base,

• la longueur totale de l'UC,

• la longueur sans brachyblaste (rameaux courts),

• le pourcentage de brachyblastes encore présents et l'état des aiguilles qu'ils portent (la couleur, leur vigueur),

6 le nombre de branches ou de ramifications latérales et leur état (vivante, morte, cassée, élaguée ou bourgeon).

La longueur des unités de croissance Θ se mesure par la distance entre les commissures laissées par les bourrelets de l'écorce situés autour du point d'insertion de la branche. La Figure 3-5 illustre comment ce marqueur morphologique correspond au point de jonction entre, par exemple, la moelle de la branche et du tronc, et comment il est utilisé pour déterminer la longueur de l'UC.



Figure 3-5 : Localisation de l'ensemble des mesures effectuées sur les Unités de Croissance (Demers 1997).

Parmi les 30 arbres préalablement sélectionnés, les 30 pour les 10 ans et 10 arbres pour les 20 ans tirés aléatoirement sont retenus pour l'étude détaillée du houppier. Un échantillonnage spécifique est réalisé suivant l'ordre de ramification considéré. Ainsi, pour les branches d'ordre 1 (A2) des arbres de 20 ans (plantés en 1975-76), seules les branches portées par les unités de croissance U95, U94, U90, U86, U82 et U78 du tronc sont récoltées pour échantillonnage (Figure 3-6). Cette séquence est déterminée sur la base des connaissances et de l'expérience botanique accumulées par le laboratoire de modélisation des plantes du CIRAD-AMAP.

Quant aux branches d'ordres supérieurs notamment les A3 (ordre 2), seules certaines sont sélectionnées selon le critère suivant (Figure 3-6) :

n, n-1, n-2, (n-2)-4, (n-2)-8 etc.... (par pas de 4 UC)

où n = année d'allongement de l'extrémité de l'axe (année en cours).

A noter que la première UC de l'axe (soit la plus vieille pour n'importe quel ordre) est systématiquement mesurée (Figure 3-6). Aussi, l'ensemble des A4 (ordre 3) qui sont portées par les A3 sont systématiquement mesurées vu leur faible niveau de ramification.



Figure 3-6 : Schéma d'échantillonnage pour le tronc et les branches : exemple de branche portée par l'Unité de Croissance 86 du tronc pour des pins de 20 ans.

63

Compte tenu du volume très important de données récoltées et afin de bien replacer celles-ci dans la structure globale de l'arbre, une nomenclature topologique spécifique de type graphe des unités de croissance a été utilisée. Un exemple de ce codage est donné à l'annexe du Chapitre 3 (§A.3.2).

3.3.2.1.2 Analyse des mesures

Cette phase lourde a consisté à compiler l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir étudier l'évolution des différentes UC des axes (tronc, branches) dans l'espace et dans le temps. Ainsi, grâce au codage mis en oeuvre il est possible par exemple d'étudier tous les A2 portés par l'UC90 du tronc sur les 30 arbres ou encore tous les A3 portés par l'UC91 des A2 portés par l'UC90 du tronc.... Dans le cadre de ce document, il nous est impossible de présenter la totalité des analyses réalisées et des résultats obtenus. Nous nous attacherons à n'en présenter que certains d'entre eux, les autres se trouvant en Annexe du chapitre 3.

Analyse des troncs (A1)

• La longueur des Unités de Croissance

L'évolution de la longueur des UC du tronc en fonction de l'année de croissance (Figure 3-7) montre un accroissement régulier excepté pour l'année 1988. Cette variation peut s'interpréter par un effet année combiné à un traitement antigraminéen (VELPAR L) réalisé cette année-là sur l'ensemble des peuplements de cet âge situés sur le Causse de Sauveterre, limitant ainsi la compétition pour l'eau entre les arbres et les graminées (Couhert *et al.* 1990) à la faveur de l'arbre.



Figure 3-7 : Evolution de la longueur moyenne des unités de croissance du tronc chez le pin noir de 20 ans calculée sur 30 individus.

• Nombre de ramifications portées par les UC du tronc

L'évolution de l'effectif moyen des A2 (branches primaires) portés par les UC du tronc montre une augmentation avec l'année de croissance tendant à se stabiliser dès 1985 (Figure 3-8). L'effet observé pour l'année 1988 se retrouve mais avec une amplitude atténuée par rapport à celle observée pour la longueur.



Figure 3-8 : Evolution du nombre moyen de ramification portée par les UC du tronc chez le pin noir de 20 ans calculée sur 30 individus.

Analyse des branches (A2 et A3)

• La longueur des unités de croissance

L'observation de l'évolution de la longueur des UC en fonction de l'année de croissance et de sa position dans l'arbre montre pour les A2, que plus la branche est située en haut du houppier plus la longueur de ses UC est importante (Figure 3-9a). Nous observons également un comportement similaire entre l'accroissement des UC du tronc et l'accroissement des premières UC de A2 des différents étages. L'effet année observé pour les UC du tronc se retrouve également sur les A2. L'accroissement initial de la longueur des UC est systématiquement suivi d'une décroissance de leur longueur et les UC précédant la mort de l'apex présentent une longueur relativement équivalente, c'est le phénomène de dérive.



Figure 3-9 : Courbes d'évolution de la longueur moyenne en fonction de l'année de croissance pour les UC des a) A2 et b) A3, pour le pin noir de 20 ans.

Quant aux A3, il apparaît également que plus l'on se situe haut dans le houppier et plus la longueur est importante alors que pour une même branche, les UC successives sont comparativement plus courtes (Figure 3-9b). Les A3 en position basitone sur un A2 seront régulièrement plus longues que celles qui sont en position acrotone.

• Nombre de ramification portées par les A2 et A3

Pour chaque étage de branches échantillonnées, le pourcentage d'UC ramifiées pour chaque année d'allongement a été calculé correspondant au rapport entre le nombre d'UC d'une année et l'effectif total de branches échantillonnées pour l'étage (3-1).

$$\frac{UC_{ra}}{\sum_{j=1}^{j} 100}$$
(3-1)

où UCra est le nombre d'UC ramifiées pour une même année d'allongement et n_j est la branche de rang j.

L'évolution du nombre de A3 portées par les A2 montre une augmentation de la ramification pour les premières années de croissance de la branche suivie par une diminution progressive du nombre de rameaux portés (Figure 3-10). Cet effet s'atténue en fonction de la position de la branche dans le houppier.



Figure 3-10 : Evolution de la ramification des A2 en fonction de la position topologique des UC dans la branche et de leur position dans l'arbre.

Nous pouvons observer également que plus les branches sont hautes dans le houppier plus les A2 sont ramifiés avec une stabilité dans le comportement qui pourrait être reliée à la stabilité observée du nombre d'UC constituant les branches. Il est également apparu que les UC de moins de 5 cm de long ne portent généralement pas de rameaux.

Concernant la ramification des A3, celle-ci n'était pas systématiquement observée sur les arbres échantillonnés et contrairement aux A2, la ramification des A3 ne montre pas de gradient en fonction de la localisation dans le houppier.

3.3.2.1.3 Synthèse sur les mesures botaniques

Il apparaît au vu de ces résultats que l'approche architecturale développée par l'équipe du CIRAD-AMAP (Reffye de 1979) permet de bien caractériser le comportement des pousses annuelles en considérant quelques caractères morphologiques suivant les gradients qui prévalent à chaque étape de croissance de l'arbre. La Figure 3-11 synthétise les principales tendances régissant l'expression de ces caractères au cours du développement de l'arbre.



Figure 3-11 : Courbes d'évolution générale des différents caractères morphologiques (Demers 1997).

Un comportement différentiel est observé entre les UC du tronc et des branches au niveau de la croissance (allongement) et de la ramification (nombre de branches portées). Ceci est pondéré par la position topologique sur l'axe, et par la position de l'axe dans l'arbre.

L'approche architecturale de quantification est une approche statique en ce sens où l'étude est menée à des stades définis du développement de la plante. Afin de prendre en compte l'aspect dynamique de la croissance, il convient de comparer les résultats obtenus aux différents âges dans des conditions stationnelles données de manière à obtenir des relations entre les différents stades ontogéniques de la plante. Pour ce faire, nous avons regardé l'évolution de la longueur moyenne des UC du tronc pour 3 stades ontogéniques (10, 20 et 40 ans) de manière à voir s'il y avait une superposition pour les années communes et une continuité dans les mesures (Figure 3-12).



Figure 3-12 : Courbes d'évolution de la longueur des UC en fonction de l'année relative de croissance pour trois stades ontogéniques (10, 20 et 40 ans).

Les résultats de la Figure 3-12 mettent en évidence la forte cohérence entre les échantillons indiquant une stabilité de comportement du pin noir sur le site. Ces résultats font également apparaître clairement l'intérêt d'échantillonner à des âges "clés" du développement permettant par la suite d'interpoler entre ces stades, allégeant d'autant plus les mesures. L'objectif est d'obtenir une caractérisation du milieu aussi précise que possible en fonction de l'âge. A noter que l'effet année observé sur les arbres de 20 ans ne se retrouve pas chez ceux de 40 ans indiquant qu'il est lié essentiellement au traitement antigraminéen que ces peuplements ont subi en 1988.

L'ensemble de ces résultats nous permettent de mieux comprendre le comportement du pin noir sur le site de manière qualitative et quantitative dans le but de paramétrer le moteur architectural de croissance AMAP, aspect qui sera réalisé au chapitre 5.

3.3.2.2 Mesures dendrométriques

Afin d'obtenir une estimation précise de la ressource forestière (volume, biomasse..) permettant de faire émerger la nature des relations statistiques ou physiques existants avec le coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0), deux campagnes de mesures furent réalisées sur les 58 unités sélectionnées (Figure 3-3) selon le protocole suivant.

3.3.2.2.1 Protocoles des mesures

Protocole pour l'estimation du cubage/ha

Un protocole de mesures a été défini avec néanmoins quelques variantes selon qu'il s'agit de peuplements jeunes ou adultes. Si pour ces derniers de nombreuses études sont conduites permettant d'accéder à des protocole "standardisés" pour cuber le bio-volume, les peuplements jeunes font moins l'attention d'études forestières nécessitant la définition d'un protocole adapté en fonction des conditions de peuplement rencontrées. C'est le cas par exemple pour déterminer un coefficient de forme des axes (troncs, branches) intervenant dans le calcul de ressource forestière des jeunes peuplements. La limite d'âge étant déterminée pour chaque unité en fonction de la réalité terrain, celle-ci se situe généralement aux alentours de 20 ans.

Un inventaire statistique a été préféré à un inventaire pied à pied, d'une part parce que ce dernier est extrêmement fastidieux et assez peu précis (Duplat and Perrotte 1983) et d'autre part, il était important de maîtriser la surface inventoriée afin d'avoir une meilleure précision sur les valeurs rapportées à l'unité de surface (ha). L'échantillonnage au sein de chaque unité s'est fait sur la base d'un dispositif systématique semi-aléatoire de positionnement de placettes circulaires d'échantillonnage. Le positionnement des placettes (Figure 3-13) revient à un dispositif de mailles rectangulaires où les distances intra- et inter-cheminement sont définies en fonction de la taille de l'unité. Le positionnement de la première placette est déterminé par tirage aléatoire, tandis que les distances inter- et intracheminement, une fois définies pour la placette, restent fixes.

Le nombre de placettes d'échantillonnage est en moyenne de 15 pour les unités en peuplements jeunes et de 10 pour les peuplements âgés, pouvant atteindre 15 pour les unités situées en forte pente en raison de leur taille plus importante (> 5ha) en liaison avec la dégradation observée de la résolution radar sur les pentes exposées face à la visée radar (cf chapitre 2). Le rayon des placettes est de 5 m pour les jeunes peuplements (< 20 ans) et de 7 m en peuplement mature.



Figure 3-13 : Exemple de dispositif d'échantillonnage pour l'unité au sein d'une parcelle de pin noir vieux, située en forêt domaniale de Mende.

Le type de mesures réalisées à l'intérieur de chaque placette varie aussi selon l'âge du peuplement. Concernant les mesures de circonférence sur les jeunes peuplements, elles ont porté sur les circonférences basales et à mi-hauteur, et non à 1,3 m comme pour les peuplement âgés. L'ensemble de ces mesures sont reprises au Tableau 3-2 alors qu'un exemple de fiche type de relevé est jointe en annexe du Chapitre 3.

Quantités mesurées	Peuplements jeunes	Peuplements âgés			
Circonférence de chaque arbre à 1,3 m		+			
Circonférence basale de chaque arbre	+	-			
Circonférence à mi-hauteur de chaque arbre	+	-			
Hauteur totale des 3 arbres les plus proches du	+	+			
centre de la placette					
Hauteur de la base du houppier des 3 arbres les					
plus proches du centre de la placette	+	+			
Age des 3 arbres les plus proches du centre de	+	+			
la placette					
Pente (deg)	+	+			
Azimut par rapport au nord magnétique (deg)	+	+			
Observations générales (sous-étage,	+	+			
affleurements rocheux)					
+ : mesuré, - : non mesuré					

Tableau 3-2 Mesures dendrométriques réalisées par placette d'échantillonnage chez les peuplements de pins noirs.

A partir des mesures de circonférences basale et à mi-hauteur, un coefficient de décroissance (ou coefficient de forme) est calculé pour les jeunes peuplements, intervenant dans les calculs du cubage.

Protocole pour l'estimation de la biomasse compartimentée

Nous avons aussi cherché à quantifier la répartition de la biomasse fraîche au sein du couvert. A cet effet, des mesures de poids frais ont été réalisées sur les 3 unités utilisées dans le cadre des mesures botaniques, pour un total de 23 arbres entièrement ou partiellement dépouillés et pesés par catégories d'éléments végétaux : fûts, branches primaires et d'ordres supérieurs associées aux aiguilles. La biomasse concernant la couronne de 20 arbres de 10 et 20 (10 par classe d'âge) ans a été prélevée par verticille afin d'en dériver, entre autres, des profils de distribution, alors que sur les 3 arbres de 40 ans, seule des mesures globales concernant la biomasse du fût et du houppier ont pu être effectuées.

3.3.2.2.2 Mesures dendrométriques

L'ensemble des résultats des mesures terrain d'estimation des paramètres forestiers sur les 58 unités sont repris dans le Tableau 3-3.

Estimation du volume des fûts

A partir des mesures dendrométriques, il est possible d'estimer le volume des fûts à l'hectare, l'un des principaux paramètres d'intérêt pour caractériser la ressource forestière. Le volume moyen par hectare s'obtient sur nos unités par (3-2) :

$$\overline{V} = f \overline{g} \overline{h} \quad (m^3/ha) \tag{3-2}$$

avec

$$\overline{g}(m^2/ha) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{i=m} g_{ij} \quad \text{et} \quad g_j = \frac{10^4}{r^2 \pi \cos^p(\alpha)} \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{j=k} \left(\frac{C_j^2}{4 \, 10^4 \, \pi} \right)$$
(3-3)

$$\overline{\mathbf{h}}(\mathbf{m}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \mathbf{h}_i$$
(3-4)

$$0.3 \le f \le 0.5$$

où \overline{g} et \overline{h} sont respectivement la surface terrière et la hauteur moyenne mesurées sur l'unité, k le nombre d'arbres par placette dont la circonférence Cj (cm) a été mesurée, m est le nombre de placettes échantillonnées et n le nombre total d'arbres par unité dont la hauteur a été mesurée. Quant à r, α et p ils correspondent respectivement au rayon de la placette, à la pente locale et à une constante (p = 1 ou 2) suivant que la délimitation de la placette en pente s'est faite à partir d'un décamètre ou d'une mire Pardé (Duplat and Perrotte 1983).

Unité Age Epaisseur Denité Graface terrière (g) Hauteur Volume 2 6 1,88 2590 7,67 1,69 1,01 19 8 1,7 8386 10,09 1,197 5,11 18 10 1,92 7662 19,39 1,92 22,07 8 14 3,6 2037 28,02 3,64 33,56 9 15 3,4 1810 23,16 3,43 36,640 71 16 4,11 2429 45,11 46,70 86,640 10 17 3,55 2007 45,11 36,660 11 13 14 45 1960 25,00 4,407 86,660 11 31 4,5 1901 22,28 6,09 118,47 4 34 6,2 1615 25,44 6,60 121,68 13 35 4,6 217,78 44,12 6,64	Unités de la forêt domaniale de Mende						
	Unité	Age	Epaisseur	Densité	Surface terrière (g)	Hauteur	Volume
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		(ans)	Houppier (m)	(tiges/ha)	(m²/ha)	(m)	(m3/ha)
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	2	6	1,58	2580	7,67	1,58	5,91
18 10 1.92 7.662 13,39 1.92 22,07 8 14 3.6 2007 22,52 3.60 43,39 9 15 3.5 2122 21,62 3.52 37,68 16 15 3.4 1810 22,16 3.44 17 16 4.11 2429 35,82 4.41 76,76 10 17 3.85 2907 45,11 4.01 86,60 11 4.25 1565 22,00 4.57 86,60 12 31 4.5 1601 29,28 8.09 118,47 4 34 5.2 1515 29,84 8.69 119,47 3 35 5.1 1157 26,09 8.80 114,42 13 35 4.6 2737 45,12 9,66 21,788 3 36 5.1 1157 26,30 10,20 46,70 14	19	8	1,7	8386	10,95	1,69	11,07
8 14 3,6 2067 25,52 3,60 43,39 16 15 3,4 1810 23,16 3,42 37,68 16 15 3,4 1810 23,16 3,44 36,46 7 10 4,11 2429 38,52 4,41 76,78 17 16 4,15 3132 24,70 4,15 61,66 15 17 4 2422 37,82 4,67 86,60 13 4,5 1965 28,00 4,67 86,60 14 31 4,5 1901 29,28 8,09 118,47 13 3,5 4,6 2737 45,12 9,66 217,88 3 36 5,1 1157 26,09 8,80 114,80 11 39 5,6 813 36,64 11,40 210,40 12 45 5,2 1377 30,62 10,11 154,67 <t< td=""><td>18</td><td>10</td><td>1,92</td><td>7662</td><td>19,39</td><td>1,92</td><td>22,07</td></t<>	18	10	1,92	7662	19,39	1,92	22,07
9 15 3.5 2122 21.62 3.52 37,68 16 15 3.4 1810 22.16 3.45 36.64 7 16 4.1 2429 36.82 4.41 76.78 10 17 3.55 2907 45.11 4.01 86.62 15 17 4 2422 97.32 4.67 86.60 62 30 6.55 1334 38.21 8.57 142.26 1 31 4.5 1901 29.28 8.09 118.47 4 34 6.2 177 45.12 9.66 119.87 3 36 5.1 1157 26.09 8.60 114.80 13 35 4.6 277 45.12 9.66 119.30 14 39 5.5 133 36.64 114.80 14.80 14 14 5.2 1377 30.62 10.11 154.50	8	14	3,6	2057	25,92	3,60	43,99
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	9	15	3,5	2122	21,62	3,52	37,68
7 16 4.1 2429 35.82 4.41 76.78 71 16 4.15 3132 24.70 4.15 51.00 15 17 4 2422 37.82 4.67 86.60 51 17 4.25 1965 25.00 4.50 83.00 52 30 5.55 1334 33.21 8.37 142.26 1 31 4.5 1901 29.25 8.09 138.97 13 35 4.6 2737 45.12 9.66 138.37 3 6 5.1 1157 26.09 8.80 114.80 12 46 5.2 1377 30.62 10.11 154.76 64 70 7.2 613 62.30 10.20 564.00 65 70 6 1053 67.80 110 154.76 64 70 7.2 613 62.20 20.40 532.00	16	15	3,4	1810	23,16	3,45	36,46
	7	16	4,1	2429	35,82	4,41	76,78
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	71	16	4,15	3132	24,70	4,15	51,00
15 17 4 2422 $37,32$ 4,67 86,60 51 17 4,25 1995 52,00 4,00 53,00 52 30 5,55 1334 33,21 8,57 142,26 1 31 4,5 1901 29,28 8,09 118,47 4 94 5,2 1615 29,84 8,69 129,67 13 35 4,6 2737 45,12 9,66 217,88 3 36 5,1 1157 26,09 8,80 114,80 11 39 5,6 313 52,30 19,20 50,4,00 64 70 7,2 613 52,30 19,20 50,4,00 65 70 6 1053 67,50 16,00 52,40 66 75 10 445 41,50 21,00 512,00 60 85 9 515 641 68,50 21,30 <t< td=""><td>10</td><td>17</td><td>3,55</td><td>2907</td><td>45,11</td><td>4,01</td><td>86,62</td></t<>	10	17	3,55	2907	45,11	4,01	86,62
81 17 4.25 1965 25.00 4.50 53.00 52 30 5.55 1334 33.21 8.77 142.26 1 31 4.5 1901 29.25 8.09 118.47 4 94 5.2 155 29.84 8.69 129.67 13 35 4.6 2737 45.12 9.66 217.88 3 36 5.1 1157 26.09 8.80 114.80 12 45 5.2 1377 30.62 10.11 154.76 64 70 7.2 613 52.20 20.40 532.00 65 70 6 1053 67.50 16.00 544.00 67 70 8.2 742 52.20 20.40 532.00 680 7.7 588 52.40 18.70 632.00 63 80 7.7 588 52.40 18.70 632.00	15	17	4	2422	37,32	4,67	86,60
52 30 6.55 1334 33.21 8.57 142.26 1 311 4.5 1901 22.28 8.09 118.47 4 34 5.2 1515 29.84 8.69 129.67 13 35 4.6 2737 45.12 9.66 117.88 3 36 5.1 1157 26.09 8.80 114.80 11 399 5.6 813 36.64 11.48 210.40 12 445 5.2 1377 30.62 10.11 154.76 64 70 7.2 613 62.80 19.20 504.00 65 70 6 1053 67.90 16.00 544.00 66 75 8.1 1338 71.00 19.20 687.00 63 80 7.7 588 564 55.00 21.30 623.00 61 85 9 515 644 55.00 22.40 562.00 63 80 7.7 588 612	81	17	4,25	1965	25,00	4,50	53,00
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	52	30	5,55	1334	33,21	8,57	142,26
	1	31	4,5	1901	29,28	8,09	118,47
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	4	34	5,2	1515	29,84	8,69	129,67
	13	35	4,6	2737	45,12	9,66	217,88
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3	36	5,1	1157	26,09	8,80	114,80
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	11	39	5,6	813	36,64	11,48	210,40
	12	45	5,2	1377	30,62	10,11	154,76
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	64	70	7,2	613	52,30	19,20	504,00
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	65	70	6	1053	67,90	16,00	544,00
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	67	70	8,2	742	52,20	20,40	532,00
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	69	75	10	445	41,50	21,00	512,00
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	80	75	8,1	1338	71,00	19,20	687,00
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	63	80	7,7	588	52,40	18,70	492,00
	60	85	9	515	45,70	22,40	512,00
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	61	85	9,85	564	58,50	21,30	623,00
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	62	85	10,2	611	41,60	24.30	505,00
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	78	85	9,8	612	50,00	22,40	562,00
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	53	90	6,8	520	50,80	20,45	519,39
Unités du Causse Méjean3173,71956 $34,67$ $4,08$ $71,16$ 6225.11780 43.27 8.33 180.1312225.11590 $24,36$ 6.39 $77,78$ 1922 4.1 1813 $29,51$ 6.39 $94,31$ 523 3.55 1292 $30,93$ $7,19$ $111,23$ 124 4.5 1494 $26,76$ 6.23 $83,29$ 724 4.8 1320 $28,64$ $7,06$ $101,15$ 924 4.9 1443 $28,05$ $7,28$ $102,14$ 425 4.1 1160 $27,65$ 6.98 $96,46$ 1125 4.6 1515 $27,12$ $7,46$ $101,15$ 20254 1371 $25,37$ 7.32 $92,84$ 2425 4.7 1500 $28,17$ 6.43 $90,60$ 2625 4.8 1458 $29,61$ 7.45 $110,24$ 226 4.4 1531 $31,42$ $7,42$ $116,52$ 8 266 3.9 1323 $29,78$ 8.01 $60,12$ 18 27 4.5 1193 $22,52$ 6.29 $70,83$ $22274.6170525,476,0677,1618274.5119322,526.2970,8322274.6170525,47$	51	100	4,9	872	68,11	20,62	702,05
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$			·	Unités du Causse	Méjean		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3	17	3,7	1956	34,67	4,08	71,16
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	6	22	5,1	1780	43.27	8.33	180.13
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	12	22	5,1	1590	24,36	6,39	77,78
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	19	22	4,1	1813	29,51	6,39	94,31
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	5	23	3,55	1292	30,93	7,19	111,23
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	1	24	4,5	1494	26,76	6.23	83,29
5 24 $4,5$ 1443 $28,05$ $7,28$ $102,14$ 4 25 $4,1$ 1160 $27,65$ $6,98$ $96,46$ 11 25 $4,6$ 1515 $27,12$ $7,46$ $101,15$ 20 25 4 1371 $25,37$ $7,32$ $92,84$ 24 25 4 1707 $32,48$ $7,16$ $116,27$ 25 25 $4,7$ 1500 $28,17$ $6,43$ $90,60$ 26 25 $4,8$ 1458 $29,61$ $7,45$ $110,24$ 2 26 $4,4$ 1531 $31,42$ $7,42$ $116,52$ 8 26 3.9 1323 $29,78$ $8,01$ $60,12$ 8 26 3.9 1323 $29,78$ $8,01$ $60,12$ 18 27 $4,6$ 1705 $25,47$ $6,06$ $77,16$ 13 28 $4,6$ 1514 $26,77$ $7,19$ $96,20$ 14 28 $4,5$ 1588 $34,08$ $8,73$ $144,74$ 17 28 $4,6$ 1403 $33,82$ $8,68$ $146,69$ 21 28 $5,8$ 1156 $27,60$ $8,68$ $119,82$ 23 28 $5,1$ 1579 $40,67$ $8,86$ $180,15$ 27 28 $4,2$ 1582 $35,08$ $7,88$ $138,13$ 28 29 $5,2$ 926 $27,20$ $9,29$ $126,35$ 16 30 $5,3$	7	24	4,8	1320	28,64	7,06	101,15
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	9	24	4,9	1443	28,05	7,28	102,14
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	4 11	25	4,1	1515	27.10	7 46	101 15
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	20	25	4	1371	25.37	7.32	92.84
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	24	25	4	1707	32,48	7.16	116,27
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	25	25	4,7	1500	28,17	6,43	90,60
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	26	25	4,8	1458	29,61	7,45	110,24
826 3.9 1323 29.78 8.01 60.12 1827 4.5 1193 22.52 6.29 70.83 2227 4.6 1705 25.47 6.06 77.16 1328 4.6 1514 26.77 7.19 96.20 1428 4.5 1588 34.08 8.73 144.74 1728 4.6 1403 33.82 8.68 146.69 2128 5.8 1156 27.60 8.68 119.82 2328 5.1 1579 40.67 8.86 180.15 2728 4.2 1582 35.08 7.88 138.13 2829 5.2 926 27.20 9.29 126.35 1630 5.3 854 23.22 9.50 110.21 15 32 6.7 923 29.06 11.03 160.31	2	26	4,4	1531	31,42	7,42	116,52
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	8	26	3,9	1323	29,78	8,01	60,12
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	18	27	4,5	1193	22,52	6,29	70,83
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	13	28	4,0	1700	20,47	7 10	96.20
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	14	28	4.5	1588	34,08	8,73	144.74
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	17	28	4,6	1403	33,82	8.68	146,69
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	21	28	5,8	1156	27,60	8,68	119,82
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	23	28	5,1	1579	40,67	8,86	180,15
28 29 5,2 926 27,20 9,29 126,35 16 30 5,3 854 23,22 9,50 110,21 15 32 6,7 923 29,06 11.03 160,31 10 50 7.02 700 40.14 15.02 40.14	27	28	4,2	1582	35,08	7,88	138,13
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	28	29	5,2	926	27,20	9,29	126,35
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	16	30	5,3	854	23,22	9,50	110,21
	10	<u>32</u> 50	7.03	923	29,06	11,03	416.42

Tableau 3-3 : Valeurs moyennes des paramètres dendrométriques classiques mesurés sur les 58 unités sélectionnées tirées par ordre croissant d'âge. Le coefficient de forme f vaut entre 0,3 et 0,5 selon l'âge, mais il a été pris systématiquement égal à 0,5 pour les peuplements âgés (> 20 ans). En effet l'utilisation de ce tarif de cubage simplifié avec un f de 0,5 montre que l'on obtient des résultats comparables à ceux obtenus par les tarifs plus élaborés de l'ENGREF et de l'IFN pour l'estimation des cubages de ces mêmes peuplements de pins noirs (Figure 3-14).



Figure 3-14 : Relation entre le volume calculé par a) l'IFN b) l'ENGREF et le volume calculé par le tarif de cubage fgh (avec f = 0.5).

Un léger biais est observable sur la comparaison avec les données de l'IFN 1992, mais celui-ci reste faible et acceptable.

Erreur d'estimation

Afin d'évaluer la précision de l'estimation de la valeur moyenne des différents paramètres, un calcul d'erreur relative au seuil de confiance de 95% sous hypothèse de normalité est calculé par :

$$er(\%) = t_{n-1} cv \frac{1}{\sqrt{n}} 100, avec \ cv = \sigma/\mu$$
 (3-5)

où *er* est l'erreur relative (%) en pour cent du paramètre considéré, t est la variable de Student donnée par la table de Student pour un degré de liberté de n-1 (où n est le nombre de placettes), σ est l'écart-type et μ la moyenne.

Les erreurs relatives calculées pour les différents paramètres sont plus élevées pour la densité et la surface terrière par rapport à celles obtenues pour la hauteur et pour l'épaisseur du houppier (Figure 3-15). En particulier, nous pouvons observer un plus fort écart-type pour les erreurs sur la densité, qui peuvent s'expliquer par une plus forte variabilité de la densité des peuplements situés en forte pente (Renaud 1995). Ces erreurs restent néanmoins dans une fourchette acceptable pour des peuplements forestiers de ce type.

Le détail des erreurs relatives des différents paramètres pour chaque unité échantillonnée est donné au Tableau qui figure à l'annexe du Chapitre 3 (§A.3.4).



Figure 3-15 : Erreurs relatives pour les différents paramètres forestiers mesurés.

L'erreur sur le volume est de l'ordre de grandeur de celle obtenue sur la surface terrière.

Comportement et corrélation

En général, les paramètres forestiers sont corrélés entre eux, ce qui doit être pris en compte ultérieurement dans l'analyse des données RSO. La mesure des liaisons entre paramètres est quantifiée par l'intermédiaire du coefficient de détermination qui rend compte du pourcentage de variation totale expliquée après ajustement par un modèle donné (linéaire, quadratique, logistique, etc..). Il s'exprime par :

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_{i} - \bar{y})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}}$$
(3-6)

où n est le nombre d'observation y_i , estimées par \hat{y}_i .

Par exemple, l'ensemble des paramètres est en général bien corrélé à l'âge du peuplement, comme le démontre les résultats à la Figure 3-16. Ces résultats font transparaître une plus forte dispersion pour les âges élevés.



Figure 3-16 : Relations entre l'âge des peuplements et a) la hauteur, b) la densité, c) la surface terrière et d) l'épaisseur du houppier. Les équations modélisant ces comportements sont reprises au Tableau 3-4.

	Equations	a	b	\mathbb{R}^2
Epaisseur houppier	$a*(1-\exp(-b*age/a))^2$	8	0,46	0,96
Hauteur	$a*(1-exp(-b*age/a))^2$	24	0,75	0,98
Densité	a * (age) ^{-b}	19314	0,78	0,72
Surface terrière	a * ln(age) - b	16,8	22,4	0,65

Tableau 3-4: Equations des relations obtenues entre les paramètres forestiers et l'âge des peuplements. a et b sont deux paramètres estimés, R^2 est le coefficient de détermination.
Des tendances nettes apparaissent en fonction de l'âge, et nous pouvons noter en particulier de très fortes densités (> 1000 tiges/ha) même pour des peuplements âgés. En conséquence, de forts volumes sont également observés. Afin de quantifier les corrélations existantes entre les différents paramètres forestiers étudiés, le Tableau 3-5 présente les coefficients de détermination des <u>relations linéaires</u> déduites entre l'ensemble des principaux paramètres forestiers mesurés. Ces résultats montrent dans la majorité des cas de fortes liaisons entre les paramètres excepté entre la surface terrière et la densité ($R^2 = 0,35$), alors qu'entre l'âge et la hauteur une forte liaison linéaire est observée ($R^2=0,95$). Néanmoins, comme nous l'avons montré précédemment, dans ce dernier cas, cette relation âge-hauteur se modélise encore mieux par le modèle logistique modifié de Richards-Chapman (Tableau 3-4) proposé par (Epenoux d' 1992) pour les peuplements de pins noirs des Alpes du sud (Figure 3-16a).

Au vu de ces résultats, il apparaît également que la hauteur n'accuse pas de ralentissement très rapide avec le vieillissement recoupant les résultats observés sur les peuplements de pins noirs des Alpes du Sud-Est (Toth and Turrel 1983).

	Age	Hauteur	ln Densité	Surface	Epaisseur	Volume des
	(ans)	(m)	(troncs/ha)	terrière (m²/ha)	houppier (m)	fûts (m³/ha)
Age (ans)	1.00					
Hauteur (m)	0,95	1,00				
ln Densité (troncs/ha)	0,72	0,78	1,00			
Surface terrière (m²/ha)	0,65	0,63	0,35	1,00		
Epaisseur houppier (m)	0,72	0,84	0,74	0,44	1,00	
Volume des fûts (m³/ha)	0,93	0,91	0,64	0,8	0,68	1,00

Tableau 3-5 : Coefficient de détermination R² obtenu par l'analyse des régressions linéaires entre les paramètres forestiers.

D'autre part, en partie à cause de l'objectif premier de protection, la sylviculture des peuplements de pins noir a longtemps été inexistante ou très limitée expliquant les fortes valeurs de densité de troncs/ha mesurées sur les peuplements âgés. Par exemple, pour les unités 80, 78 et 51 de la forêt domaniale de Mende des valeurs de densité de 1338, 612 et 872 troncs/ha sont observées. Les éclaircies associées à une gestion dynamique de ces peuplements ont débuté essentiellement à l'après-guerre et sont devenues de plus en plus fréquentes. Il conviendra de prendre en compte ces caractéristiques importantes pour une meilleure compréhension de la structure de ces peuplements. En particulier sur les jeunes peuplements des plateaux issus de régénération naturelle et d'un complément de régénération par plantation dont la densité dépasse les 7000 troncs/ha (exemple des unités 18 et 19 de la forêt domaniale de Mende). Ces phénomènes ne s'observant pas sur les fortes pentes (> 20°) où seule la régénération artificielle est de mise. Enfin, il conviendra d'intégrer, comme l'a constaté (Duplat 1990), l'impact que des éclaircies, même tardives, ont sur l'augmentation de la croissance en diamètre des arbres.

3.3.2.2.3 Mesures de biomasse

Comme il a été cité précédemment, il est possible d'estimer le volume des fûts à l'aide de relations allométriques utilisant les paramètres mesurés sur le terrain (Tableau 3-5). Le passage à la biomasse en kg de matière sèche à l'hectare (kg.ms/ha), peut se faire connaissant la densité anhydre du bois (ρ_s) que multiplie le volume de fûts donné par l'équation (3-2). La matière sèche permet de quantifier l'accumulation de matière au sein de l'écosystème forestier permettant de remonter indirectement à sa productivité au travers entre autres de la quantité de carbone fixé. De plus, l'estimation de la densité anhydre trouve son utilité dans le calcul de variable telle que la constante diélectrique intervenant dans la modélisation électromagnétique des couverts forestiers.

Or, l'estimation de cette densité anhydre nécessite dans un premier temps une phase de mesures destructives permettant de ramener à un élément de volume donné (fût, branches, aiguilles) sa masse fraîche correspondante. Le passage à la matière sèche s'effectue dans un deuxième temps après quantification de la teneur en eau des différents éléments.

Cependant, il est difficile d'estimer la biomasse fraîche compartimentée, c'est à dire celle répartie entre le fût, les branches et les aiguilles, que ce soit à partir de mesures ou d'un modèle allométrique, qui, même s'il existait pour le pin noir, ne serait pas forcément valide sur notre site.

Un minimum de mesures destructives ont donc été effectuées afin de peser les divers éléments de quelques individus, et ce sur les unités utilisées dans les mesures botaniques. Au total 23 individus se répartissant en 10 individus de 10 ans, 10 de 20 ans et 3 de 40 ans ont été échantillonnés suivant le protocole précédemment défini.

Ces mesures ont permis :

- d'observer l'évolution de ses biomasses compartimentées en fonction de la section basale des arbres comme à la Figure 3-17;
- d'estimer ces biomasses compartimentées non seulement dans le fût mais également dans les branches et les aiguilles;
- d'en déduire la répartition verticale de la biomasse du houppier répartie entre les branches d'ordre 1 (A2) et les branches d'ordre supérieur groupées avec les aiguilles (Figure 3-18).

La Figure 3-17 présente l'évolution de la biomasse fraîche compartimentée en fonction de la section basale (m²) pour des arbres de 10, 20 et 40 ans. La biomasse des différentes parties augmente fortement avec la section basale (i.e. âge), de manière linéaire pour le houppier et quadratique pour le tronc. Si, pour les jeunes peuplements (10 et 20 ans), la biomasse totale se répartit équitablement entre le fût et le houppier, pour les arbres de 40 ans cet équilibre disparaît au profit de la biomasse des troncs qui représentent alors près de 75% de la biomasse totale. A partir de là, il est possible d'extrapoler de façon satisfaisante l'estimation de la biomasse à d'autres unités pour lesquelles le modèle allométrique ainsi établi peut s'appliquer.



Figure 3-17 : Variation de la biomasse fraîche compartimentée en fonction de la section basale, pour des arbres de 10, 20 et 40 ans.

De manière générale, comme pour les paramètres dendrométriques, de bonnes corrélations sont obtenues entre les différentes biomasses mesurées et les paramètres de surface basale et de hauteur. Le Tableau 3-6 reprend l'ensemble des coefficients de détermination calculés entre ces paramètres.

	Biomasse troncs	Biomasse houppier	Biomasse aiguilles
	(kg)	(kg)	(kg)
Surface basale	loi quadratique	loi linéaire	loi quadratique
(m²/ha)	0,99	0,96	0,92
Hauteur	loi quadratique	loi quadratique	loi linéaire
(m)	0,99	0,95	0,82

Tableau 3-6 : Coefficients de détermination R² calculés entre les données de biomasse et les paramètres dendrométriques classiques (surface basale, hauteur).

Ces résultats montrent les fortes liaisons qui existent entre ces paramètres, néanmoins ils sont à pondérer par le nombre de données avec lequel ils sont obtenus. Ces données restent insuffisantes pour tirer des conclusions fortes permettant le passage de kg.ms/arbres à des kg.ms/ha, ou l'extrapolation à des peuplements plus âgés et à des conditions stationnelles contrastées, d'autant que l'erreur sur l'estimation évolue en fonction de l'ordre de branche considéré (Bouchon 1973).

La nature de l'échantillonnage réalisé nous a également permis de générer des profils verticaux de répartition de biomasse fraîche pour les différents types de prélèvement (branches primaires, ordres supérieur associés aux aiguilles). Les résultats de la Figure 3-18 présentent des profils verticaux de biomasse pour les pins de 10 et 20 ans. Malheureusement, le faible nombre d'arbres de 40 ans échantillonnés (3 arbres) n'ayant pas été caractérisé par verticille n'a pas permis l'établissement de ces profils. La cause en est essentiellement imputable au temps de mesure nécessaire à leur génération, incompatible entre autres, avec les priorités de modélisation architecturale fixées. La distribution verticale fait apparaître une évolution générale unimodale avec un maximum se retrouvant approximativement à mi-hauteur. Pour les deux âges, une égale répartition de la biomasse est observée entre, les branches primaires d'une part, et les branches d'ordres supérieurs associées aux aiguilles d'autre part. Si cette répartition est respectée chez les arbres de 20 ans, leurs profils verticaux laissent systématiquement apparaître un dysfonctionnement. Ainsi, de fortes biomasses sont observées vers 2,30 m et 3,30 m entourant un important déficit situé aux alentours de 2,60 m. Ces trois niveaux correspondent approximativement aux verticilles du fût des années 1988, 1990 et 1989. L'effet année observée pour 1988 sur les mesures architecturales se retrouve donc sur les mesures de biomasse, ainsi que le creux de biomasse de l'année 1989 pour laquelle une baisse moyenne d'effectif des branches primaires est également observée (Figure 3-10). Ces résultats corroborent partiellement les résultats obtenus avec les mesures architecturales (§3.3.2.1).



Figure 3-18 : Répartition verticale de la biomasse ligneuse et foliaire compartimentées (branches primaires et d'ordres supérieurs) pour des peuplements de 10 et 20 ans (statistiques calculées sur 10 individus).

L'information sur ces biomasses est déterminante car il a été démontré que le signal radar était surtout sensible à la biomasse ligneuse du houppier (Beaudoin 1992). La littérature montre peu d'études où la biomasse compartimentée est estimée adéquatement en liaison avec les besoins d'interprétation des données RSO. Cette carence est essentiellement attribuée à la difficulté d'obtenir une information précise et représentative sur cette quantité nécessitant un travail (jours/hommes) très important. L'interprétation des données RSO acquises en milieu forestier ne s'arrête pas à une caractérisation précise de la répartition de la biomasse mais passe également par une caractérisation de la teneur en eau des éléments du milieu.

3.3.2.3 Mesures de teneur en eau

La caractérisation de la teneur en eau des différentes parties de l'arbre joue un rôle important à double titre, *via* l'estimation de la densité anhydre en utilisant les résultats précédent sur la biomasse fraîche, et *via* l'estimation de la constante diélectrique du milieu (Salas *et al.* 1994).

Peu d'études sur le contenu hydrique du pin noir ont été réalisées. Seules des études du potentiel hydrique et des courbes "Pression-volume" en réponse aux périodes sèches ont été effectuées (Aussenac and Valette 1982). Afin d'appréhender le comportement hydrique du pin noir sur notre site, des mesures de contenu en eau à différent niveau de la plante et pour différentes périodes de la journée ont été réalisées. La teneur en eau dans la plante, peut être caractérisée par différentes quantités dont la teneur en eau pondérale (Hp) définie généralement par (Kramer 1988) :

$$Hp = \frac{Poidsfrais-Poidssec}{Poidsfrais} \quad oupar \quad \frac{Poidsfrais-Poidssec}{Poidssec} \quad (3-7)$$

Une autre quantité également très utilisée pour appréhender l'état hydrique des plantes est le potentiel hydrique qui est une mesure de l'état énergétique de l'eau dans la plante (Jones 1983). La mesure de cette quantité qui reflète bien l'état de déficit hydrique des plantes est plus contraignante à mettre en œuvre que les mesures pondérales. De plus, le potentiel hydrique n'est pas directement utilisé dans les modèles permettant de calculer la constante diélectrique des éléments du milieu forestier. En conséquence, et dans le cadre de ce travail, l'estimation de l'humidité pondérale Hp a été préférée à l'utilisation du potentiel hydrique.

L'eau est inégalement répartie dans la plante et peut varier temporellement et spatialement de façon différentielle en fonction des organes (fûts, branches, aiguilles) et du type de peuplement (âge, densité) considéré. Il convient donc d'identifier les principales sources de variation de la teneur en eau à l'échelle de la journée. Pour cela, une phase expérimentale préliminaire, visant à évaluer la variabilité journalière de la teneur en eau de différent organes a été menée sur deux classes d'âge (20 et 100 ans).

Mesures préliminaires

L'objectif de ces mesures préliminaires vise à identifier quelles sont les principales dimensions à prendre en compte dans la mesure de la variabilité de la teneur en eau à l'échelle journalière.

Le comportement journalier au travers de la mesure de l'humidité pondérale de différents organes pour des arbres jeunes et matures montre une faible amplitude de variation (Figure 3-19). Cette amplitude de variation est légèrement plus importante pour les arbres jeunes. Les aiguilles de l'année présentent également une teneur en eau systématiquement plus importante que celle des autres organes du houppier. Les teneurs en eau des jeunes fûts (non présentées) oscillent autour des mêmes valeurs ne montrant également aucune disparité entre les teneurs en eau matinales et vespérales. Cette évolution se retrouve chez les peuplements adultes au niveau moyen de teneur en eau près, qui dans ce cas est inférieur de près 15 % se stabilisant aux alentours des 35 % d'humidité pondérale.



Figure 3-19 : Evolution journalière du contenu en eau moyen Hp de différents organes chez des pins noirs a) jeunes (20 ans) et b) matures (≈ 120 ans).

Indépendamment de l'âge, le pin noir arrive à maintenir un contenu en eau constant d'autant que cette espèce possède un potentiel de base critique (1,5 à 1,7 Mpa) bien moins négatif que celui des autres espèces (Aussenac 1980; Aussenac and Granier 1978) limitant ainsi ses pertes en eau même par sécheresse relativement modérée. Cette faculté dite "d'évitement" de la sécheresse joue bien sur en défaveur de la croissance estivale (Aussenac and Valette 1982; Dreyfus 1990) mais lui évite en contrepartie un dessèchement extrême (Gillot 1985). Les résultats de l'analyse journalière indiquent que parallèlement au passage d'un capteur RSO sur le site, l'emphase peut donc être portée essentiellement sur d'éventuelles variabilités de la teneur en eau liés à des variations spatiales (station : sol, topographie) et/ou de peuplements (âge, densité).

Mesures simultanées au passage de SIR-C/X-SAR

Suite aux résultats de ces mesures préliminaires, dix parcelles réparties sur 3 classes d'âge (0-20, 20-40 et 100-120 ans) ont été échantillonnées afin de caractériser le statut hydrique des différentes parties de l'arbre au moment de l'acquisition des images SIR-C/X-SAR le 06/10/1994 sur la zone d'étude. Le Tableau 3-7 récapitule l'ensemble des résultats obtenus sur ces 10 parcelles pour les différents organes échantillonnés. Les jeunes peuplements, quelle que soit leur situation topographique, ont des teneurs en eau à peu près similaires dans tous les organes, comprises entre 55 et 60% d'humidité pondérale. Les aiguilles de l'année ne se distinguent plus des aiguilles de l'année précédente se regroupant au sein d'une même classe de teneur en eau. Ceci ne serait pas le cas si les mesures avaient été effectuées courant juin jusqu'à août, car dans cette configuration un gradient aurait été observé entre les aiguilles de l'année et celles mise en place les années précédentes. Ce point met en lumière l'importance de la dimension phénologique liée à l'espèce forestière considérée.

		Humidité pondérale (%)				
Classe d'âge	n°	Aiguilles	Branches ordre	Branches ordre	Troncs	
(ans)	parcelles		n+1	n		
100	320	51 (2,2)	47,5 (4)	48,5 (3,3)	32 (3,5)	
	465	56,6 (1,7)	53,3 (2)	55,7 (2)	42,2 (2,9)	
31-34	466	55,3 (1,3)	51,9 (1,9)	55,3 (1,8)	40,1 (3,5)	
	467	55,4 (2)	50,4 (1,9)	54,1 (2)	36,5 (3,8)	
	367	55,1 (1,9)	52,6 (1,1)	54,5 (1,7)	53,3 (2,3)	
16-17	368	55,5 (1.2)	54,7 (2,6)	56,7 (2,4)	52,2 (7,5)	
(terrain plat)	371	53,5 (1,3)	54,1 (1,5)	54,4 (2,1)	55 (4,7)	
	356	59,3 (2,4)	54,5 (1,8)	56,2 (2,4)	57,5 (2,9)	
16	357	56,6 (1,6)	51,9 (2)	54,3 (1,6)	56,1 (3,2)	
(terrain en pente)	358	56,1 (1,5)	53,5 (1,9)	55,7 (1,5)	54,4 (4,7)	
Sol	23,85 (4,7)					

Tableau 3-7 : Valeurs moyennes et leurs écarts types associés d'humidité pondérale des différents organes pour les 3 classes d'âge échantillonnées, et pour le sol.

Une décroissance de la teneur en eau est observée chez les arbres âgés, d'autant plus marquée qu'il s'agit des fûts. Celle-ci se traduit par une corrélation entre le diamètre des fûts et la teneur en eau du tronc s'ajustant par une relation du type puissance (Figure 3-20). La variation est rapide pour les faibles diamètres (jeunes âges) s'atténuant pour les forts diamètres (arbres matures).



Figure 3-20 : Evolution de l'humidité pondérale du tronc en fonction du diamètre à 1,3 m (dhp)

Ce type d'évolution a également été observée chez d'autres conifères (Sellin 1994; Yang and Murchinson 1992), et est liée à l'épaisseur du bois d'aubier où plus de 80% de l'eau du tronc est concentrée (Ryan 1989). En effet, à partir d'un certain âge, l'épaisseur du bois d'aubier demeure constante alors que l'épaisseur du bois de cœur augmente. Cette évolution reste néanmoins fortement liée à l'espèce (Yang *et al.* 1985). Chez les branches, aucune relation nette entre Hp-diamètre n'a été observé où dans ce cas l'aubier représente la majorité de la section de la branche. L'intérêt de cette relation empirique est sa capacité à nous permettre d'inférer sur des teneurs en eau moyenne de fûts de classes d'âge présentes sur le site mais n'ayant pas été échantillonnées.

3.3.2.4 Conséquences

La caractérisation en volume, en biomasse et en teneur en eau, des différents organes de l'arbre (troncs, branches et aiguilles) nous a permis d'effectuer un calcul de la masse volumique de la matière sèche pour les parties ligneuses (Tableau 3-8). La valeur de la masse volumique des aiguilles étant tirée de la littérature (Ulaby and El-Rayes 1987) en raison en particulier de la difficulté qu'il y a à estimer le volume des aiguilles.

	Tronc	Branches	Aiguilles
$\rho_{s}(g.cm^{-3})$	0,36	0,43	0,3

Tableau 3-8 Masse volumique (ρ_s) de la matière sèche de différents organes chez le pin noir d'Autriche.

Ces valeurs ouvrent la possibilité dans un premier temps de remonter à la biomasse sèche (kg.ms/ha ou tonnes/ha), mais comme il a été mentionné précédemment, à la vue du faible nombre d'échantillons, nous avons gardé une formulation de la ressource en terme de volume (m³/ha). Si cette formulation rentre dans le cadre du langage forestier, il conviendra de compléter ces résultats pour passer à une formulation en terme de matière sèche par hectare intéressant en particulier les éco-physiologistes. La masse volumique de la matière sèche a néanmoins été utilisée avec l'humidité pondérale dans le calcul de la constante diélectrique des éléments végétaux. Cette variable est de première importance sur la détermination du niveau du coefficient de rétrodiffusion radar et sur son évolution temporelle en fonction de l'évolution de la teneur en eau des éléments végétaux.

Le coefficient de rétrodiffusion a été calculé sur une série de données spatioportées acquises sur le site d'étude et présentées au paragraphe suivant.

3.4 Données RSO acquises sur le site

Les données acquises et utilisées dans le cadre de ce travail sont issues de différents capteurs spatioportés (ERS1/2, JERS-1 et SIR-C/X-SAR) présentant des caractéristiques d'acquisitions différentes (fréquence, polarisation, angle de visée....). Les principales caractéristiques de chacun de ces capteurs sont récapitulées au Tableau 3-9 accompagnées des conditions climatiques observées le jour des acquisitions.

Les configurations radar utilisées embrassent une gamme de fréquence, de polarisation et d'incidences étendues, reflétant la majorité des configurations spatioportées

actuellement disponibles ou en passe de l'être (SIR-C/X-SAR) à moyen terme. Il ressort également des conditions météorologiques peu contrastées s'inscrivant dans une série climatique stable précédant la date d'acquisition. Les dates d'acquisition se répartissent sur une période d'environ un an et demi entre l'acquisition de l'image ERS-1 et du deuxième vol expérimentale de SIR-C/X-SAR embarqué sur la navette américaine Endeavour, laissant peu de place à des changements forestiers majeurs sauf accidents (chablis, feux..) ou interventions humaines (éclaircies, coupe à blanc...), donc peu dommageable sur la variabilité temporelle des paramètres forestiers mesurés.

Capteurs	Date du passage	Configuration	Passe/ Direction de visée	Résolution/ Taille du pixel	Nombre de vues	Température / Vitesse du vent
ERS-1	17/06/93	C-VV 23°	descendante droite	25 / 12,5	4	15°C/ 5 m/s
JERS-1	24/06/93	L-HH 39°	descendante droite	25 / 12,5	4	14°C/ 3 m/s
SIR-C SRL-1 SRL-2	15/04/94 06/10/94	L, C (HH,HV) 52°	ascendante droite	15 /12,5	7,8	2°C / 11m/s 8°C / 16m/s
X-SAR SRL-1 SRL-2	15/04/94 06/10/94	X-VV 52°	ascendante droite	15 /12,5	7	2°C / 11m/s 8°C / 16m/s

Tableau 3-9 Récapitulatif des données RSO acquises sur le site d'étude pour les différents capteurs spatioportés

On se reportera au Chapitre 2 pour la description de ces capteurs.

Outre ces données, d'autres types de données concernant ERS-1/2 (données brutes RAW et PRI) ont également été acquises sur le site et utilisées en particulier dans le cadre de traitements interférométriques. Les détails concernant ces données sont fournis à l'annexe A.

3.5 Conclusions

Ce chapitre avait pour principal objectif de présenter le dispositif expérimental mis en place dans le cadre de l'étude. De plus, pour préciser le contexte du travail nous avons aussi présenté les résultats de caractérisation du milieu forestier nécessaires à l'étude de la sensibilité du signal radar aux paramètres liés à la ressource forestière et à l'interprétation de l'interaction ondes-forêt.

Parmi ces résultats, la caractérisation des paramètres dendrométriques classiques (hauteur, densité.....) ne pose pas de problèmes particuliers. Les paramètres de forme (dimension, branchaison...) des composants végétaux peuvent être assez bien décrits notamment par la description formelle mise en œuvre dans le cadre de l'approche architecturale. Par contre les paramètres décrivant l'orientation sont plus délicats à obtenir, pour cela le moteur de croissance AMAPsim permettant de simuler l'architecture des végétaux en 3D prend tout son intérêt et sera développé au chapitre 5.

Le comportement en croissance du pin noir sur le site est dans l'ensemble homogène, seuls quelques effets liés à la sylviculture ressortent fortement :

- un effet année observé sur les peuplement de 10 et 20 ans faisant suite à un traitement anti-graminéen et ayant induit une forte croissance pour l'année 1988;
- de fortes densités observées sur certaines unités en liaison avec la sylviculture dynamique appliquée ces dernières années sur ces peuplements (régénération naturelle sur les causse, fortes densités résiduelles des vieux peuplement de protection...).

Il conviendra si possible d'intégrer ces variabilités dans la phase d'interprétation de l'interaction du signal radar avec le couvert forestier par la modélisation théorique. Mais tout d'abord, il convient au travers du chapitre suivant :

- de déterminer le type de liaison expérimentale existant entre le coefficient de rétrodiffusion radar introduit au chapitre précédent et les paramètres forestiers mesurés (biomasse, hauteur, densité.....) et présentés au cours de ce chapitre,
- d'évaluer l'impact de la topographie sur le lien entre coefficient de rétrodiffusion-paramètres forestiers (biomasse, volume....) à des fins de modélisation empirique et de correction,
- de passer à une première phase d'interprétation phénoménologique des comportements observés.

Références Bibliographiques

- Aussenac, G. (1980). "Comportement hydrique de rameaux excisés de quelques espèces de sapins et de pins noirs en phase de dessication." An. Sci. forest., 37(3), 201-215.
- Aussenac, G., and Granier, A. (1978). "Quelques résultats de cinétique journalière du potentiel de sève chez les arbres forestiers." An. Sci. forest., 35, 19-32.
- Aussenac, G., and Valette, J. C. (1982). "Comportement hydrique estival de Cedrus atlantica manetti, Quercus ilex L. et Quercus pubescens Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux." An. Sci. forest., 39(1), 41-62.
- Barczi, J. F., Reffye de, P., and Caraglio, Y. (1996). "Essai sur l'identification et la mise en oeuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale." Science Update. I.N.R.A., Versailles, France, 205-255.
- Barthélémy, D., Caraglio, Y., and Costes, E. (1996). "Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique des végétaux." *Science Update. I. N. R. A.*, Versailles, France, 89-139.
- Beaudoin, A. (1992). "Observation de la terre par radar imageur : estimation de la biomasse forestière,", Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Beaudoin, A., Deshayes, M., Piet, L., Stussi, N., and Le Toan, T. (1994). "Retrieval and analysis of temperate forest backscatter signatures from multitemporal ERS-1 data acquired over hilly terrrain." Ist Symposium on ERS-1 Pilot Projects, 283-289.
- Bouchon, J. (1973). "Biomass studies in a biological reserve. 1-Estimation of branch volume." *IUFRO* biomass studies Meeting, 249-258.
- Chevrou, R. B. (1988). Inventaire Forestier National : méthodes et procédures, DERF, Ministère de l'Agriculture, Montpellier, 105p.
- Chevrou, R. B., Guero, M. C., and Houllier, F. (1988). Utilisation des résultats et des données brutes de l'Inventaire Forestier National, DERF, Ministère de l'Agriculture, Montpellier, 187p.
- Couhert, B., Demarcq, P., Leclerc, D., and Chauvin, C. (1990). "Sylviculture du pin noir d'Autriche (*Pinus nigra nigricans*)." Bulletin Technique ONF, 18, 1-32.
- Demers, A. (1997). "Analyse préliminaire des résultats obtenus sur le pin noir d'Autriche de 20 ans (*Pinus nigra nigricans Host.*).", Unité de modélisation CIRAD-GERDAT, .
- Dreyfus, P. (1990). "Produire pour protéger ou comment limiter le risque d'incendie dans des peuplements de pin noir d'Autriche des Alpes sèches." *Revue Forestière Française*, XLII(sp), 207-217.
- Duplat, P. (1990). "Effet des éclaircies tardives sur le pin noir." Bulletin Technique ONF, 18, 33-40.
- Duplat, P., and Perrotte, G. (1983). Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers, ONF, Section technique.
- Epenoux d', F. (1992). "Relation station-production application au pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales.", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 214p.
- Gillot, P. (1985). "Economie de l'eau chez l'epicea (*Picea abies* L. Karsten.) en conditions de détresse hydrique : variabilité écophysiologique des individus dans les Alpes Dauphinoises Comparaison avec le sapin (*Abies alba* Mill.),", Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Grenoble.
- Godin, C., Costes, E., and Caraglio, Y. (1997). "Exploring plant topological structure with the AMAPmod software: an outline." Silva Fennica, 31(3), 357-368.
- Guyon, J. P. (1986). "Influence du climat sur l'expression des composantes de la croissance en hauteur chez le pin noir d'Autriche (*Pinus nigra Arn. ssp nigricans*)." An. Sci. forest., 43(2), 207-226.
- Jones, H. G. (1983). "Plant water relations, Plant and microclimate.", C. U. Press, ed., 61-84.
- Kramer, P. J. (1988). "Measurement of plant water status : historical perspectives and current concerns." Irrig. Sci., 9, 275-287.
- Laganne, J. P. (1988). "Etude des stations forestières du Causse de Mende,,Service départemental de la Lozère.", Rapport ONF, Service départemental de la Lozère, Mende.
- Marsteau, C., and Agrech, G. (1995). "Typologie des stations forestières des grands Causses.", Rapport Cemagref, Clermont-Ferrand, 174p.
- Reffye de, P. (1979). "Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *coffea* robusta," Thèse de doctorat d'état, Université de Paris-Sud Orsay, Paris, 195p.
- Renaud, J. P. (1995). "Typologie et cartographie des forêts irregulières de montagne : objectifs, méthodologie, intérêt pour la gestion forestière." La cartographie pour la gestion des espaces naturels.

Ryan, M. G. (1989). "Sapwood volume for three subalpine conifers : predictive equations and ecological implications." Can. J. For. Res., 19, 1397-1401.

- Salas, W. A., Ranson, J. K., Rock, B. N., and Smith, K. T. (1994). "Temporal and spatial variations in dielectric constant and water status of dominant forest species from New England." Remote Sens. Environ., 47, 109-119.
- Sellin, A. (1994). "Sapwood-heartwood proportion related to tree diameter, age, and growth rate in *Picea abies.*" Can. J. For. Res., 24(1022-1028).
- Timbal, J., Turrel, M., and Ducrey, M. (1985). "Les facteurs de productivité du Pin noir d'Autriche (Pinus nigra Arnold. ssp. nigricans Host. austriaca Hoss. Novak) dans les Alpes du sud." An. Sci. forest, 42(3), 265-282.
- Toth, J., and Turrel, M. (1983). "La productivité du pin noir d'Autriche dans le sud-est de la France." Revue Française Forestière, XXXV(2), 111-121.
- Ulaby, F. T., and El-Rayes, M. A. (1987). "Microwave dielectric spectrum of vegetation- part II: dualdispersion model." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-25(5), 550-557.
- Yang, K. C., and Murchinson, H. G. (1992). "Sapwood thickness in *Pinus contorta* var. latifolia." Can. J. For. Res., 22, 204-206.
- Yang, K. G., Hazenberg, G., Bradfield, G. E., and Maze, J. R. (1985). "Vertical variation of sapwood thickness in *Pinus banksiana* Lamb.and *Larix laricina* (Du roi) K. Koch." *Can. J. For. Res.*, 15, 822-828.

Chapitre 4

Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier

Chapitre 4

Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier

4.1 Etat de l'art	88
4.2 Objectifs	90
4.3 Méthodologie	90
4.3.1 Post-traitement des images 4.3.2 Analyse de la sensibilité du σº aux paramètres forestiers	91 91
4.4 Post-traitement des images	91
 4.4.1 Analyse visuelle préliminaire des images brutes RSO β⁰ 4.4.2 Corrections radiométriques 4.4.2.1 Correction de l'aire du pixel 4.4.2.2 Correction angulaire 4.4.2.2.1 Méthodologie 4.4.2.2.2 Analyse des résultats 4.4.3 Corrections géométriques 4.4.4 Résultats du post-traitement des images RSO 4.4.4.1 Précision radiométrique 4.4.4.2 Précision géométrique 	91 95 95 96 97 99 99 99 104
4.5 Sensibilité du σ^0 aux paramètres forestiers	104
 4.5.1 Approche 4.5.1.1 Stratégie adoptée 4.5.1.2 Méthodologie 4.5.1.3 Analyse de la répartition des unités en fonction du θ_{loc} 4.5.2 Analyse visuelle préliminaire 4.5.3 Analyse quantitative du coefficient de rétrodiffusion σ⁰ en fonction 	104 104 105 105 106 des
paramètres forestiers	107
 4.5.3.1 Sensibilité du σ⁰ au volume des fûts 4.5.3.2 Sensibilité du σ⁰ aux autres paramètres forestiers 4.5.3.3 Comparaison des résultats obtenus avec ceux issus d'autres travaux 4.5.4 Interprétation phénoménologique du σ⁰ 4.5.4.1 Cas du terrain plat 4.5.4.2 Interprétation 4.5.4.3 Cas du terrain accidenté 4.5.4.4 Interprétation 	107 114 115 117 117 119 120 121
4.6 Conclusions	121
Péfénences hibliographiques	122

.

.

. .

Chapitre 4

Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier

"Nous ne pouvons pas nous passer de nos formes habituelles d'intuition, qui constituent le cadre de notre expérience et qui colorent tout notre langage." Niels Bohr

4.1 Etat de l'art

Corrélativement aux longueurs d'ondes centimétriques utilisées et à leur capacité de pénétration dans les milieux naturels étudiés, la télédétection RSO s'est d'emblée affirmée comme potentiellement très intéressante pour inférer des paramètres quantitatifs de la ressource des milieux étudiés. Notamment, en repoussant le seuil de saturation rapidement observé avec les données optiques, complété en cela par sa capacité de fonctionnement par tout temps, de jour comme de nuit.

Faisant suite à l'apparition de ces nouvelles données, de nombreux travaux entrepris ces dernières années ont permis de montrer la liaison entre le signal radar et la biomasse aérienne de différents types de milieux naturels étudiés, en particulier des forêts (non exhaustif):

- de pins monospécifiques du sud-est des Etats-Unis et du sud-ouest de la France (Dobson *et al.* 1992; Kasischke *et al.* 1994; Le Toan *et al.* 1992; Riom and Le Toan 1981);
- de conifères des Etats-Unis et d'Europe (Moghaddam *et al.* 1994; Rauste *et al.* 1994);
- de feuillus en Europe (Israelsson et al. 1994);
- mixtes feuillus-résineux des Etats-Unis et d'Alaska (Dobson *et al.* 1995a; Harrell *et al.* 1995; Ranson and Sun 1994; Rignot *et al.* 1994);
- tropicales humides d'Amazonie (Foody et al. 1997; Rignot et al. 1995).

La gradation dans la complexité des milieux étudiés, allant de peuplements de résineux "simples" à la forêt tropicale humide, en passant par les forêts mixtes (feuillusrésineux) généralement situés en terrain plat, s'inscrit dans une démarche méthodologique de type ascendante. Les principaux résultats émergeant de ces études ont ainsi permis de préciser la sensibilité du signal radar aux propriétés du milieu forestier, fonction entre autres, du type de couvert (structure, architecture, biomasse) et des configurations radar (fréquence, incidence, polarisation). De plus, des explicitations phénoménologiques des mécanismes d'interaction du signal radar avec le milieu forestier sont issues de ces travaux. L'ensemble de ces travaux montre 1) la sensibilité du signal radar rétrodiffusé à la biomasse ligneuse *via* certains paramètres forestiers "vus" avec apparition d'une saturation pour de forts niveaux de biomasse (> 250 t/ha), 2) la sensibilité dépendant des configurations radar (longueur d'onde, polarisation, incidence), 3) de fortes sensibilités et dynamiques du signal, observées pour les données basse fréquence (bande P et L) en polarisation croisée HV comparée aux polarisations parallèles HH, VV ou circulaire, fortement réduite voire inexistante en haute fréquence (bande C et X), 4) des impacts perturbateurs de la structure, de l'architecture du peuplement et/ou de la topographie sur le lien physique, nécessitant une meilleure compréhension à des fins de correction.

Emboîtant le pas à ces travaux, des travaux récents dont celui-ci, visent à généraliser ou à adapter l'utilisation de ces liens (signal radar-paramètres forestiers) pour des environnements forestiers plus variés et plus complexes en terme de structure et **de** situation topographique.

Tout d'abord, la structure de la branchaison reliée à l'architecture d'arbre doit être prise en compte dans une stratégie d'inversion des données RSO en paramètres forestiers, par classification *a priori* des types forestiers en classes structurales simples (Dobson *et al.* 1995a; Ferrazzoli and Guerriero 1995; Imhoff 1995; Sader 1987) ou en classe de modèles architecturaux (Mougin *et al.* 1993; Ustin *et al.* 1991).

Perturbations topographiques

Ensuite, la généralisation passe nécessairement par l'étude de phénomènes perturbateurs liés à la topographie, qui a la capacité de perturber le lien physique existant entre le signal radar rétrodiffusé et la biomasse forestière. L'impact de la topographie a été partiellement analysé à l'aide d'études théoriques (Amar et al. 1995; Beaudoin et al. 1994; van Zvl et al. 1993) et/ou expérimentales (Holecz et al. 1995; Luckman and Baker 1994; Rauste 1990; van Zvl 1993). Il ressort de ces études un impact variable de la topographie en fonction : 1) de la configuration radar, 2) des gammes de pente et d'azimut rencontrées sur le terrain, 3) du type de peuplement forestier et de son stade de croissance. L'incidence locale du radar (angle entre la normale au terrain et la direction de visée radar) en terrain accidenté en relation avec l'architecturale et la biomasse, peuvent affecter la nature des mécanismes de rétrodiffusion. En particulier, on peut s'attendre à une plus forte modification du mécanisme de diffusion bistatique tronc-sol reliant physiquement le signal radar à la biomasse des fûts, comparé aux mécanismes de diffusion de sol et de volume du couvert (van Zyl 1993). Néanmoins, peu de travaux étudiant en détail les effets de la topographie sur le signal radar combinant une phase expérimentale à une interprétation basée sur la modélisation théorique ont été menées à ce jour. Pourtant, il est indispensable de comprendre l'impact de la topographie sur le lien physique afin de l'atténuer voire de l'éliminer par le développement d'un modèle de correction semi-empirique. Le présent travail s'inscrit, dans cette optique.

Il est à noter que d'autres travaux se sont focalisés sur l'apport de la multiconfiguration radar (incidence, polarisation, fréquence) pour en particulier améliorer l'estimation de la ressource forestière (Wu 1987) et repousser le seuil de saturation qui apparaît plus ou moins tôt en fonction de la configuration radar. Ainsi, (Hussin *et al.* 1991) utilisent la multi-incidence pour augmenter la capacité de la bande L-HV à estimer la biomasse aérienne, alors que (Dobson *et al.* 1995b; Kasischke *et al.* 1995) utilisent la multifréquence et la multi-polarisation au travers de démarches basées sur les liens spécifiques observés entre différentes parties du couvert forestiers et certaines configurations radar. Ces approches ont ainsi permis d'améliorer l'estimation de biomasse forestière en repoussant le seuil de saturation. D'autres démarches (Ranson *et al.* 1995; Ranson and Sun 1994) consistent à exploiter la muti-configuration par l'utilisation de rapports de configurations tels que : P-HV/C-HV ou encore L-HV/C-HV. Toutefois, ces combinaisons ne reposent sur aucune base physique et leur généralisation à d'autres sites reste problématique. Cet aspect n'a pas été abordé dans le cadre de ce travail en raison en particulier du faible nombre de données RSO multi-configurées à notre disposition.

La majorité des résultats obtenus en milieu forestier concerne l'information en puissance du signal rétrodiffusé (coefficient de rétrodiffusion σ^0) pour une ou plusieurs polarisations. Les résultats présentés dans le cadre de ce chapitre sont également centrés sur cette grandeur physique. Or, même si cette information de puissance est des plus utilisées et des mieux caractérisées, la batterie des données radar ne se limite pas à ce seul coefficient de rétrodiffusion, et comprend également les indices polarimétriques et interférométriques. Ces derniers sont récents, plus complexes d'utilisation et d'interprétation, et ont donné lieu à encore moins de travaux en milieu forestier. Quelques résultats d'analyse et d'interprétation obtenus sur le site d'étude concernant leur utilisation en milieu forestier sont présentés aux annexes A et B.

4.2 Objectifs

Généraliser l'estimation des paramètres de la ressource forestière en abordant des conditions de site plus variées (présence de topographie) et contrôlées, tel est le contexte dans lequel s'insèrent les objectifs de ce chapitre qui peuvent se décliner suivant trois principaux axes :

- 1. analyser le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar pour un type forestier simple (plantations de pins noirs d'Autriche) situé en terrain accidenté. Plus particulièrement, analyser les variations de la réponse radar en fonctions des paramètres forestiers avec la présence perturbatrice due au relief, quantifiée par deux paramètres topographiques;
- 2. développer, sur la base des résultats de l'analyse, une méthode de correction angulaire semi-empirique des effets du relief spécifique aux couverts forestiers;
- 3. entamer une première phase d'interprétation phénoménologique des comportements observés qui seront étayés par la suite par une phase de modélisation théorique.

4.3 Méthodologie

La méthodologie mise en place est de type ascendante, avec une complexification progressive des conditions expérimentales où pour un même type forestier une déconvolution des effets topographiques et du stade de croissance est réalisée. La mise en œuvre de la méthode est réalisée au sein du SIG, à l'échelle d'unités élémentaires, représentatives de la parcelle d'appartenance, au sein desquelles les grandeurs physiques (images radar), les paramètres forestiers et les paramètres de perturbations topographiques sont mis en correspondance.

Avant toute mise en correspondance, il convient dans une première étape de posttraitement des images radar, de générer les images des paramètres de perturbations topographiques servant à la correction radiométrique des images radar et au développement d'une méthode de correction angulaire en milieu forestier. Ce n'est que dans une deuxième étape que l'étude de la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion aux paramètres forestiers est entreprise.

4.3.1 Post-traitement des images

Cette étape est réalisée grâce à la chaîne de post-traitement (cf Chapitre 2) incluant les deux niveaux de corrections radiométriques développés par le LCT (Stussi *et al.* 1995) et une méthode de correction géométrique (Guindon 1993; Guindon and Adair 1992) implémentée dans un logiciel commercial. Rappelons que les traitements radiométriques se subdivisent en différentes étapes :

• la simulation des images des paramètres de perturbations topographiques θ_{loc} et A_{topo} est réalisée dans un premier temps à l'aide du logiciel du LCT;

• dans un deuxième temps, les deux niveaux de correction radiométrique sont appliqués, impliquant ici le développement d'une méthode semi-empirique de correction angulaire $f(\theta_{loc})$ valide pour des couverts forestiers;

• finalement, une étape de validation de la correction à l'aide de l'analyse visuelle et de quantités statistiques vient clôturer le post-traitement des images.

4.3.2 Analyse de la sensibilité du σ^0 aux paramètres forestiers

L'intégration des images post-traitées dans le SIG permet la mise en correspondance des grandeurs physiques radar avec les paramètres forestiers pour :

• extraire les statistiques de σ^0 à l'échelle 1) d'unités homogènes obtenues par croisement dans le SIG, et 2) des 58 unités élémentaires homogènes enquêtées par le LCT (*cf* Chapitre 3),

• établir des relations statistiques empiriques entre le σ^0 , les paramètres forestiers et l'angle d'incidence local pour les différentes configurations radar,

• étudier l'évolution de ces relations en fonction du niveau de correction radiométrique, pour différentes configurations radar complétées par l'apport de l'interprétation phénoménologique,

• déboucher sur la comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres études.

4.4 Post-traitement des images

4.4.1 Analyse visuelle préliminaire des images brutes RSO β⁰

La Figure 4-1 regroupe les images initiales de β^0 géocodées pour les différents capteurs radar (ERS-1, JERS-1 et SIR-C), couvrant une région de 12 x 12 km centrée sur le truc de Balduc.



Figure 4-1 : Images JERS-1, SIR-C et ERS-1 (de haut en bas), géocodées et non corrigée des effets du relief.

Globalement, l'image en tons de gris d'ERS-1 montre peu de contraste, où prédomine d'importantes zones sombres découpées par des zones intensément brillantes. A première vue, il n'est pas évident que le niveau de gris soit proportionnel à la présence de la forêt et à son stade de développement. Les zones de faible radiométrie (i.e. faible Compte Numérique CN) sont visibles au niveau des zones plates, ou plus ou moins ondulées correspondant aux plateaux de causses ou aux fonds de vallées. Sur les plateaux du causse de Mende (zone d'analyse comprise dans le cercle rouge sur l'image), une modulation des tons de gris est observée en corrélation avec l'ondulation topographique de cette zone. Au sein de ces zones, certaines très sombres se localisent en particulier en bordure du Causse de Mende au niveau des fortes pentes opposées à la visée radar. A contrario, les forts CN se situent sur les fortes pentes en bordure de causse mais cette fois-ci faisant face à la visée radar. Des zones brillantes de plus faibles superficies, sont également à signaler en fond de vallées correspondant à la présence d'un tissu urbain (ex : ville de Mende en haut à gauche de la zone).

Pour l'image JERS-1 une première analyse montre une plus grande richesse d'information. En effet, outre une similitude de localisation des zones sombres et très brillantes avec l'image ERS-1 (même direction de la visée radar), émerge une troisième classe de radiométrie correspondant aux peuplements forestiers présents sur la zone. La variation du CN au sein des peuplements est fortement modulée par la présence du relief, c'est le cas en particulier sur le Causse de Mende. Toutefois, des variations du CN sont observées en bordure du Causse de Sauveterre (zone faiblement accidentée correspondant à la zone d'analyse rectangulaire rouge sur l'image) pouvant être attribuées à des variations du stade de croissance des peuplements forestiers.

Nous retrouvons les mêmes variations sur le composé coloré RVB (Rouge = L-HV, Vert = L-HH, Bleu = C-HV) SIR-C avec des teintes allant du vert (dominance CN L-HH) pour le jeunes peuplements au jaune-vert (fort CN L-HV) pour les peuplements matures. Les distorsions observées sur les fortes pentes se retrouvent inversées sur le composé SIR-C en liaison avec la direction de la visée radar qui dans cas provient du haut gauche de l'image.

Il ressort de cette analyse préliminaire, que la visibilité des peuplements forestiers se fait comme prévu essentiellement grâce à la plus basse fréquence (bande L). D'autre part, quelles que soient les données a) ERS-1, b) JERS-1 c) composé coloré SIR-C, de fortes distorsions radiométriques apparaissent sur les flancs des Causses (pentes jusqu'à 45°) exposés ou opposés à la visée radar. Ces distorsions mettent en évidence la nécessité des corrections radiométriques.

A cet effet, la chaîne de correction radiométrique et géométrique (voir chapitre 2 pour plus de détails) des images radar a été développée au LCT dont l'ensemble des principales étapes sont rappelées à la Figure 4-2. Rappelons que cette chaîne de post-traitement des images RSO se décompose en deux parties :

• une partie A, regroupant les deux principales étapes de correction radiométrique développées par le LCT,

• une partie B, correspondant à la correction géométrique (géocodage) des images réalisées au sein d'un logiciel commercial.





94

_Chapitre 4

4.4.2 Corrections radiométriques

Les corrections radiométriques se subdivisent en deux étapes introduites au niveau de la partie A de la chaîne de post-traitement (Figure 4-2). Ces deux étapes de correction s'insèrent dans le modèle d'image introduit au chapitre 2 et que nous rappelons ici :

$$CN^2 = K\sigma^{\circ}C_{\theta}C_{A}S \tag{4-1}$$

Où K est la constante d'étalonnage donnée par les fournisseurs d'images, S est le terme multiplicatif de speckle, C_a et C_{θ} sont les termes perturbateurs : C_a s'attache à corriger l'image de la variation de l'aire du pixel, alors que le terme C_{θ} cherche à corriger les variations angulaires du signal.

4.4.2.1 Correction de l'aire du pixel

Dans ce cas, les distorsions radiométriques sont d'origine géométrique indépendante du thème imagé et uniquement dépendante de la géométrie de prise de vue du capteur et de la topographie. Il s'agit donc, à partir des paramètres de visée radar du MNT de générer l'aire "réelle" comprise au sein d'un pixel *via* un simulateur basé sur une méthode de lancer de rayon (Stussi *et al.* 1995). Cette pseudo-image ou image d'aire est ensuite superposée à l'image RSO brute (β^0) permettant son étalonnage par l'application du facteur correctif C_a prenant la forme :

$$C_{A} = \frac{A_{topo}}{A_{plat}}$$
(4-2)

L'image obtenue en sortie est normalisée des effets d'aire mais reste dépendante des effets angulaires, et est appelée image de $\sigma^{0}(\theta_{loc})$. Cette image une fois géoréférencée (partie B Figure 4-2) permet d'obtenir une carte de $\sigma^{0}(\theta_{loc})$, que nous avons utilisé dans l'étude du comportement angulaire du signal radar en milieu forestier. Cette phase a pour objectif de développer un modèle semi-empirique de correction angulaire de milieux forestiers.

4.4.2.2 Correction angulaire

Contrairement à la variation de l'aire du pixel radar indépendante du thème, le comportement angulaire du signal radar est lié à la physique de l'interaction ondes-matière et donc du thème. Cette étape vient en aval de l'étalonnage de l'effet d'aire et correspond au deuxième niveau de correction radiométrique (partie A Figure 4-2). Jusqu'à présent, la majorité des modèles comportement angulaire utilisés sont de nature empirique (cf chapitre 2) indépendants de la thématique et n'ont pour la plupart reçu aucune validation physique. Nous nous proposons ici, au travers d'une étude expérimentale appuyée par un interprétation phénoménologique, de développer un modèle semi-empirique du comportement angulaire pour la forêt. En effet, le site d'étude choisi à cet effet, se prête à une analyse plus approfondie de ce comportement la même essence forestière (pin noir d'Autriche) se retrouve dans des configurations topographiques variées.

4.4.2.2.1 Méthodologie

La méthodologie mise en œuvre dans l'étude expérimentale et la modélisation empirique du comportement angulaire du signal radar en milieu forestier sont présentées à la Figure 4-3. Elle est basée sur l'utilisation du SIG au sein duquel le comportement du σ^0 en fonction de l'angle d'incidence local (θ_{loc}) et de l'âge d'unité élémentaire d'échantillonnage a été étudié. Cela a consisté à croiser les plans d'informations d'âge des peuplements, d'angle d'incidence local simulée (θ_{loc}) et du coefficient de rétrodiffusion $\sigma^0(\theta_{loc})$.



Figure 4-3 : Organigramme de la méthodologie utilisée pour l'analyse et la modélisation du comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion σ^0 (θ_{loc}).

4.4.2.2.2 Analyse des résultats

La Figure 4-4 présente les résultats du comportement angulaire moyen (moyenné sur l'ensemble des classes d'âge) du coefficient de rétrodiffusion pour l'ensemble des configurations radar à notre disposition. Tout d'abord, il apparaît systématiquement une décroissance non-linéaire du $\sigma^0(\theta_{loc})$ en fonction de l'angle d'incidence local, avec une accélération de la décroissance pour les forts angles d'incidence. La présence de fortes valeurs d'angle d'incidence local pour la configuration SIR-C entraîne des amplitudes de variation du coefficient de rétrodiffusion plus importante (≈ 5 dB) comparées à celles observées pour ERS1 et JERS1 (≈ 3 dB). Dans la configuration SIR-C, le comportement est sensiblement identique quelque soient la fréquence et la polarisation au niveau de rétrodiffusion près. Par contre, le comportement est significativement différent entre SIR-C L-HH (55°) et JERS-1 L-HH (38°). Concernant ERS-1, il est à noter que si l'on retrouve le même comportement général, les deux points concernant les plus faibles incidences locales divergent de la tendance moyenne.



Figure 4-4 : Comportement angulaire moyen obtenu en moyennant les σ^0 de l'ensemble des classes d'âges, ajusté par un modèle empirique décrit par l'équation (4-3) pour : a) bande C et b) bande L.

Dans l'approche de modélisation semi-empirique, nous raisonnerons sur le comportement angulaire moyenné sur l'ensemble des classes d'âge car il affiche le même comportement dans chaque classe au niveau de rétrodiffusion près. Si l'on pose en première approximation une prépondérance du mécanisme de rétrodiffusion de volume, ce comportement angulaire s'approxime bien par l'équation empirique en cosinus donnée par (Holecz *et al.* 1992) équivalente à celle proposée par (Teillet *et al.* 1985) (équation 2-28 Chapitre 2):

$$\sigma^{\circ}(\theta_{loc}) = \sigma^{\circ}(0^{\circ})\cos^{n}(\theta_{loc})$$
(4-3)

où θ_{loc} est l'angle d'incidence local, la puissance n et le σ^0 (0°) sont des valeurs obtenues par ajustement avec la méthode des moindres carrés et après moyennage sur les différentes classes d'âges. L'approximation des données expérimentales par l'équation (4-3) est figurée en trait plein sur les graphiques de la Figure 4-4.

Les résultats de l'ajustement concernant les valeurs estimées de la puissance n sont résumés au Tableau 4-1. Il est à noter que les valeurs expérimentales de $\sigma^0(\theta_{loc})$ des jeunes classes d'âge situées aux très faibles incidences locales n'ont pas été retenues dans l'ajustement du modèle. En effet, ces signatures affichent un comportement angulaire différent d'un simple cosinus se rapprochant de mécanismes physiques autres que ceux observés sur la forêt. Dans l'optique du développement d'un modèle angulaire valide pour les couverts forestiers, il convenait d'écarter ces signatures du calcul. Les résultats montrent la qualité générale de cet ajustement et la stabilité des valeurs prises par la puissance n peu importe la classe d'âge.

D'autre part, la plage de variation de ce paramètre va de 0,36 pour JERS-1 à 0,93 pour ERS-1, pour un coefficient de détermination qui ne descend pas en deçà de 0,88. Quelques variations saisonnières s'observent également pour SIR-C L-HH avec des valeurs de n respectivement de 0,91 (image d'avril 1994) et de 0,75 (image d'automne 1994). Enfin, un résultat surprenant est observé pour JERS-1 avec une valeur de n (0,36) significativement inférieure à celles obtenues pour l'ensemble des autres configurations radar.

Configuration	n		R ²			
du RSO	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type		
ERS-1 C-VV 23°	0,93	0,16	0,90	0,100		
JERS-1 L-HH 38°	0,36	0,10	0,88	0,085		
	SIR-C (Avril 1994)				
C-HH 55°	0,88	0,05	0,96	0,040		
C-HV 55°	0,68	0,09	0,92	0,063		
L-HH 55°	0,91	0,14	0,97	0,030		
L-HV 55°	0,90	0,23	0,93	0,055		
SIR-C (Octobre 1994)						
C-HH 55°	0,83	0,15	0,96	0,026		
C-HV 55°	0,69	0,16	0,96	0,020		
L-HH 55°	0,75	0,13	0,98	0,019		
L-HV 55°	0,85	0,11	0,98	0,012		

Tableau 4-1 : Valeurs moyennes expérimentales prises par la puissance n et coefficient de détermination \mathbb{R}^2 sur l'ajustement. Les écart-types associés sont calculés à partir des résultats obtenus pour chaque classe d'âge.

Dans la pratique, pour la correction radiométrique angulaire des milieux forestiers, on préférera exprimer le $\sigma^0(\theta_{loc})$ en fonction de σ^0 en terrain plat, c'est à dire pour $\theta_{loc} = \theta$ où θ est l'angle d'incidence. Le modèle de correction radiométrique semi-empirique prend alors la forme :

$$\sigma^{0}(\theta_{loc}) = \sigma^{0}(\theta) \left(\frac{\cos(\theta_{loc})}{\cos(\theta)}\right)^{n}$$
(4-4)

Il se déduit de ce modèle le facteur correctif C_{θ} (rapport de cosinus à la puissance *n*) du modèle image introduit à l'équation (4-1) correspondant au deuxième niveau de correction radiométrique (partie A Figure 4-2). Pour la correction, sont utilisés les paramètres *n* obtenus expérimentalement (Tableau 4-1). L'application de ce facteur correctif permet d'obtenir en sortie une image entièrement corrigée des effets du relief appelée image σ^{0} .

4.4.3 Corrections géométriques

L'étape de correction géométrique (partie B Figure 4-2) est basée sur la méthode développée par (Guindon 1993; Guindon and Adair 1992) et qui est implémentée dans un logiciel commercial (module EASYPACE de PCI). La méthode consiste à simuler une pseudo-image à partir des paramètres du RSO et du MNT à l'aide d'un modèle simple de déformation géométrique. Cette simulation vise à reproduire les déformations géométriques des images radar et ne constitue en aucun cas un modèle radiométrique quantitatif pouvant être utilisé pour les corrections radar.

La prise de points d'appuis entre l'image RSO brute et la pseudo-image permet de calculer un deuxième modèle de déformation du premier degré et de superposer les deux images. L'inversion des deux modèles permet d'amener après déformation, l'image RSO dans le système de projection du MNT (ici UTM). Le rééchantillonnage est réalisé par interpolation bilinéaire.

Ce modèle analytique utilisé est basé sur un certain nombre d'approximations (terre sphérique, vélocité du porteur constante...) qui induisent une erreur globale de géocodage. En sortie, l'image obtenue est sur-échantillonée et permet d'obtenir une taille de pixel identique à celle des images soit 12,5 m. Ce sur-échantillonnage entraîne une dégradation de la résolution radiométrique de pentes exposées face au radar.

Les deux modèles ainsi obtenus permettent de géocoder l'ensemble des plans images correspondant aux différents niveaux de correction radiométrique mais également les plans images d'aire du pixel et d'angle d'incidence local issus du simulateur.

4.4.4 Résultats du post-traitement des images RSO

4.4.4.1 Précision radiométrique

Analyse visuelles des images étalonnées des effets d'aire du pixel

La Figure 4-5 présente les images σ^0 (θ_{loc}) résultats de l'application du facteur d'étalonnage de l'aire du pixel (C_a) mettant en évidence la diminution de la modulation topographique. Cette diminution est fonction de l'incidence. Ainsi, en se focalisant sur le Causse de Mende (peuplements forestiers matures homogènes en âge compris dans la zone d'analyse délimitée par le cercle rouge), nous observons une spectaculaire homogénéisation de la radiométrie sur l'image d'ERS-1, plus limitée pour JERS-1 et SIR-C où des effets radiométriques angulaires résiduels importants sont visibles. C'est le cas, par exemple, des flancs du Causse de Mende exposés à la visée radar. En effet, à ces endroits, l'impact de la correction est inversement corrélé à l'angle d'incidence du capteur, car plus l'angle (θ) est faible, plus l'aire intégrée au sein d'un pixel est forte, et plus l'apport de l'étalonnage sera important.



Figure 4-5 : Images JERS-1, SIR-C et ERS-1 (de haut en bas), géocodées et étalonnées des effets du relief.





Cette analyse visuelle est confortée par la gamme des valeurs prises par le facteur correctif des effets d'aire (C_a) présentées en annexe du chapitre 2. L'amplitude de variation du facteur est de l'ordre de 12 dB pour ERS-1 et de 5 dB pour SIR-C. Par exemple, la baisse maximale du coefficient de rétrodiffusion dans le cas de ERS-1 pour un flanc exposé à la visée radar peut atteindre 8,5 dB alors qu'elle n'est que de 4 dB pour SIR-C.

Analyse visuelles des images entièrement corrigées des effets topographiques

La Figure 4-6 présente les images σ^0 étalonnées de l'aire du pixel et corrigées des effets angulaires. Une forte homogénéisation est observée pour l'ensemble des capteurs sur l'ensemble de l'image. Ainsi, l'ondulation radiométrique du plateau du Causse de Mende (zone d'analyse de l'image comprise dans le cercle rouge) a disparu, laissant place à une zone homogène, en liaison avec le stade de croissance homogène des peuplements forestiers présents dans cette zone. La correction permet également de faire ressortir les variations de radiométrie observées en fonction du stade de croissance des peuplements forestiers sur les images JERS-1 et SIR-C localisées en bordure du Causse de Sauveterre (zone d'analyse de l'image figurant dans le rectangle rouge).

Les changements observés par rapport à l'image de $\sigma^0(\theta_{loc})$ sur le Causse de Mende restent faibles dans le cas de l'image ERS-1 et sont plus nets pour les images JERS-1 et surtout SIR-C, où il y a une forte homogénéisation de la modulation topographique. Ces observations sont confirmées par la gamme de variation du facteur correctif angulaire C_{θ} (cf annexe du chapitre 2), qui montre de plus fortes amplitudes de variations pour SIR-C (6 dB) comparé à ERS-1 (2 dB).

Néanmoins, sur les flancs opposés à la visée radar, un effet topographique résiduel semble subsister dans le cas de SIR-C partie sud-est du causse de Mende. Il semble donc que la correction angulaire ne soit pas optimale dans le cas de fortes incidences locales.

Dans le cas de SIR-C nous pouvons également constater à l'intérieur du cercle d'analyse figurant sur l'image, partie sud est du Causse de Mende, la présence de zone d'ombre indiquant des valeurs d'angle d'incidence local supérieures à 90°.

Validation quantitative de la correction

Outre l'impact visuel et l'analyse de la gamme de variation des coefficients correctifs C_a et C_{θ} , un moyen de validation de l'amélioration de la précision radiométrique est l'analyse du coefficient de variation. En effet, le coefficient de variation est un moyen de description du speckle (ou chatoiement, *cf* chapitre 2). En l'absence d'autres effets perturbateurs que le speckle et pour une scène sans texture intrinsèque (σ^0 constant), le coefficient de variation prend une valeur constante qui dans le cas d'images amplitudes multi-vues est donné par (Laur 1989) :

$$CV_{A} = \left(\frac{\sigma_{A}}{\mu_{A}}\right) = \frac{0.523}{\sqrt{L}} \qquad (A = \sqrt{I})$$
(4-5)

où σ et μ sont respectivement la moyenne et l'écart-type, et L est le nombre de vues de l'image donné par les fournisseurs d'images.

Ainsi, si en plus du speckle, une texture liée à des distorsions radiométriques dues à la présence de relief viennent s'ajouter, le coefficient de variation va prendre des valeurs supérieures à celles attendues. Donc pour valider la méthode de correction, l'analyse du coefficient de variation de zones accidentées pour les différentes étapes de corrections radiométriques doit l'amener à tendre vers la valeur théorique liée uniquement à la présence du speckle.

La méthode a consisté pour les différents niveaux de traitement radiométrique à extraire le coefficient de variation sur deux zones forestières homogènes situées respectivement en zone accidentée et en zone plate. La Figure 4-7 présente les résultats obtenus pour les trois capteurs.



Niveau de correction radiométrique

Figure 4-7 : Evolution du coefficient de variation CV de zones forestières homogènes situées en terrain accidenté (traits fins) et en terrain plat (traits épais), pour les trois capteurs et en fonction du niveau de correction radiométrique.

Le coefficient de variation de la zone plate (dénotée speckle) reste constant quelque soit le niveau de correction radiométrique et le capteur, permettant ainsi de caractériser la valeur décrivant le speckle. Le seuil de cette valeur varie en fonction des capteurs en liaison avec leur nombre de vues qui est respectivement de \approx 3 pour ERS-1 et JERS1, et de \approx 7,8 pour SIR-C. La zone située en terrain accidenté montre de fortes variations du coefficient de variation en fonction du niveau de correction radiométrique et du capteur. L'évolution décroissante selon le niveau de correction radiométrique fait tendre systématiquement le coefficient de variation vers la valeur du speckle, à l'équivalent d'un coefficient de variation obtenu en terrain plat. Ces résultats et ceux obtenus par le passé, concourent à valider la chaîne de post-traitement radiométrique des images RSO acquises en terrain accidenté développée par le LCT. A noter qu'il apparaît une décroissance variable en fonction des configurations de visée. Ainsi l'écart le plus fort entre le coefficient de variation des zones plates et accidentées est observé sur les images brutes et en particulier pour ERS-1. Ce comportement est à rapprocher des gammes de valeurs des coefficients correctifs appliquées à chaque étape de correction. En effet, plus l'angle de visée est faible, plus les distorsions radiométriques liées à l'aire du pixel sont fortes, entraînant de fortes valeurs de coefficient de variation. L'application du premier niveau de correction radiométrique entraîne donc une plus forte décroissance du coefficient de variation pour ERS-1 comparé à SIR-C par exemple. Tandis que le deuxième niveau de correction est plus marqué pour les données SIR-C en liaison avec les plus fortes distorsions angulaires observées sur ces données (Figure 4-4).

4.4.4.2 Précision géométrique

Une première analyse qualitative de la précision géométrique est effectuée par superposition avec le parcellaire forestier faisant apparaître une bonne concordance en particulier en limite de parcelle au niveau de zones de transitions marquées forêt/non-forêt. Les valeurs de EQM obtenues sont inférieures au pixel en x et y et légèrement supérieures au pixel pour la EQM totale. Dans le cas d'ERS-1, l'erreur globale de positionnement est de l'ordre de 20 m et d'environ 15 m pour SIR-C. Ces résultats obtenus pour ERS-1 sont comparables avec ceux obtenus par (Guindon and Adair 1992).

Les images RSO géocodées sont donc superposables aux données thématiques présentes dans le SIG avec une précision suffisante pour étudier la sensibilité du signal radar aux paramètres forestiers d'intérêt.

L'application de la méthode de correction radiométrique validée pour différents capteurs RSO spatioportés entraîne une homogénéisation de la réponse radar des thèmes, nécessaire pour la classification et l'estimation de paramètres de la cible (i.e. déconvolution de la composante topographique et thématique du signal radar rétrodiffusé).

Nous sommes donc en mesure d'évaluer la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion radar aux paramètres forestiers ainsi que l'apport des corrections radiométriques dans l'amélioration de cette sensibilité. La partie suivante de ce chapitre y est consacrée.

4.5 Sensibilité du σ⁰ aux paramètres forestiers

4.5.1 Approche

4.5.1.1 Stratégie adoptée

La démarche visant à analyser et à interpréter la sensibilité du signal radar rétrodiffusé aux paramètres forestiers se subdivise en trois principaux points :

• tout d'abord, nous nous attacherons à analyser visuellement les cartes de signal radar avec l'apport du parcellaire forestier et du stade de croissance des peuplements forestiers. Cette partie sera accompagnée d'une première phase d'interprétation des variations radiométriques observées; • ensuite, une analyse quantitative de la liaison entre le signal radar et les paramètres forestiers est menée, et ce aux différentes étapes de correction radiométrique. Une comparaison de nos résultats avec ceux obtenus en terrain plat pour d'autres essences forestières sera également menée;

• enfin, nous poserons les bases théoriques simples de l'interaction ondes-matière pour entamer une première étape d'interprétation phénoménologique des comportements observés concernant : le lien signal radar-paramètres forestiers et le comportement angulaire en présence de topographie.

4.5.1.2 Méthodologie

La méthode d'extraction des statistiques sur les unités élémentaires homogènes renseignées par le LCT est décrite en détail à la Figure 4-8. Les statistiques sont obtenues après croisement dans le SIG des cartes de coefficient de rétrodiffusion β^0 , σ^0 (θ_{loc}), σ^0 et d'angle d'incidence local (θ_{loc}) et du plan contenant les unités LCT (*cf* Figure 3-4 chapitre 3).



Figure 4-8 : Organigramme de la méthodologie utilisée pour l'analyse de la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion aux paramètres forestiers.

4.5.1.3 Analyse de la répartition des unités en fonction du θ_{loc}

La Figure 4-9 présente la répartition de l'angle d'incidence local en fonction du volume des fûts pour l'ensemble des 58 unités du LCT sur lesquelles l'analyse se fonde. Ces résultats montrent une forte dispersion de l'angle d'incidence local en particulier pour SIR-C (de 17° à 80°) sur les unités à forte biomasse correspondant aux vieux peuplements. Cette dispersion est moins importante pour les plus faibles volumes qui sont moins représentés sur les fortes pentes. Si l'importante gamme de variations va permettre d'évaluer l'apport de la correction radiométrique, la gamme de volumes couvert sera le moyen d'établir des relations statistiques entre la radiométrie et ce paramètre mais également l'ensemble des paramètres forestiers d'intérêts (hauteur, densité..).



Figure 4-9 : Répartition des 58 unités élémentaires homogènes en fonction du volume des tiges et de l'angle d'incidence local (θ_{loc}) offert par les divers capteurs.

Ces unités d'une taille supérieure > 2 ha (cf chapitre 3) permettent, après moyennage du signal, d'obtenir une signature radiométrique statistiquement représentative du σ^0 . Ces signatures servent ensuite à l'établissement des relations statistiques entre le coefficient de rétrodiffusion et les paramètres forestiers pour différentes configurations radar et différentes conditions topographiques et saisonnières.

4.5.2 Analyse visuelle préliminaire

En nous appuyant sur l'analyse menée précédemment, nous nous concentrerons sur les images entièrement corrigées des effets du relief, et les contrastes observés pour les différentes configurations radar, liés à la présence des massifs forestiers et au stade de croissance.

Concernant ERS-1 (Figure 4-10) et la bande C, l'analyse générale montre peu de contrastes dû à l'influence de la rugosité et de l'humidité du sol des zones hors-forêt. D'autre part, l'image laisse apparaître peu de sensibilité au stade de développement des couverts forestiers. Ce point est principalement dû à la faible pénétration de la bande C très vite atténuée d'autant que les caractéristiques forestières des unités ont fait apparaître une forte homogénéité quelque soit le stade de croissance considéré.

Pour JERS-1 (Figure 4-11) et la bande L, la séparation forêt-non forêt est nette comparée à ERS-1. La bande L d'une longueur d'onde ≈ 27 cm est moins affectée par la rugosité des thèmes hors-forêt entraînant une plus faible radiométrie de ces derniers et leur teinte sombre sur l'image. Les peuplements de pin noir sont plus brillants que les futaies d'épicéa et les boisements morcellés de feuillus situés à l'est. En se concentrant sur les
peuplements de pins noirs, en particulier sur les parcelles forestières situées au centre gauche de l'image en bordure du causse de Sauveterre, on observe des niveaux de gris variables en liaison avec le stade de croissance. Cette analyse laisse entrevoir une sensibilité du signal radar aux paramètres de la ressource forestière.

Quant à SIR-C (Figure 4-12) et la combinaison de la bande L et C, un meilleur contraste forêt non-forêt est observé grâce à la bande L d'une part, et au multi-canal d'autre part. La séparation visuelle du pin noir (teinte allant du vert au jaune) et des peuplements de épicéa et de feuillus à l'est (teintes rosacées pigmentées de bleu-vert) est favorisée par la présence du multi-canal. Au sein des peuplements de pins noirs, on peut également distinguer les stades de croissance prenant des teintes verts foncées pour les juvéniles (Causse de Sauveterre) se déclinant jusqu'au jaune pour les matures (causse de Mende) indiquant une prépondérance de la bande L et de la polarisation croisée HV (canal rouge) dans la sensibilité au stade de croissance.

Les résultats de l'analyse visuelle montrent une faible sensibilité attendue de la bande C au stade de croissance des peuplements forestiers, plus importante lorsqu'il s'agit de la bande L. Cette sensibilité semble modulée par la configuration radar en incidence et polarisation. En effet la nature des variations visuelles varient selon JERS-1 et SIR-C bande L. Ces résultats qualitatifs prometteurs nécessitent néanmoins d'être étayés par une analyse quantitative de la sensibilité à travers l'exploration des liaisons statistiques entre le coefficient de rétrodiffusion et les paramètres forestiers.

4.5.3 Analyse quantitative du coefficient de rétrodiffusion σ^0 en fonction des paramètres forestiers

4.5.3.1 Sensibilité du σ^0 au volume des fûts

Nous avons examiné dans un premier temps la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion aux volumes des fûts, pour les différentes configurations radar aux trois étapes de corrections du relief, afin d'évaluer quantitativement l'apport des corrections radiométriques. Les résultats sont présentés à la Figure 4-13, où le coefficient de rétrodiffusion bande L est donné comme une fonction du volume des troncs de la forme :

$$\sigma^{0} = a \log(\text{paramètre forestier}) + b$$
(4-6)

avec a et b des paramètres de calage estimés par régression.

Le comportement logarithmique se justifie par l'atténuation croissante avec l'âge et par l'expression du coefficient de rétrodiffusion se faisant en dB.

La Figure 4-13a présente la sensibilité pour le signal radar extrait sur les images brutes (β^0). La tendance générale montrent une croissance du signal radar parallèlement au volume des fûts avec une pente légèrement plus forte pour L-HV. Toutefois, les pertubations radiométriques liées à la présence d'un relief marqué pour certaines unités entraînent des corrélations avec de faibles valeurs de coefficient de détermination légèrement supérieures pour JERS-1 et SIR-C L-HV comparé à SIR-C L-HH. On remarque, pour les forts volumes, une très forte amplitude de variation autour de la tendance des données SIR-C concernant les unités présentant de fort θ_{loc} (situées sur des flancs opposées à la visée radar). JERS-1 présente une amplitude de variation moindre pour ces unités due à de plus faibles valeurs d'angle d'incidence local (Figure 4-9).





109

Analyse des grandeurs physiques radar en milieu forestier_

Chapitre 4



Après étalonnage de l'aire du pixel correspondant au premier niveau de correction radiométrique (partie A Figure 4-2), la tendance de la sensibilité du $\sigma^0(\theta_{loc})$ au volume des fûts (Figure 4-13b) est confirmée avec un resserrement des points autour de la tendance d'autant plus marqué pour les unités à faible angle d'incidence local ce qui est net par exemple pour JERS-1 en particulier sur les unités à fort volume. Corrélativement, une légère augmentation du R² est observée, restant limitée à cause de la dispersion persistante des unités à fort volume et fort θ_{loc} . Toutefois, la pente des relations n'a pratiquement pas changée par rapport aux images brutes indiquant la même sensibilité.

Les résultats obtenus avec le coefficient de rétrodiffusion σ^0 entièrement corrigé des effets du relief (deuxième niveau de correction radiométrique *cf* partie A Figure 4-2) montrent une amélioration significative de la sensibilité aux volumes des fûts. Cette amélioration se traduit par une forte augmentation du R² faisant suite au spectaculaire rehaussement du coefficient de rétrodiffusion des unités à fort angle d'incidence local. Les meilleures sensibilités étant obtenues pour la configuration SIR-C L-HV et L-HH.

Néanmoins, nous pouvons constater que malgré la correction angulaire persistent des effets topographiques résiduels en particulier sur les unités de la zone A (Figure 4-13). Ces trois unités de la forêt domaniale de Mende (U61, U63 et U65) présentent les plus fortes valeurs d'angle d'incidence local (Figure 4-9) respectivement de 76, 85 et 81 degrés. Une analyse précise de ces trois unités permet de pointer certains aspects du modèle de correction radiométrique :

- 1. pour les unités situées en condition topographique marquée (fort θ_{loc}), la normalisation par l'aire du pixel a comme attendu un impact limité sur le niveau de correction;
- 2. la correction angulaire permet de rattraper la valeur du signal, mais il est visible que dans le cas des unités de la zone A, un effet angulaire résiduel persiste;
- 3. une corrélation positive entre la valeur de l'angle d'incidence local et l'effet topographique résiduel est observée indiquant une moins bonne correction angulaire pour les forts θ_{loc} .

Si le modèle de correction angulaire (4-4) permet de récupérer le signal dans la majorité des cas, il semble néanmoins sous-corriger les unités situées en conditions topographiques extrêmes (fort angle d'incidence local). Par exemple, sans prise en compte de ces 3 unités dans la régression, le coefficient de détermination R² (L-HV SRL-2) passe de 0,8 à 0,85.

Il conviendra dans une approche de modélisation théorique de valider le modèle semiempirique de correction angulaire et d'en appréhender les limites de validité.

Une synthèse des résultats du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction du volume des fûts (coefficient de détermination \mathbb{R}^2 et dynamique du coefficient de rétrodiffusion pour la forêt) est présentée au Tableau 4-2, et ce pour les différents capteurs, différentes saisons d'acquisition et les 3 niveaux de correction radiométrique.



Figure 4-13 : Comportement du σ^0 en fonction du volume des fûts, pour JERS-1 et SIR-C, et 3 niveaux de correction radiométrique: a) données originales β^0 , b) étalonnées de l'aire σ^0 (θ_{loc}) , et c) entièrement corrigées des effets du relief σ^0 .

Avant toute poursuite de l'analyse, il est à noter que le calcul du \mathbb{R}^2 intègre la réponse du "faible" volume correspondant à la réponse du sol. Cette prise en compte peut être contestée car elle met en œuvre des mécanismes de diffusion différents de ceux d'un couvert forestier. Malgré cela, nous avons estimé qu'il était intéressant de travailler sur l'ensemble de la dynamique du signal afin de quantifier la possibilité de séparer les thèmes forêt-non forêt en fonction de la configuration radar. Il est clair que la non prise en compte de cette signature dans la relation log/log fait systématiquement chuter le \mathbb{R}^2 , celui-ci passe par exemple de 0,8 à 0,62 pour L-HV entièrement corrigé des effets du relief, n'enlevant toutefois en rien l'impact des corrections radiométriques sur la restauration du signal.

Coefficients de d Rétrodi	Dynamique du signal sur la forêt						
Configurations	Trois niveau	Trois niveaux de traitement radiométrique					
RSO	β°	$\sigma^{0}(\theta_{loc})$	σ	$\Delta\sigma^{0}$ (dB)			
ERS-1 C-VV (23°)	0,00	0,002	0,012	1,4			
JERS-1 L-HH (39°)	0,31	0,39	0,58	5,5			
		Vol 1 (Avril 1994))				
SIR-C C-HH (55°)	0,001	0,002	0,14	2,8			
SIR-C C-HV (55°)	0,027	0,03	0,39	3,3			
SIR-C L-HH (55°)	0,15	0,23	0,61	9,2			
SIR-C L-HV (55°)	0,33	0,42	0,70	12,1			
Vol 2 (Octobre 1994)							
SIR-C C-HH (55°)	0,00	0,22	0,32	1,9			
SIR-C C-HV (55°)	0,015	0,031	0,46	4,5			
SIR-C L-HH (55°)	0,07	0,10	0,71	9,7			
SIR-C L-HV (55°)	0,26	0,33	0,80	12,9			

Tableau 4-2 : Synthèse des R² et des dynamiques du signal obtenues pour différentes configurations RSO, de niveau de correction radiométrique et pour différentes dates.

Les résultats obtenus au Tableau 4-2 confirment sans ambiguïté l'apport de la correction radiométrique et valide indirectement le modèle image développé. Les corrections radiométriques s'avèrent donc nécessaire dans l'utilisation des données radar en milieu forestier accidenté. Toutefois, ces considérations générales mises à part, il convient de moduler ces résultats en fonction des configurations radar, du niveau de correction et de la date d'acquisition.

D'une part, nous constatons systématiquement une meilleure sensibilité au volume des fûts de la bande L par rapport à la bande C, et ce pour les fortes incidences de visée, avec une sensibilité et un coefficient de détermination maximal ($R^2 = 0.8$) pour SIR-C L-HV. Un seuil de saturation variable en fonction des configurations radar est également observé, se situant entre 200 et 250 m³/ha pour L-HV (vol 2).

D'autre part, l'apport de la correction radiométrique n'est pas équivalent suivant le niveau de correction en fonction des configurations radar. Ainsi, la correction angulaire dans le cas de milieu forestier a un effet plus important que l'étalonnage des effets d'aire sur la restauration du coefficient de rétrodiffusion. Ceci est d'autant plus vrai que l'incidence est importante car elle limite l'impact de la topographie sur les distorsions purement géométriques d'aires de pixels variables au profit des variations angulaires.

L'analyse du lien entre σ^0 et l'ensemble des paramètres forestiers mesurés sur les unités d'échantillonnage du LCT est présentée au paragraphe suivant.

4.5.3.2 Sensibilité du σ^0 aux autres paramètres forestiers

Les résultats obtenus avec le volume des fûts sont confirmés pour la majorité des paramètres forestiers mesurés. Le Tableau 4-3 synthétise l'ensemble de ces résultats obtenus pour le coefficient de rétrodiffusion entièrement corrigé des effets du relief au travers des coefficients de détermination \mathbb{R}^2 issus des régressions logarithmiques entre (σ^0) et les paramètres forestiers (âge, hauteur....).

Coefficient de détermination R^2 des régressions logarithmiques entre σ^0 et les paramètres forestiers										
	classiques									
Paramètres	ERS-1	JERS-1	SIR-C (Avril 1994)			SIR-C (Octobre 1994)				
forestiers	C-VV	L-HH	L-HV	L-HH	C-HV	C-HH	L-HV	L-HH	C-HV	C-HH
Volume tiges	0,012	0,58	0,7	0,61	0,39	0,14	0,8	0,71	0,46	0,32
Age	0,01	0,58	0,73	0,66	0,35	0,12	0,82	0,75	0,44	0,36
Densité	0,02	0,18	0,2	0,31	0,004	0,003	0,24	0,32	0,39	0,077
Surface terrière	0,00	0,56	0,61	0,63	0,22	0,088	0,75	0,74	0,32	0,28
Hauteur	0,01	0,59	0,73	0,61	0,42	0,12	0,79	0,69	0,41	0,31
Epaisseur couronne	0,01	0,59	0,67	0,63	0,32	0,12	0,81	0,79	0,38	0,31

Tableau 4-3 : Synthèse des R² obtenus entre le coefficient de rétrodiffusion entièrement corrigé des effets du relief (σ^{0}) et les paramètres forestiers mesurés sur les unités élémentaires homogènes (*cf* tableau 3.3 chapitre 3).

Ces bonnes corrélations observées pour la majorité des paramètres s'expliquent par leur fortes corrélations (cf chapitre 3). Toutefois, elles ne nous permettent pas d'interpréter les mécanismes de rétrodiffusion et l'origine de la diffusion du σ^0 en fonction des configurations radar et du milieu forestier.

On retrouve systématiquement de meilleures sensibilités et \mathbb{R}^2 pour la configuration L-HV de SIR-C du vol d'octobre avec des \mathbb{R}^2 sensiblement identiques à ceux obtenus avec le volume des tiges excepté pour la densité qui affiche dans la majorité des cas de faibles \mathbb{R}^2 . La bande L-HV apparaît optimale pour inférer les paramètres forestiers en terrain accidenté, parmi les configurations RSO pouvant être mises en orbite à des fins opérationnelles.

Les résultats obtenus pour le vol d'avril sont moins significatifs. Nous pouvons interpréter ce comportement par les mauvaises conditions climatiques au moment de l'acquisition d'avril (chute de neige) induisant la modification de la constante diélectrique des houppiers (neige humide) et du sol, introduisant une source supplémentaire de perturbations dans la relation du signal avec les paramètres forestiers. Un effet saisonnier est mis en évidence *via* ces résultats, aspect qu'il convient d'intégrer dans une phase d'interprétation et de stratégie d'inversion des données RSO.

Les résultats sont également moins bons pour JERS-1 comparé en particulier à la même configuration SIR-C (L-HH). A première vue, cette différence est à rapprocher de la différence d'incidence entre les deux capteurs. Ces résultats amènent à penser que la sensibilité du signal est meilleure pour les fortes incidences. Notamment, de fortes incidences permettent de minimiser les mécanismes de diffusion de surface (sol) au profit du mécanisme de volume qui affiche un lien physique avec les paramètres du couvert forestier. Ces résultats convergent avec ceux obtenus par (Souyris *et al.* 1995) sur la forêt des landes où des comportements différents sont observés pour deux incidences SIR-C montrant de meilleures sensibilités aux paramètres forestiers pour les plus fortes incidences (40-50°).

Quant aux résultats avec ERS-1, ils restent dans la majorité des cas médiocres, mais il est difficile de généraliser sur la base de ces seuls résultats d'autant que certains auteurs (Tableau 4-4) observent des sensibilités légèrement meilleures avec cette configuration. Toutefois, l'utilisation de l'information de puissance d'ERS-1 reste limitée pour estimer les paramètres forestiers. Un contournement de ces limitations en particulier avec les données interférométriques est espéré. Des résultats sont présentés dans ce sens à l'annexe A.

Outre cette inter-comparaison, entre différentes configurations radar, les résultats obtenus ont été comparés avec divers résultats provenant de différents travaux menés avec différentes configurations radar sur différents types forestiers.

4.5.3.3 Comparaison des résultats obtenus avec ceux issus d'autres travaux

Le Tableau 4-4 récapitule nos résultats et ceux de diverses études menées ces dernières années. Il n'est pas question ici de faire une revue exhaustive, et notre propos se situe essentiellement dans une optique de comparaison de nos résultats avec des résultats menés en majorité en terrain plat sur le volume des tiges ou sur la biomasse totale voire compartimentée (tiges, houppier). Une comparaison plus poussée est conduite entre autres avec les résultats obtenus par (Le Toan *et al.* 1992) sur la forêt des Landes.

Si des variations sont décelables suivant les jeux de données considérés, il ressort en leitmotiv que la bande L est systématiquement meilleure que la bande C pour inférer sur les paramètres forestiers en terrain plat comme accidenté. Ceci est d'autant plus vrai qu'il s'agit de la configuration L-HV aux fortes incidence radar (> 40°). Nos résultats convergent avec les nombreux résultats présentés dans la littérature et confirment la possibilité d'estimer les paramètres forestiers en terrain accidenté après corrections radiométriques adéquates des effets du relief. En effets la chaîne de corrections développée par le LCT permet de retrouver pour les mêmes configurations radar les niveaux des corrélations observés dans la plupart des résultats du Tableau 4-4.

Ainsi, les données RSO offrent de réelles potentialités pour l'estimation quantitative de paramètres de la ressource forestière extrapolée au cas du terrain pentu, ce qui est une étape importante de la généralisation vers des situations plus représentatives.

Nos résultats ont également été comparés avec ceux obtenus en terrain plat sur la forêt des Landes. La comparaison est réalisée pour la même gamme de volume (0-300 m³/ha) de pins noirs en Lozère (terrain plat et accidenté) et de pins maritimes dans les Landes (terrain plat). Les résultats (Figure 4-14) font apparaître une sensibilité similaire du signal au volume des fûts avec une dispersion légèrement supérieure pour les résultats obtenus en terrain accidenté, probablement due aux effets topographiques résiduels (Castel *et al.* 1996).

Auteurs	Capteurs	Config. RSO	Observations	R ²
(Beaudoin et al. 1995)	ERS-1	C-VV	Forêt équienne (Pinus	0,012
	JERS-1	L-HH	nigra) monospécifique	0,58
(Castel et al. 1996)	SIR-C	L-HV	terrain plat et accidenté	0.8 (vol-2); 0,71 (vol-1)
		L-HH	données SIR-C	0,7 (vol-2); 0,61 (vol-1)
		C-HV		0,44 (vol-2); 0,39 (vol-1)
		C-HH		0,32 (vol-2); 0,14 (vol-1)
(Le Toan et al. 1992)	AIRSAR	L-HH	Forêt équienne	0,73
	(aéroporté)	L-HV	monospécifique (Pinus	0,8
			pinaster)	
(Ranson and Sun 1994)	AIRSAR	L-HV	Forêt naturelle mixte	0,63
(Ranson et al. 1995)	SIR-C	L-HV	Biomes de la forêt boréale	0,84 (vol-2); 0,86 (vol-1)
(Kasischke et al. 1991)	AIRSAR	L-HV		0,72
(diamètres < 20 cm)		L-HH	Forêts de Pinus taeda	0,78
		C-HV		0,71
		C-HH		0,8
(Israelsson et al. 1994)	AIRSAR	L-HV		0,78 (<i>p</i>); 0,51 (<i>f</i>)
		L-HH	Forêts de peupliers (p)	0,6 (<i>p</i>): 0,58 (<i>f</i>)
		C-HV	et de frênes (f)	0,6 (<i>p</i>): 0,58 (<i>f</i>)
		C-HH		0,6 (<i>p</i>); 0,58 (<i>f</i>)
(Moghaddam et al. 1994)	AIRSAR	L-HV	Forêt naturelle de l'Orégon	0,67
		L-HH	(Picea sitchensis,	0,7
		C-HV	Pseudotsuga meziensii)	0,65
		C-HH		0,69
(Baker et al. 1994)	AIRSAR	L-HH	Peuplements de pins	0,63
		C-HH	laricio de Corse	0,34
(Harrell et al. 1997)	SIR-C	L-HV	Peuplements de Pinus	0,82 (vol-2); 0,73 (vol-1)
		L-HH	taeda	0,15 (vol-2); 0,42 (vol-1)
		C-HV		0,34 (vol-2); 0,16 (vol-1)
		C-HH		0,13 (vol-2);-0,28 (vol-1)
(Kasischke et al. 1994)	ERS-1	C-VV	Peuplements jeunes et	0,28
			adultes	
(Harrell et al. 1995)	ERS-1	C-VV	Forêt boréale (Picea	0,25
	JERS-1	L-HH	matiana et glauca)	0,66

Tableau 4-4 : Valeurs du coefficient de détermination R² obtenues par ajustement sur différents jeux de données. Lorsque la pente n'est pas indiquée il s'agit de terrain plat. Les ajustements sont du type logarithmique. En gras sont figurés le R² supérieurs à 0,6, alors que nos résultats sont présentés en grisés.

2 dB d'écart sont également observés entre les deux tendances, pouvant être dus à l'incertitude sur la constante d'étalonnage K pour chaque capteur, plus importante en terrain accidenté en particulier pour SIR-C (*cf* Chapitre 2) et/ou à des effets de structure liés aux différences géométriques des deux espèces considérées. Néanmoins, ces résultats sont extrêmement encourageants, car ils démontrent que l'on peut réaliser une estimation pratiquement aussi fiable qu'en terrain plat, si les données sont corrigées de façon adéquate des effets radiométriques dus à la topographie.



Figure 4-14 : Comparaison de la sensibilité du signal radar σ^0 au volume des tiges de peuplements de pins noirs (terrain plat et accidenté) et de peuplements de pins maritimes (terrain plat).

L'ensemble de ces résultats nous amènent à entamer une première phase d'interprétation phénoménologique du lien entre le coefficient de rétrodiffusion et les paramètres forestiers d'une part, et des effets perturbateurs de la topographie d'autre part.

4.5.4 Interprétation phénoménologique du σ⁰

4.5.4.1 Cas du terrain plat

Sur la base de la modélisation théorique qui sera abordée au Chapitre 6, le coefficient de rétrodiffusion radar peut s'exprimer comme l'addition de plusieurs mécanismes élémentaires de diffusion. Concernant le milieu forestier en terrain plat, un exemple simplifié est fournit à la Figure 4-15 avec trois principaux mécanismes de diffusion sur un couvert forestier, ce dernier représenté par la superposition de deux couches (houppier et tronc élagué) positionnées au-dessus d'une surface rugueuse (le sol). On retrouve 1) la diffusion du sol σ^{0}_{s} atténuée aller-retour par le couvert *via* un terme de transmission T2, 2) la diffusion de volume σ^{0}_{v} au sein des couches végétales et 3) la diffusion bistatique tronc-sol σ^{0}_{ts} . Les diffusions du sol et tronc-sol mettent en jeux des mécanismes de diffusion de surface, alors que la diffusion par le couvert est de type volumique, impliquant les diffusions élémentaires des constituants du couvert et l'intégration de ces réponses sur l'épaisseur de la couche.



Figure 4-15 : Principaux mécanismes de rétrodiffusion du signal radar en milieu forestier. 1) diffusion de surface σ^{0_s} (sol), 2) diffusion de volume σ^{0_v} (végétation) et 3) diffusion bistatique tronc-sol $\sigma^{0_{ts}}$.

Le coefficient de rétrodiffusion total peut s'exprimer par un modèle additif simple dérivé des solutions du premier ordre du transfert radiatif et prenant la forme :

$$\sigma_{\text{tot}}^0 = \sigma_v^0 + T^2 \left(\sigma_s^0 + \sigma_{\text{ts}}^0 \right)$$
(4-7)

où T est le terme de transmission du couvert forestier, inversement proportionnel à l'atténuation.

La contribution respective de chacun des termes va dépendre de la configuration RSO (fréquence, polarisation et incidence) et des caractéristiques géométriques (taille des éléments, densité, architecture) et diélectriques (teneur en eau) du milieu. Le terme de sol est croissant avec sa rugosité vis-à-vis de la longueur d'onde, et avec sa teneur en eau. Le terme de diffusion de volume est proportionnel à la densité de diffuseurs, à leur taille relative vis-à-vis de la longueur d'onde et à leur teneur en eau, et est pondéré par leur orientation. Finalement, le tronc-sol dépend de la diffusion des troncs fonction essentiellement du diamètre et de la densité, et de la réflexion spéculaire du sol pondérée par sa rugosité. Les contributions respectives sont également tributaires des propriétés d'atténuation du couvert, cette dernière affectera l'apport de la diffusion du sol et tronc-sol (visibilité plus ou moins grande sous le couvert), et l'épaisseur de la couche végétale contributive à la rétrodiffusion de volume. Cette atténuation est proportionnelle à la densité de diffuseurs, à leur taille vis-à-vis de la longueur d'onde et à leur teneur en eau, le tout pondéré par leur orientation.

Par rapport aux configurations radar, l'utilisation d'une longueur d'onde croissante fait que l'on sera sensible à des éléments végétaux de taille croissante et comparable à la longueur d'onde, et entraîne une plus grande pénétration dans le couvert, donc une contribution croissante du sol et tronc-sol. Quant à la polarisation, elle est à mettre en correspondance avec l'orientation du champ électrique incident relative à celle des diffuseurs, et affecte également la pénétration. En général, la polarisation H est plus pénétrante que la V, ce qui facilite l'apparition des termes de sol et tronc-sol. Par ailleurs, la rétrodiffusion en polarisation HV est causée par la dépolarisation par les diffuseurs, impliquant une orientation désordonnée de ceux-ci. Ainsi, elle ne peut originer que du houppier (éléments dans plusieurs directions) plutôt que des troncs (verticaux) et du sol (horizontal). Finalement, l'incidence est à mettre en relation avec l'orientation des diffuseurs, affectant le niveau de rétrodiffusion de volume; aussi, une incidence croissante augmente le trajet optique de l'onde dans la couche végétale, augmentant l'atténuation, et diminuant la contribution du sol et tronc-sol.

A partir de cette base phénoménologique (connaissance des phénomènes de rétrodiffusion issue de la théorie), nous allons tenter d'interpréter σ^0 en terrain plat en fonction de la configuration radar et des paramètres forestiers étudiés.

4.5.4.2 Interprétation

En bande C (5,6 cm), les principaux diffuseurs sont les aiguilles. De plus, la profondeur de pénétration est limitée à quelques mètres. Du coup, le mécanisme dominant est la rétrodiffusion de volume par la masse foliaire, et les termes de sol et tronc-sol sont négligeables, sauf pour de très jeunes couverts. Considérant l'évolution de la masse foliaire avec l'âge du peuplement, ainsi que l'atténuation rapide du signal avec celui-ci, on comprend aisément qu'il n'y ait pas de corrélation significative avec les paramètres forestiers liés à la masse ligneuse. Ce comportement est en plus à peu près le même pour toutes les polarisations.

Venons-en à la bande L (25 cm) plus intéressante. Dans ce cas-ci, les principaux diffuseurs seront de taille plus conséquente, en l'occurrence les branches d'ordre varié. De plus, la pénétration est plus importante, ainsi, c'est plutôt la masse ligneuse qui est sondée sur une profondeur de quelques mètres. Vu la plus grande pénétration, le comportement en polarisation différera. Ainsi, en HH, les termes tronc-sol et sol peuvent être significatifs, lorsque la transmission du couvert est grande (jeunes peuplements). En VV, ces termes seront moindres vu la plus faible pénétration des ondes polarisées V. Finalement, pour les raisons évoquées ci-dessus, la rétrodiffusion en HV provient de la diffusion de volume des branches dans le houppier.

Tenons compte maintenant pour ces différentes configurations des paramètres forestiers et de leur évolution avec l'âge. Prenons la configuration HH, qui fait intervenir le plus les 3 types de mécanismes. Dans ce cas, le lien avec les paramètres forestiers est plus complexe, car la réponse radar est perturbée par des paramètres du sol, ce qui donne une sensibilité moindre par rapport à la configuration optimale L-HV, celle-ci présentant la meilleure corrélation avec les paramètres forestiers. Dans ce cas, la diffusion de volume par le bio-volume ligneux du houppier est prédominante, car seule source possible de dépolarisation. Les paramètres de ce bio-volume affectant σ^0 sont les dimensions et la densité volumique (à orientation identique). Or, l'accroissement de ces paramètres avec l'âge au-travers de l'augmentation du bio-volume observé explique l'accroissement de σ^0 avec l'âge. Ainsi, la bonne corrélation de σ^0 avec des paramètres classiques comme le volume des tiges indique que ce dernier est forcément corrélé avec le bio-volume des branches du houppier vu par le RSO. Cependant, la perte de sensibilité (saturation) provient de l'atténuation croissante avec l'âge, due à l'accroissement du même bio-volume ligneux. Ainsi, rétrodiffusion et atténuation sont intimement liés.

Ainsi, on a un lien indirect plus ou moins simple entre l'écho radar et les paramètres forestiers classiques. C'est ce qui avait été conclu par Beaudoin (1992), qui n'avait toutefois pas pu décrire cette liaison dans le détail, malgré l'apport de la modélisation théorique, entre autres à cause d'une description géométrique du couvert trop imprécise. Ainsi, il n'avait pas été possible d'évaluer l'apport en diffusion de volume des divers ordres de branche et de leurs propriétés géométriques, et comment celles-ci étaient liées aux paramètres forestiers classiques. Cependant, l'hypothèse du rôle central de la surface terrière dans cette liaison avait été pressentie, et sera explorée lors de l'interprétation plus poussée issue du couplage d'AMAP et du modèle de diffusion théorique du MIT/CESBIO.

4.5.4.3 Cas du terrain accidenté

La présence de topographie va modifier la géométrie de la rétrodiffusion, et donc celle de chaque terme du modèle additif simple (4-7). Ceci est schématisé à la Figure 4-16 pour chaque terme, et illustré uniquement dans le plan d'incidence par souci de clarté.



Figure 4-16 : Modifications des principaux mécanismes de diffusion en milieu forestier induites par la présence de relief.

Tout d'abord certains phénomènes affectent tous les mécanismes. Considérons des propriétés géométrique et diélectrique du milieu forestier uniforme. On peut démontrer qu'en terrain accidenté, la densité de puissance intervenant dans le calcul de σ^0 et arrivant sur le couvert forestier diminue progressivement des flancs exposés à la visée radar (faible θ_{loc}) aux flancs opposés (fort θ_{loc}) selon une loi en cosinus, indépendante de la configuration radar (fréquence et polarisation). D'autre part, on remarque que le trajet optique au sein du couvert augmente avec l'incidence locale, entraînant la variation des propriétés d'atténuation selon la configuration radar utilisée (fréquence, polarisation). Le premier effet affecte tous les mécanismes, alors que le deuxième se traduit par 1) une diminution du terme de sol et d'interaction tronc-sol liée à une plus faible transparence à incidence croissante, et 2) une décroissance de la diffusion de volume liée à la plus forte atténuation.

Ensuite, l'incidence locale va affecter la géométrie d'interaction au niveau de la rétrodiffusion du sol et des réflexions bi-statiques impliquées dans l'interaction tronc-sol. Ainsi, l'écho de sol en lui-même sera maximal à incidence normale (réflexion spéculaire) et décroît ensuite avec l'incidence locale (composante diffuse), alors que l'interaction tronc-sol sera maximale pour le terrain plat où une géométrie de réflexion à 45° maximise les réflexions spéculaires, qui disparaissent d'autant plus que la pente augmente, à cause du changement de la géométrie dans la réflexion du sol.

4.5.4.4 Interprétation

En bande C comme en bande L, l'interprétation menée pour le terrain plat a fait ressortir une prédominance du mécanisme de diffusion de volume pour l'ensemble des configurations radar et de milieu forestier, excepté toutefois pour L-HH sur les jeunes peuplements. Dans ce cas, le comportement angulaire de la diffusion de volume dominante est affecté par les deux premiers phénomènes décrits ci-dessus. Leur combinaison provoque le comportement observé globalement en cosinus, modulé cependant *via* le trajet optique par les propriétés d'atténuation dépendant de la configuration radar. Ce comportement global est modélisé empiriquement par un cosinus à la puissance n. Cette interprétation sera étayée lors de la modélisation théorique.

4.6 Conclusions

L'analyse des résultats montrent, dans un premier temps, que les données intensité (coefficient de rétrodiffusion) doivent être corrigées des effets radiométriques et géométriques du relief, avant toute utilisation forestière quantitative. En effet, l'amplitude des distorsions radiométriques est souvent plus importante que l'amplitude des variations du signal en fonction des paramètres forestiers (biomasse, hauteur...), en particulier pour des configurations topographiques marquées (fort ou faible angle d'incidence local).

A cet effet, une chaîne de post-traitement des effets du relief en milieu forestier a été développée par le LCT et validée entre autres sur le site d'étude, permettant de restaurer le coefficient de rétrodiffusion et de remonter à l'information thématique en particulier grâce à la correction semi-empirique angulaire.

Suite à ces corrections, il est apparu que la meilleure configuration pour l'estimation de paramètres reliés au bio-volume est la configuration L-HV à 55° d'incidence, corroborant les résultats obtenus en terrain plat. Cette configuration permet d'estimer de façon similaire au cas du terrain plat, les paramètres reliés au stade de croissance tels que l'âge et le volume des fûts. Cependant, la liaison avec ces paramètres se fait indirectement par le bio-volume de la branchaison "vue" par le RSO. Il conviendra d'interpréter cette liaison par une voie de modélisation physique décrivant les différents mécanismes de rétrodiffusion mis en jeu, et ce en terrain plat et accidenté.

Le coefficient de rétrodiffusion basse fréquence (bande L) s'avère être une quantité intéressante pour inférer sur certains paramètres de la ressource forestière. Cependant, les limitations concernent 1) la saturation apparaissant à de faibles volumes de tiges pour la bande L (200-250 m³/ha), seuil pouvant être cependant repoussé à l'aide d'une fréquence plus basse (P ou ondes VHF) et 2) la robustesse du lien complexe décrit ci-dessus, considérant les relations souvent méconnues liant le bio-volume de la branchaison aux paramètres forestiers de base, pour différents types forestiers; cependant, pour certains types comme les résineux, on peut s'attendre à des relations "simples" souvent de type linéaire, tel qu'observé par exemple par Beaudoin (1992) sur les Landes.

La suite du travail présenté au Chapitre 5 s'attache à présenter la modélisation architecturale des plantes par AMAP permettant de caractériser adéquatement le milieu forestier pour alimenter les modèles de diffusion électromagnétique.

Références bibliographiques

- Amar, F., Fung, A. K., De Grandi, G., Lavalle, C., and Sieber, A. (1995). "Backscattering from forest canopies over slanted terrain." *Proceedings of IGARSS'93 Symposium*, 576-578.
- Baker, J. R., Mitchell, P. L., Cordey, R. A., Groom, G. B., Settle, J. J., and Stileman, M. R. (1994). "Relationships between physical characteristics and polarimetric radar backscatter for corsican pine stands in Thetford forest, U.K." *International Journal of Remote Sensing*, 15(14), 2827-2849.
- Beaudoin, A. (1992). "Observation de la terre par radar imageur : estimation de la biomasse forestière," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 172p.
- Beaudoin, A., Castel, T., Deshayes, M., Stussi, N., Stach, N., and Le Toan, T. (1995). "Biomass retrieval over hilly terrain from spaceborne SAR data." *CNES/IEEE international* symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications, 131-141.
- Beaudoin, A., Le Toan, T., Goze, S., Nezry, E., Lopes, A., Mougin, E., Hsu, C. C., Han, H. C., Kong, J. A., and Shin, R. T. (1994). "Retrieval of forest biomass from SAR data." International Journal of Remote Sensing, 15(14), 2777-2796.
- Castel, T., Beaudoin, A., Stach, N., Souyris, J. C., and Le Toan, T. (1996). "Sensitivity of polarimetric SIR-C SAR data to forest parameters over hilly terrain : a case study on Austrian pine." *PIERS 1996*, p208.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. S., and Christensen Jr., N. L. (1992). "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 412-415.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., and Pierce, L. E. (1995a). "Land-cover classification and estimation of terrain attributes using Synthetic Aperture Radar." *Remote Sens. Environ.*, 51, 199-214.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Pierce, L. E., Sharik, T. L., Bergen, K., Kellndorfer, M., Kendra, J., R., J., Li, E., Lin, Y. C., Nashashibi, A., Sarabandi, K., and Siqueira, P. (1995b). "Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 877-895.
- Ferrazzoli, P., and Guerriero, L. (1995). "Radar sensitivity to tree geometry and woody volume: a model analysis." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(2), 360-371.
- Foody, G. M., Green, R. M., Lucas, R. M., Curran, P. J., Honzak, M., and Do Amaral, I. (1997). "Observations on the relationship between SIR-C radar backscatter and biomass of regenerating tropical forests." *International Journal of Remote Sensing*, 18(3), 687-694.
- Guindon, B. (1993). "Aspects of digital elevation data requirements for operational geocoding of radarsat imagery." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 19(2), 131-139.
- Guindon, B., and Adair, M. (1992). "Analytic formulation of spaceborne SAR image geocoding and value-added product generation procedures using digital elevation data." Canadian Journal of Remote Sensing, 18(1), 2-12.
- Harrell, P. A., Bourgeau-Chavez, L. L., Kasischke, E. S., French, N. H. F., and Christensen Jr, N. L. (1995). "Sensitivity of ERS-1 and JERS-1 radar data to biomass and stand structure in Alaskan forest." *Remote Sens. Environ*, 54, 247-260.
- Harrell, P. A., Kasischke, E. S., Bourgeau-Chavez, L. L., Haney, E. M., and Jr., N. L. C. (1997). "Evaluation of approaches to estimating aboveground biomass in southern pine forests using SIR-C data." *Remote Sens. Environ.*, 59, 223-233.
- Holecz, F., Meier, E., and Nüesch, D. (1992). "Postprocessing of relief induced radiometric distorted spaceborne SAR imagery." SAR Geocoding : Data and Systems, G. S. (Ed.), ed., 301-351.
- Holecz, F., Wegmüller, U., Rignot, E., and Wang, Y. (1995). "Observed radar backscatter from forested areas with terrain variations." *Proceedings of IGARSS'95 Symposium*, 2189-2191.
- Hussin, Y. A., Reich, R. M., and Hoffer, R. M. (1991). "Estimating slash pine biomass using radar backscatter." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 29(3), 427-431.
- Imhoff, M. L. (1995). "A theoretical analysis of the effect of forest structure on Synthetic Aperture Radar backscatter and the remote sensing of biomass." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(2), 341-352.
- Israelsson, H., Askne, J., and Sylvander, R. (1994). "Potentiel of SAR forest bole volume estimation." International Journal of Remote Sensing, 15(14), 2809-2826.
- Kasischke, E. S., Bourgeau-Chavez, L. L., Christensen, J., N. L., and Dobson, M. C. (1991). "The relationship between aboveground biomass and radar backscatter as observed on airbone SAR imagery." *Proc. 3rd AIRSAR Workshop*, E. in J. J. van Zyl, ed., Jet Propulsion Lab. Pub 91-30, Pasadena CA, USA, 11-21.

Kasischke, E. S., Bourgeau-Chavez, L. L., Christensen, J., N. L., and Haney, E. (1994). "Observations on the sensitivity of ERS-1 SAR image intensity to changes in aboveground biomass in young loblolly pine forests." *International Journal of Remote Sensing*, 15(1), 3-16.

- Kasischke, E. S., Christensen Jr, N. L., and Bourgeau-Chavez, L. L. (1995). "Correlating radar backscatter with components of biomass in loblolly pine forests." *IEEE Trans. Geosci. Remote* Sensing, 33(3), 643-659.
- Laur, H. (1989). "Analyse d'Images radar en télédétection : discriminateurs radiométriques et texturaux," Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 244p.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., and Guyon, D. (1992). "Relating forest biomass to SAR data." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30(2), 403-411.
- Luckman, A. J., and Baker, J. R. (1994). "The effects of topography on radar scattering mechanisms from coniferous forest and upland pasture." *Proceedings of the MAC-Europe final results Workshop*, 179-186.
- Moghaddam, M., Durden, S., and Zebker, H. (1994). "Radar measurement of forested areas during OTTER." Remote Sens. Environ., 47, 154-166.
- Mougin, E., Lopes, A., Karam, M. A., and Fung, A. K. (1993). "Effect of tree structure on X-band microwave signature of conifers." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31(3), 655-667.
- Ranson, K. J., Saatchi, S., and Sun, G. (1995). "Boreal forest ecosystem characterization with SIR-C/X-SAR." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 867-876.
- Ranson, K. J., and Sun, G. (1994). "Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 32(2), 388-396.
- Rauste, Y. (1990). "Incidence-angle dependence in forested and non-forested areas in Seasat SAR data." International Journal of Remote Sensing, 11(7), 1267-1276.
- Rauste, Y., Häme, T., Pulliainen, J., Heiska, K., and Hallikainen, M. (1994). "Radar-based forest biomass estimation." International Journal of Remote Sensing, 15(14), 2797-2808.
- Rignot, E., Way, J. B., Williams, C., Vierek, L., and Yarie, J. (1994). "P-band radar mapping of forest biomass in boreal forests of interior Alaska." *Proceedings of IGARSS'94 Symposium*, 1853-1855.
- Rignot, E. J., Zimmermann, R., and van Zyl, J. J. (1995). "Spaceborne applications of P band imaging radars for measuring forest biomass." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(5), 1162-1169.
- Riom, J., and Le Toan, T. (1981). "Relation entre des types de forêts de pin maritime et la rétrodiffusion radar en bande L en polarisation HH." Signatures spectrales d'objets en télédétection, 455-465.
- Sader, S. A. (1987). "Forest biomass, canopy structure, and species composition relationships with multipolarization L-band synthetic aperture radar data." *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 53(2), 193-202.
- Souyris, J. C., Le Toan, T., Floury, N., Hsu, C. C., and Kong, J. A. (1995). "Inversion of forest biomass using polarimetric data from SIR-C/X-SAR." CNES/IEEE international symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications, 67-78.
- Stussi, N., Beaudoin, A., Castel, T., and Gigord, P. (1995). "Radiometric correction of multiconfiguration spaceborne SAR data over hilly terrain." CNES/IEEE international symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications, 457-467.
- Teillet, P. M., Guindon, B., Meunier, J. F., and Goodenough, D. G. (1985). "Slope-aspect effects in Synthetic Aperture Radar imagery." *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 39-49.
- Ustin, S. L., Martens, S. N., and Vanderbilt, V. C. (1991). "Canopy architecture of a Walnut orchard." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.*, 29(6), 843-851.
- van Zyl, J. J. (1993). "The effect of topography on radar scattering from vegetated areas." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31(1), 153-160.
- van Zyl, J. J., Chapman, B. D., Dubois, P., and Shi, J. (1993). "The effect of topography on SAR calibration." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31(5), 1036-1043.
- Wu, S. T. (1987). "Potential application of multipolarization SAR for pine-plantation biomass estimation." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-25(3), 403-409.

Chapitre 5

Caractérisation Architecturale du milieu forestier

Ce chapitre est le résultat d'une étroite collaboration entre le LCT et le laboratoire de modélisation des plantes AMAP du CIRAD. La contribution des différents protagonistes se résument comme suit :

Protagonistes	Organismes	Contributions
T. Castel	LCT Cemagref-ENGREF	Conception et développement AMAP2SAR
		• Simulation et validation des maquettes de pins noirs
		• Description électromagnétiques du milieu forestier
A. Beaudoin	LCT Cemagref-ENGREF	Gestion et suivi Scientifique
		Conception AMAP2SAR
Y. Caraglio	AMAP CIRAD-AMIS	• Paramétrage du moteur de croissance AMAPsim
		 Simulation et validation des maquettes
J-F Barczi	AMAP CIRAD-AMIS	Développement AMAP2SAR

Chapitre 5

Caractérisation architecturale du milieu forestier

5.1 Besoins en caractérisation fine du couvert forestier	124			
5.1.1 Pour les modèles radar 5.1.2 Pour la dendrométrie 5.1.3 Pour le paysage	$125 \\ 125 \\ 125 \\ 125$			
5.2 Caractérisation dendrométrique	126			
5.2.1 Sans restitution 3D 5.2.2 Avec restitution 3D	$\begin{array}{c} 126 \\ 127 \end{array}$			
5.3 Quelques approches récentes de modélisation	127			
5.3.1 Modélisation par "vectorisation" 5.3.2 Modèles mathématiques appliqués à l'informatique 5.3.3 Limites et besoins	127 128 128			
5.4 Caractérisation architecturale avec AMAP	129			
5.4.1 Approche méthodologique pour la modélisation, la simulation et la visualisation des arbres 5.4.1.1 Analyse architecturale : description morphologique et architecturale des	130			
arbres 5.4.1.2 Modélisation : mesures et analyse des données 5.4.1.3 Simulation : création du fichier paramètre et visualisation des maquettes	$131 \\ 132 \\ 133$			
5.5 Modélisation architecturale du pin noir d'Autriche	137			
 5.5.1 Paramétrisation de l'axe de référence : clés de la simulation architecturale 5.5.2 Simulation d'arbres par le logiciel AMAPsim 5.5.3 Besoins pour la caractérisation "électromagnétique" 5.5.4 Vers l'obtention des paramètres dendrométriques et " électromagnétiques " : le logiciel AMAP2SAR 	$138 \\ 141 \\ 143 \\ 145$			
5.6 Résultats de caractérisation précise du couvert forestier	147			
 5.6.1 Validation des simulations d'arbres générées par AMAPsim 5.6.2 Caractérisation dendrométrique classique et fine 5.6.3 Caractérisation "électromagnétique" pour les modèles radar 5.6.3.1 Evolution des paramètres avec l'âge des peuplements 5.6.3.2 Evolution de la distribution verticale des paramètres 5.6.3.3 La distribution azimutale 	147 150 152 152 154 158			
5.7 Conclusions	159			
Références bibliographiques 16				

Chapitre 5

Caractérisation architecturale du milieu forestier

"Il ne s'agit pas d'imiter la nature mais de travailler comme elle." Pablo Picasso

La description architecturale précise d'un milieu forestier est délicate et laborieuse, et donc généralement déficiente voire absente dans les travaux de télédétection menés actuellement. Une telle description peut trouver également son utilité dans d'autres domaines de recherches (dendrométrie, études paysagères). Cependant, obtenir une description fine et précise d'un couvert végétal s'avère difficile par les voies dendrométriques classiques pour différentes raisons :

- la difficulté de mesure des milieux naturels, tel qu'un milieu forestier, qui présentent souvent des formes complexes et dont les éléments semblent de prime abord occuper l'espace de manière désordonnée, rend l'obtention des principales caractéristiques extrêmement laborieuse lorsqu'elle est possible,
- la caractérisation de la structure du couvert végétal n'a, dans le passé, jamais été la préoccupation majeure des télédétecteurs,
- les mesures n'ont été que très rarement réalisées par les forestiers eux-mêmes.

Néanmoins, et parallèlement au développement de l'informatique, de nouvelles approches de caractérisation et de modélisation des plantes ont pu voir le jour ces dernières années. Ces méthodes, plus souples que les approches classiques, diffèrent entre elles par leur approche du végétal (vectorisation, fractale, L-systèmes, architecture..), et ont en commun de nécessiter d'importants moyens informatiques (temps de calcul, restitution 3D..).

5.1 Besoins en caractérisation fine du couvert forestier

L'obtention d'une caractérisation précise du couvert forestier s'avère intéressante dans différents domaines de recherche et d'application. Parmi ceux-ci, trois nous intéressent plus particulièrement dans ce travail :

- les modèles radar;
- la dendrométrie;
- le paysage.

5.1.1 Pour les modèles radar

Une étape essentielle pour interpréter l'origine du signal dans les images radar passe par l'utilisation de modèles physiques de rétrodiffusion et nécessite une description fine et réaliste de la végétation en terme de distributions de dimensions, d'orientations et de propriétés diélectriques des constituants du végétal. Ces modèles utilisent entre autres une approche discrète où la couche végétale est considérée comme un milieu hétérogène composé d'éléments répartis de manière désordonnée. La couche végétale est alors décrite comme une collection d'éléments diélectriques de forme géométrique simple (cylindres, ellipsoïdes) sur lesquels sont appliquées les lois de l'électromagnétisme.

Ainsi, un modèle théorique radar aussi exact soit-il donnera des résultats aberrants si les paramètres d'entrée décrivant la couche végétale sont aberrants (Mougin 1989).

Pour juger de la validité d'un modèle radar il faut i) d'une part obtenir une description précise et réaliste de la couche végétale, ii) d'autre part, que les valeurs théoriques fournies par le modèle soient en accord avec les valeurs expérimentales observées. Le nombre de paramètres utilisés par les modèles est d'autant plus important que le milieu est complexe. Dans ces conditions, les modèles radar appliqués sur les milieux forestiers complexes par définition nécessitent un nombre important de paramètres d'entrée.

Il apparaît donc indispensable, dans ces conditions, de caractériser au mieux le milieu naturel étudié si l'on désire interpréter de façon correcte l'interaction du signal radar avec le milieu forestier *via* les modèles radar. Cette caractérisation sera présentée plus loin.

5.1.2 Pour la dendrométrie

Si l'obtention d'une caractérisation précise et réaliste du milieu étudié s'avère nécessaire pour les modèles radar, elle ne l'est pas moins pour la dendrométrie. En effet, bien décrire la couche végétale permet de mieux comprendre son comportement pour un site et dans ces conditions environnementales données. Outre la déduction des relations allométriques classiques basées sur des caractéristiques dendrométriques globales du peuplement (âge-hauteur par exemple) qui permettent d'avoir une idée sur les relations entre le milieu et la production, on peut également mettre à jour des relations plus fines. Par exemple des relations entre le fût et le houppier donnent des indications importantes sur le taux d'accroissement de la biomasse ligneuse des fûts et par conséquent sur la biomasse aérienne.

5.1.3 Pour le paysage

La caractérisation architecturale fine du milieu, si elle s'accompagne d'une restitution 3D, apparaît également intéressante pour les applications paysagères liées à la gestion sylvicole des massifs forestiers. Ainsi, l'ONF intègre de plus en plus l'aspect paysager dans sa gestion forestière, particulièrement pour les forêts localisées dans des régions à forte fréquentation touristique (par exemple la forêt domaniale des gorges du Tarn). Ainsi, par une description fine et une restitution réaliste du milieu forestier des scénarios d'impact de gestion forestière (coupes à blanc, dépressage, éclaircies...) peuvent être réalisés pour permettre une gestion sylvicole cohérente intégrée à l'environnement.

La caractérisation du milieu forestier, lorsqu'elle est réalisée, se base généralement sur des approches dendrométriques classiques mettant en jeu des modèles allométriques coûteux en temps de mesures et d'analyses.

5.2 Caractérisation dendrométrique

Il n'est pas question ici de faire une revue exhaustive de l'ensemble des approches de caractérisation et de modélisation que cela regroupe, et mon propos est loin d'épuiser la diversité des méthodes employées. Néanmoins, dans le cas de caractérisations dendrométriques, un distinguo peut être fait entre caractérisation avec ou sans restitution 3D.

5.2.1 Sans restitution 3D

En général, les modèles dendrométriques de caractérisation de milieux forestiers se basent sur des relations allométriques obtenues au niveau de l'arbre ou du peuplement reliant les valeurs moyennes des différents paramètres étudiés. Suivant les objectifs, le niveau de précision de la caractérisation du milieu, et donc du type de paramètres mis en jeu dans les relations, va changer. Ces modèles rendent compte des phénomènes observés à partir d'expérimentations ou de données inventaires et n'intègrent pas explicitement des connaissances sur les processus élémentaires qui génèrent ces relations.

Dans le Tableau 5-1 sont repris quelques modèles dendrométriques de caractérisation de peuplements forestiers de résineux pouvant intéresser les télédétecteurs.

Auteur	Objectif	Essence	Résultats et relations allométriques
			obtenues
(Hepp and Brister	Estimer la biomasse	Pinus taeda	modèle de branches :
1982)	du houppier à partir de		$\ln(twt) = a + b\ln(d) + c\ln(H-h) + k\ln(A)$
	modèles au niveau de		$R^2 = 0.896$
	l'arbre et du		modèle d'arbre :
	peuplement		$\ln(TWT) = a + b\ln(D) + c\ln(C)$
			$R^2 = 0,9385$
			modèle de peuplement :
			$\ln(TYIELD) = a + b S + c A + k \ln B$
(Blake et al. 1991)	Estimer la biomasse	Pinus taeda	$Wi = c(Di)^k$
	foliaire limite en		Wi est la biomasse foliaire moyenne de la
	relation avec le		classe de diamètre Di
	comportement du		
	peuplement en terme		
	d'éclaircie naturelle		
(Jack and Long	Comparaison de la	Pinus taeda	$\mathbf{A} = \mathbf{k} \mathbf{N}^{-1.12}$
1991a; Jack and	structure du couvert		$R^2 = 0,91$
Long 1991b)	du <i>Pinus taeda</i> et du		A = surface foliaire moyenne
	tournesol		part du feuillage dans la biomasse totale du
			houppier en fonction de la hauteur relative
			(distribution verticale)
(Baskerville 1965)	Comparaison de 6	Abies	$\log Y = a + b(\log dbh) Y$ étant le poids
	méthodes d'estimation	Pinus	sec du compartiment considéré
	de la biomasse par	sylvestris	calcul de la biomasse par unité de surface:
	compartiments des		- par sommation de tous les arbres
	conifères		- par l'arbre de hauteur moyenne
			- par l'arbre de diamètre moyen
			- par l'arbre de surface terrière moyenne
			- par l'arbre de volume moyen
			- par classe de diamètres

Tableau 5-1: Quelques types de relations allométriques obtenues sur différents peuplements forestiers et pour divers objectifs.

Nous pouvons constater que les relations obtenues se focalisent sur la caractérisation de la biomasse compartimentée sans résultats sur la géométrie et la structure du houppier. Même si ces approches permettent de caractériser les peuplements forestiers plus finement que les classiques tarifs de cubages, elles n'en restent pas moins insuffisantes dans le cas de la modélisation radar des couverts forestiers.

Basé sur ce type de relations développées dans le cadre d'études forestières et complété par d'autres mesures (angle d'insertion, densité linéaire...), (Kasischke *et al.* 1994), et (Le Toan *et al.* 1992) ont respectivement caractérisé des peuplements de pins (*Pinus taeda* et *Pinus pinaster*) à des fins de modélisation radar sur ces peuplements. Dans tous les cas, le temps de mesures et la quantité de travail sont très importants et nécessitent le déploiement d'une importante main-d'œuvre accompagnée d'importants moyens matériels.

5.2.2 Avec restitution 3D

Certaines approches (Leersnijder 1992; Sun and Ranson 1995), basées également sur des relations allométriques, permettent d'obtenir une restitution 3D simplifiée du milieu forestier. Dans ce cas, le fût est représenté par une succession de cylindres alors que le houppier est assimilé à une forme géométrique simple (ellipsoïde, sphère, cône...). Ce type de caractérisation peut s'avérer intéressant car il permet de gérer la gêne entre arbres et d'obtenir une représentation simplifiée de la structure du peuplement forestier. Cette caractérisation géométrique simplifiée est suffisante pour certain type de modèle tel que le modèle développé par (Wang *et al.* 1993). Néanmoins, l'approximation de la complexité de l'architecture de la plante par une forme simple (i.e. son enveloppe) reste limitante pour le couplage avec d'autres types de modèles radar et pose également la question de la représentativité des plantes par cette approche.

5.3 Quelques approches récentes de modélisation

5.3.1 Modélisation par "vectorisation"

La vectorisation (Landry *et al.* 1996; Landry *et al.* 1995) permet la reconstruction tridimensionnelle d'un arbre "statistiquement" réaliste, à partir d'un sous-échantillonnage des composants d'un arbre représentatif du peuplement. La prise de mesure sur le terrain vise à constituer une base de données, composée d'un sous-ensemble de la géométrie et de l'arrangement des composants primaires de l'arbre. L'approche méthodologique varie en fonction des constituants échantillonnés qui sont divisés en quatre groupes : 1) les paramètres généraux de l'arbre, 2) l'inventaire du tronc et des branches, 3) la mesure de la structure des branches, 4) la description du feuillage.

La stratégie de l'échantillonnage vise alors à sélectionner un arbre représentatif du peuplement sur lequel seront réalisées les mesures "fines" de structure du couvert. La phase de mesure la plus délicate est la caractérisation de la structure de la branche en mesurant son positionnement dans l'espace à l'aide d'un instrument d'arpentage. Quelques branches (6, 7) sont ainsi échantillonnées, et la topologie (diamètre, segment porteur, segments portés, quantité de feuillage) des segments est renseignée à l'aide de la numérotation mise en place pour chaque segment. Une fois la base de données réalisée, on passe à une phase de **reconstruction** algorithmique de l'arbre.

Cette phase consiste à reconstruire des segments de branches par un principe de similarité. En effet, l'algorithme utilise des portions échantillonnées pour reconstituer les branches non échantillonnées par translation, rotation ou troncation. Cette procédure se poursuit jusqu'à ce que toutes les branches non échantillonnées soient générées, débouchant sur la reconstruction 3D de l'arbre.

Cette modélisation donne une représentation 3D extrêmement précise de la géométrie du couvert mais elle ne se base sur aucune analyse biologique de l'arbre. C'est une reconstruction 3D "améliorée" des arbres à partir d'un échantillonnage spécifique et d'un algorithme adéquat de reconstruction. Une variante de cette méthode pour répondre au même objectif a également été mise en œuvre sur des vergers de noyers (Martens *et al.* 1991; Ustin *et al.* 1991). Toutefois, la représentativité des arbres simulés est assujettie au nombre d'échantillons mesurés pour chaque partie de l'arbre. Si les résultats sont très réussis au niveau visuel, il n'est pas question de modifier aisément la topologie de la plante, et encore moins de simuler un quelconque processus dynamique.

En raison de la précision de reconstruction de l'ensemble de l'arbre, cette méthode a été couplée avec un modèle radar théorique cohérent (*full wave* voir Chapitre 6) afin de simuler le coefficient de rétrodiffusion radar sur des peuplements de pins en forêt boréale (Lang *et al.* 1995).

Parallèlement à ces approches basées sur d'intensives mesures de terrain, de nouvelles approches de modélisation de la croissance des végétaux ont vu le jour et se sont fortement développées avec l'avènement d'outils informatiques adaptés.

5.3.2 Modèles mathématiques appliqués à l'informatique

Ces modèles sont basés sur la notion de grammaire générative introduite par Chomsky en 1956 (Fourcaud 1995) qui font appel à la notion de système de production. On peut sur cette base distinguer différentes approches telles que : les méthodes fractales basées sur la théorie de Mandelbrot (Oppenheimer 1986; Prusinkiewicz and Lindenmayer 1990), les méthodes faisant appel à l'analyse combinatoire (Viennot *et al.* 1989) ou encore celles basées sur les systèmes de Lindenmayer ou L-systèmes et prenant en compte la génération parallèle des différents organes (Room *et al.* 1996).

Ces modèles très intéressants d'un point de vue algorithmique et graphique restent dans le domaine de la plante figurative et présentent d'importantes carences quant à la validité botanique des végétaux ainsi obtenus.

5.3.3 Limites et besoins

D'une manière générale, la caractérisation précise d'un couvert forestier est très coûteuse en temps de mesure, d'analyse et en personnel impliquant que cette étape soit généralement très pénalisante dans une approche de modélisation de la réponse radar des couverts forestiers et pour la cartographie forestière. D'autre part, le nombre de paramètres souvent élevé et leur degré de précision nécessaire aux modèles radar ne sont pas toujours clairement définis en fonction des configurations radar (fréquence, polarisation, incidence...) utilisées.

Parmi les paramètres à estimer, ceux concernant la forme (longueur, diamètre, densité...) des composants végétaux ne posent pas *a priori* de problèmes majeurs. Il n'en est pas de même pour les paramètres d'orientation et de répartition dans l'espace des éléments constituants du couvert qui posent un réel problème d'estimation. De plus, la caractérisation des paramètres forestiers se fait en général par l'estimation des statistiques du premier ordre (moyenne, écart type....) alors qu'il conviendrait d'obtenir en plus pour chacun la fonction de densité probabilité (pdf) associée. Or, cette dernière qui demande un d'échantillon élevé est limitante dans les approches classiques et est généralement absente pour la plupart des paramètres.

Ces difficultés peuvent être en partie contournées par les modèles de vectorisation ou mathématiques plus souples que les modèles allométriques car les plantes 3D simulées sont représentées par un fichier regroupant l'ensemble des paramètres. Cependant, la première méthode bute sur un problème de représentativité du peuplement qui nécessite un nombre très élevé de mesures. Elle se heurte aussi à la méthode de reconstruction des plantes qui n'est qu'un assemblage statique et aléatoire des différentes parties de la plante. Quant à la deuxième, elle achoppe sur la validité expérimentale et botanique des plantes ainsi générées car elle ne prend en compte que très sommairement les connaissances de la biologie végétale.

Ces différentes approches complémentaires s'il en est, présentent chacune des lacunes dans leur capacité à caractériser de façon réaliste, efficace et souple un couvert forestier pour la modélisation radar et la cartographie forestière. Les besoins pour la caractérisation du couvert forestier sont donc triples :

- une modélisation basée sur des mesures expérimentales botaniques,
- une modélisation représentative du couvert pour différentes conditions (âge, densité, environnement...),
- une modélisation réaliste, souple, permettant d'intégrer à la fois la visualisation 3D des plantes pour la cartographie forestière, et l'extraction des statistiques (1^{ier} ordre, pdf) des différents paramètres à n'importe quel niveau de la plante servant de paramètres d'entrée aux modèles radar.

Dans ce cadre, nous nous sommes orientés vers l'approche présentée par les modèles botaniques. Cette voie prometteuse pour la modélisation optique et radar (Dauzat 1985; Dauzat 1990; Dauzat 1993a; Dauzat 1993b; Dauzat and Hautecoeur 1991; Dauzat *et al.* 1988; Mougin *et al.* 1992) apparaît également intéressante pour les applications paysagères (Lecoustre *et al.* 1993; Reffye de and Blaise 1993). Ainsi, nous avons utilisé les méthodes stochastiques récentes basées sur la réalité botanique (Reffye de 1979) et développées dans le cadre de l'Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes : AMAP (Jaeger and Reffye de 1992; Reffye de *et al.* 1988) pour modéliser nos peuplements de pins noirs d'Autriche.

5.4 Caractérisation architecturale avec AMAP

Si les bases qualitatives de la modélisation architecturale (Figure 5-1) sont posées depuis les années 70 (Hallé and Oldeman 1970; Hallé *et al.* 1978) la mise en œuvre de cette modélisation d'un point de vue quantitatif n'a réellement débuté qu'avec les travaux de Ph. de Reffye sur le caféier et présenté dans une série d'articles fondateurs (Reffye de 1981a; Reffye de 1981b; Reffye de 1982; Reffye de 1983). Ces derniers ont donné naissance au logiciel AMAP (Blaise 1991) qui intègre les aspects botaniques et la variabilité d'expression des processus de base de la construction des végétaux (allongement, ramification, mortalité....).

C'est dans ce cadre que les méthodes de simulation et de visualisation des arbres utilisées ici ont été développées à l'unité de modélisation des plantes du CIRAD à partir d'études de terrain visant à identifier puis à caractériser les différents paramètres régissant la forme. Le logiciel AMAP*sim* (Barczi *et al.* 1996) utilise l'approche botanique qui dans ce cas est basée sur la notion **d'axe de référence** (Reffye de *et al.* 1991a) et met en jeu des modèles mathématiques performants (automate Markovien, processus de renouvellement) en adéquation avec les phénomènes biologiques observés. C'est cette dernière génération de logiciel qui a été utilisée dans ce travail et dont les concepts seront développés plus en détail par la suite.



Massart

Mangenot

Figure 5-1: Quelques exemples de modèles architecturaux de conifères (Edelin 1977; Hallé and Oldeman 1970).

5.4.1 Approche méthodologique pour la modélisation, la simulation et la visualisation des arbres

Ces méthodes développées dans le cadre de l'AMAP reposent sur les trois grandes étapes décrites ci-dessous (Figure 5-2):



Figure 5-2 : Organigramme général de la démarche de modélisation réalisée dans le cadre de l'AMAP.

5.4.1.1 Analyse architecturale : description morphologique et architecturale des arbres

Cette approche des végétaux, relativement récente (Hallé and Oldeman 1970), permet d'en établir la stratégie de croissance ou **modèle architectural** (Figure 5-1). L'analyse architecturale basée sur l'utilisation de caractères morphologiques fondamentaux (Caraglio and Barthélémy 1996) tend à préciser l'agencement et l'évolution d'une structure végétale au cours du temps. De ces travaux, il s'est dégagé plusieurs concepts importants. L'**unité architecturale** (Barthélémy *et al.* 1989; Edelin 1977) qui correspond à la structure la plus hiérarchisée du développement dans un environnement donné permet de définir plusieurs éléments architecturaux comme le tronc, les branches, et les rameaux. Puis, au bout d'un certain temps, la plante commence à dupliquer totalement ou en partie cette architecture élémentaire, c'est **le phénomène de réitération** (Hallé *et al.* 1978; Oldeman 1974). On peut dans ce cas distinguer les réitérations d'origine traumatique ou adaptative qui peuvent être complètes ou partielles (Barthélémy *et al.* 1991). L'étude de la dynamique de croissance complétée par l'utilisation de ces concepts va permettre de schématiser le développement moyen de l'espèce. Le développement architectural d'un arbre peut aussi être vu comme le déroulement d'une séquence précise et ordonnée d'événements, faisant appel à la répétition et à l'intégration de divers "niveaux d'organisation" comme le nœud et l'entre-nœud, l'unité de croissance (UC), l'axe feuillé, l'unité architecturale.... (Barthélémy 1991). L'étude de la répétition et de l'expression de ces niveaux d'organisation dans l'architecture d'une plante et au cours du temps révèle l'existence d'expressions différentes selon le lieu dans l'architecture de la plante ou selon le moment dans la séquence de développement. Ces gradients morphogénétiques traduisent l'évolution de l'expression du fonctionnement méristèmatique, ils caractérisent en quelque sorte **l'âge physiologique** des méristèmes qui édifient chacune des tiges de la plante. L'analyse architecturale des arbres permet ainsi d'établir une véritable cartographie des types de pousses à l'intérieur de la structure végétale.

Au-delà de ses applications directes dans le diagnostic de l'état et du stade de développement d'un arbre (Barthélémy *et al.* 1996), cette approche prépare le protocole d'échantillonnage de l'analyse quantitative et fournit les connaissances qualitatives indispensables à toute tentative de modélisation du fonctionnement des méristèmes.

5.4.1.2 Modélisation : mesures et analyse des données

Pour simuler la croissance et le développement des arbres, mais aussi pour comprendre plus finement l'expression des différents événements qui surviennent lors du développement de la plante, il a été nécessaire, outre l'étape architecturale purement descriptive, d'entreprendre une démarche de quantification (Godin et al. 1996). Pour garder l'information du lieu de la mesure dans l'architecture de la plante et la mesure elle-même, il a fallu utiliser un codage (Godin et al. 1997; Rey et al. 1996) basé sur une représentation formelle de la plante (graphe). Ce graphe permet via un langage approprié de sélectionner des sous-parties, des collections de données (Godin et al. 1996) qui sont alors analysées. Il est alors possible de regrouper les données acquises et de prendre en compte la variabilité d'expression d'un phénomène en un point précis de l'architecture végétale. Les mesures effectuées ont pour but de rendre compte du fonctionnement des méristèmes de l'espèce, c'est-à-dire modéliser en premier lieu la croissance, l'arrêt et la ramification. Pour cela, les distributions obtenues (nombre de feuilles produites, longueur de la pousse annuelle, diamètre, ...) sont modélisées (ajustées) par des lois de probabilités élémentaires (Reffye de et al. 1993; Reffye de et al. 1991b) du type Poisson, binomiale, binomiale négative.... Récemment, (Guédon and Costes 1996) ont montré que la dynamique de croissance déterminée par le décompte des entre-nœuds (nombre d'événements) mis en place pendant un intervalle de temps peut être modéliser par un processus de renouvellement. L'intérêt de la théorie du renouvellement est qu'elle permet de modéliser finement la dynamique de croissance de l'axe végétatif, permettant entre autre de faire des hypothèses sur les parts endogènes et exogènes dans le processus de croissance.

Des modèles plus complexes comme, par exemple, les modèles Markoviens (Guédon 1996; Reffye de *et al.* 1993) rendent compte de la distribution des rameaux le long d'une tige ou plus généralement celle des productions latérales (pièces foliaires, rameaux végétatifs, fleurs, systèmes ramifiés) d'un axe. Dans la majorité des cas, l'obtention de lois géométriques de distributions des états permet la modélisation par une chaîne de Markov de premier ordre à deux états (Figure 5-3). Néanmoins, dans certain cas une chaîne de deuxième ordre peut s'avérer nécessaire.



Figure 5-3: Chaîne de Markov de premier ordre à deux états. *P*_{ij} est la probabilité de passage de l'état i à l'état j et *Q* est le pourcentage de nœuds branchés.

Tant que les valeurs P_{11} et P_{22} sont stables, on parle de processus homogène. Dans le cas de l'évolution de ces valeurs le long de l'axe végétatif, on emploie alors le terme de processus non homogène. La ramification n'est pas simplement dépendante de ces probabilités mais également des états des nœuds précédents. On parlera alors de processus de premier ordre si la ramification dépend de l'état du nœud le précédent, de deuxième ordre si elle dépend de l'avant dernier. Une même valeur de Q peut correspondre à une répartition très différente (diffuse ou agrégée) de la branchaison le long de l'axe végétatif (Barczi *et al.* 1996).

Tous les modèles utilisés sont des modèles probabilistes permettant de traduire la variabilité d'expression des phénomènes mesurés.

L'ensemble des mesures analysées permet alors d'élaborer un modèle de croissance dont les paramètres correspondent à une situation donnée (plantes et environnement), c'est-à-dire celle où les mesures ont été effectuées, permettant de caler le moteur de croissance base de la simulation informatique. Pour d'autres situations, il faudra effectuer d'autres prises de données pour localiser et évaluer les éventuelles différences de comportement. L'expérience a toutefois montré que le modèle de croissance établi, pour une espèce, dans un type de milieu, reste valable dans un autre site, seuls les paramètres du modèle changent (Reffye de *et al.* 1991b).

5.4.1.3 Simulation : création du fichier paramètre et visualisation des maquettes

La plante est vue comme le résultat d'une évolution graduelle des paramètres associés aux processus de croissance et de ramification. Cette conception, qui considère la croissance de la plante comme une succession d'étapes est à l'origine de la notion d' "*axe de référence*" (Reffye de *et al.* 1991a) très similaire à la notion d'âge physiologique développée en botanique, et est utilisée comme base de réalisation du logiciel de simulation de l'architecture des plantes : AMAPsim (Barczi *et al.* 1996). Grâce à la technique de l'axe de référence, le logiciel de simulation permet de gérer simultanément les deux âges, chronologique et physiologique (ou âge réel), qui cohabitent au sein d'une même plante au cours de son développement. Il intègre premièrement les données du processus de croissance des U.C. (l'activité des méristèmes est simulée par la méthode de Monte Carlo (Reffye de 1981a)) puis les données géométriques (angles, longueurs) de façon à créer des maquettes tridimensionnelles réalistes. L'axe de référence est simulé par « un automate fini gauche/droite » dans lequel chaque état est caractérisé par trois types de paramètres : topologiques (croissance, mort et ramification), géométriques (longueur et angle) et de transition (caractérisent les sauts d'un état à un autre) (Blaise *et al.* 1997). La structure de l'automate est représenté par la Figure 5-4.



Figure 5-4 : L'axe de référence : un automate fini où les q_n représentent les différents états de l'axe pour une espèce donnée.

Cette représentation a également l'avantage de bien rendre compte des phénomènes de réitération (fourches des troncs où le bourgeon né physiologiquement jeune, équivalent d'une boucle sur l'axe).

Quant aux calculs de la géométrie, cela revient à prendre en compte :

- l'angle **phyllotaxique**, c'est-à-dire l'angle de rotation entre les insertions successives des axes portés sur l'axe porteur,
- l'angle d'insertion ou angle relatif entre les axes portés et porteurs qui permet de simuler les axes plagiotropes ou orthotropes,
- la flexion ou courbure des axes sous l'effet de la pesanteur.

Pour illustrer notre propos, prenons les axes i, j et k (Figure 5-5), la phyllotaxie de l'axe k et j portés respectivement par les axes j et i se fait par rotation d'un angle ϕ_k et ϕ_j autour de l'axe j et i déterminés par l'analyse architecturale préliminaire. Quant à l'angle d'insertion α il est également donné α priori à l'issue de l'analyse architecturale de terrain.



Figure 5-5 : Visualisation des angles phyllotaxique (ϕ) et d'insertion (α) pris en compte dans la simulation.

La Figure 5-5 idéalise les axes j et k supposés sans flexion sous l'effet de la pesanteur ce qui dans la réalité n'est pas le cas, et il convient de prendre en compte cet aspect pour compléter le tableau des effets géométriques.

La simulation de la courbure des branches est réalisée à partir des équations de la résistance des matériaux faisant intervenir le module de Young et adaptées par (Reffye de 1976) chez le caféier. Dans ce cas, le comportement mécanique de la branche est approximé par une poutre encastrée dans un support rigide. Le problème revient alors à appliquer une force F (kg) concentrée en un point de la branche entraînant pour chaque portion d'axe i de longueur l une flexion d'un angle $d\theta_i$.

$$d\theta_{i} = \sqrt{\frac{2F}{E\frac{\pi R^{4}}{4}}} \times \sqrt{\cos(\theta_{i} - \theta_{0}) - \cos(\theta_{e} + \theta_{0})}$$
(5-1)

avec R le rayon de la section de tige (cm), E le module de Young (kg/cm²), θ_0 l'angle d'insertion, et θ_e l'angle de flèche.

Il apparaît que le fléchissement est inversement proportionnel au module de Young et à la quatrième puissance de son rayon. Plus E est grand, plus la tige est résistante à la flexion. La prise en compte de la conicité se fait par la variation de R le long de la tige, alors que pour les tiges cylindriques celui-ci reste constant.

Quand la force n'est pas appliquée à l'extrémité de la branche, un angle de reprise (θ_r) est introduit après le point d'application de la force pour tenir compte du géotropisme ou redressement des axes observés (Figure 5-6), par exemple sur les plantes se développant selon le modèle de Rauh.



Figure 5-6 : Géométrie de la simulation de la flexion des branches par la méthode de résistance des matériaux pour différents points d'application de la force de pesanteur a) extrémité b) sur l'axe afin de simuler le géotropisme d'après (Blaise 1991).

Les maquettes obtenues (Figure 5-7) permettent de visualiser la variabilité de l'architecture pour un âge donné ou bien l'évolution architecturale au cours du temps pour un individu donné.



Figure 5-7 : Exemple de maquette obtenue pour le pin noir d'Autriche de 10 ans. La maquette a été obtenue après paramétrage du moteur de croissance à partir de nos mesures réalisées sur les forêts de pins noirs en Lozère (*cf.* Chapitre 3).

A partir des maquettes, il y a deux voies pour récupérer les informations quantitatives caractérisant l'arbre simulé :

- 1. L'utilisation de la géométrie analytique, qui avec l'aide d'outils classiques peut nous donner entière satisfaction. Dans un but d'estimation de volume, surface, distribution angulaire....etc, le coût en temps calcul et la complexité restent acceptables. Par contre, lors de la gestion de la croissance en parallèle de plusieurs arbres, cette approche est limitante en raison du nombre important d'éléments à traiter;
- 2. La discrétisation de l'espace en cubes élémentaires ou voxels de dimensions réglables (Blaise 1991; Blaise 1992). Il est alors possible de localiser chacune des parties de la plante virtuelle et d'en donner des caractéristiques quantitatives pour estimer les volumes, densité...etc. Cette méthode est particulièrement adaptée pour gérer la gêne entre arbres ou la gêne due à son environnement (obstacle, ombrage) lors de sa croissance.

Au travers de cette présentation, la modélisation architecturale développée dans le cadre de l'AMAP montre la précision avec laquelle est restituée la géométrie du couvert selon les concepts architecturaux. Cette approche intègre différentes parties se retrouvant dans différentes approches de modélisation décrites précédemment.

La compétition entre les arbres au sein du même peuplement est prise en compte implicitement au travers des mesures de terrain et dépend directement de l'échantillonnage effectué pour chaque type de peuplement. La dynamique est abordée en interpolant entre les différentes classes d'âge échantillonnées. Des résultats précédents ont montré la fiabilité de la méthode (Reffye de *et al.* 1991a).

Le concept d'axe de référence, introduit dans cette partie, est le coeur du moteur de croissance AMAPsim. En effet, la qualité de la simulation est entièrement dépendante du soin apporté au paramétrage de l'axe et donc de la qualité des mesures de terrain et de l'analyse qui en découle. Il apparaît nettement une relation de causalité entre données de terrain et simulation, relation absente pour certains modèles. Cette relation qui est ensuite intégrée dans un cadre formel par une mathématisation des comportements observés permet de remonter vers une modélisation générique, et fait de l'AMAP une **approche puissante** de modélisation de la croissance et de l'architecture des plantes. Cette approche permet, entre autre, de bien rendre compte des phénomènes de réitération et d'élagage naturel observés chez les végétaux.

Ainsi, en dehors des caractéristiques directement appréhendables par la mesure (hauteur, diamètre, volume du tronc), il est possible d'accéder à tout un ensemble de paramètres difficilement accessibles sur le terrain et longs à mesurer. L'approche de modélisation développée dans le cadre de l'AMAP répond pleinement aux besoins formulés au paragraphe 5.3.3. Cette modélisation a donc été mise en œuvre sur les peuplements de pins noirs de notre site d'étude.

5.5 Modélisation architecturale du pin noir d'Autriche

Dans le cas du pin noir, (*Pinus nigra nigricans*, Pinaceae), à partir d'observations dans divers sites de France (Isère, Lozère), nous avons pu identifier les principales caractéristiques morphologiques de l'unité architecturale et les premiers stades de développement architecturaux (*cf.* Chapitre 3). Cette espèce apparaît architecturalement très homogène se développant selon le modèle de Rauh (Figure 5-1) avec possibilité de se réitérer (sans ou après traumatisme). Le modèle de Rauh se définit de la façon suivante : « Le tronc est un monopode dont la croissance rythmique confère aux branches une disposition verticillée ou sub-verticillée. Les branches sont orthotropes, donc morphologiquement identiques au tronc. Chaque branche est un monopode dont la croissance rythmique confère aux branches latérales qu'elle porte une disposition verticillée ou sub-verticillée. La floraison est toujours latérale, sur les branches ou sur le tronc, et n'a donc pas d'influence sur la croissance de l'appareil végétatif aérien. » (Edelin 1977).

Les mesures effectuées sur des pins noirs de 2, 9, 20 et 40 ans, situés sur le Causse de Mende, ont donné lieu à des analyses montrant la très forte organisation qu'il existe chez cette espèce et l'évolution rapide des phénomènes de croissance et de ramification. Ces mesures réalisées selon un codage de type graphe (Godin *et al.* 1997) et après une phase importante d'analyse ont également permis de quantifier et de synthétiser la stratégie de comportement du pin noir sur notre site d'étude. Basé sur cette analyse, les différents états de l'axe de référence (base du moteur de croissance d'AMAP*sim*) pour le pin noir ont pu être renseignés.

5.5.1 Paramétrisation de l'axe de référence : clés de la simulation architecturale

Sur la base des mesures présentées au Chapitre 3 et après une phase intensive d'analyse, la paramétrisation de l'axe de référence a été réalisée afin de permettre la simulation 3D de pin noir par le logiciel¹ AMAPsim. Cela consiste d'une part à introduire les caractéristiques géométriques, et d'autre part à caler les lois de probabilité du comportement stochastique des méristèmes s'exprimant au travers des mesures de terrain. Grâce au codage spécifique, l'analyse des résultats permet de caler les différentes lois de comportement en utilisant les mêmes unités de croissance en tenant compte des gradients morphogénétiques qui apparaissent au sein de l'arbre.



Figure 5-8 : Exemple de distribution de la longueur des UC des troncs (arbres de 10 ans) pour l'année 1989, ajustée par une loi binomiale négative.

¹ Le terme logiciel n'est pas pris dans son acception originale, mais dans le sens de moteur de croissance.
Dans un premier temps, le comportement en croissance (longueur, diamètre) des différentes unités échantillonnées pour différents verticilles permet d'identifier les paramètres caractérisant les lois de probabilité. La Figure 5-8 illustre la variation de la longueur des UC du tronc d'arbres de 10 ans pour l'année 1989.

Ce type de fonction de distribution est ajusté sur l'ensemble des UC du tronc et des branches échantillonnées et, permet de caractériser et de quantifier la stratégie de l'arbre en tenant en compte des gradients morphogénétiques en liaison avec la position dans la plante et l'âge physiologique des méristèmes.



Figure 5-9 : Distribution de la longueur des UC du tronc pour l'année 1993 (arbres de 10 ans) ajustée par une loi binomiale négative.

Le même type de fonction permet en général d'ajuster les distributions pour différentes UC, néanmoins leurs caractéristiques peuvent varier fortement (Figure 5-9). Dans tous les cas, l'ajustement est testé par un test du X^2 au risque α de 5% et indiquant le rejet ou l'acceptation de l'hypothèse H₀ de conformité entre effectifs observés et théoriques. L'analyse montre que ces lois de distributions pour les UC du tronc des années 1989 à 1993 sont sensiblement les mêmes aux paramètres de moyenne, variance et probabilités p près (Tableau 5-2).

		Observations		Fonctions de	distribution
Année	probabilité	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
UC93	0,43	19,2	33,1	19,17	32,5
UC92	0,24	13,5	39,7	13,4	38,7
UC91	0,37	7,6	15,2	7,6	14,8
UC90	0,33	7,3	16,1	7,3	15,6
UC89	0,26	7,2	20,4	7,2	19,7

Tableau 5-2 : Caractéristiques des fonctions de distribution ajustées aux observations réalisées dans le cadre de campagnes de terrain décrites au Chapitre 3 (§3.3.2.1).

Ces données montrent également une évolution des paramètres des lois de distribution avec l'âge des UC laissant apparaître un gradient croissant des UC les plus vieilles vers les plus jeunes. Ce phénomène est bien marqué sur la Figure 5-10.



Figure 5-10 : Evolution des fonctions de distribution en fonction de la position de l'UC dans le tronc.

Cette évolution traduit un effet de "*base*" lié à une plus forte croissance des UC jeunes du tronc comparée aux UC plus vieilles. Cela se traduit par un décalage du mode de la fonction vers la droite et par un changement de forme qui passe d'une allure rétrécie et fortement dissymétrique (UC89-90-91) à une forme aplatie, plus large où la dissymétrie est moins marquée (UC92-93). Ces phénomènes se retrouvent également en partie sur les branches, un exemple est donné à la Figure 5-11 pour les peuplements de 20 ans.



Figure 5-11 : Représentation schématique de l'évolution de la longueur des UC le long de branches primaires pour les arbres de 20 ans.

La Figure 5-11 permet d'observer un double effet :

- d'une part, une évolution similaire à celle observée pour les UC du tronc en fonction de la position sur le tronc, avec des longueurs d'UC supérieures pour la branche portée par l'UC86 du tronc comparée à celle portée par l'UC82 ;
- d'autre part, un phénomène combinant un effet de base pour les premières UC de la branche avec des longueurs d'UC augmentant avec l'âge auquel succède une décroissance de la longueur moyenne corrélativement à l'âge réel de l'UC. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un effet appelé "dérive" (Barthélémy et al ., 1996) lié au vieillissement physiologique des UC.

Cette opération est répétée pour toutes les UC des verticilles échantillonnées. Des distributions unimodales sont observées dans la majorité des cas liées à la croissance de type monocyclique de cette espèce avec essentiellement de la préformation. Dans le cas où de la néoformation est présente, on observe des distributions bimodales.

La branchaison se modélise au travers de chaînes de Markov, et dans ce cas il convient également de quantifier les probabilités respectives de ramification ou non.

Le paramétrage de l'axe de référence est réalisé à partir de ces résultats et de l'analyse architecturale préalable *via* le logiciel AMAP*mod* capable d'interpréter le codage mis en œuvre lors des mesures terrain. Un résumé des fichiers paramètres et l'organisation schématique de l'axe de référence est ainsi obtenu pour le pin noir. Sur cette base, les simulations de pins noirs ont pu être réalisées.

5.5.2 Simulation d'arbres par le logiciel AMAPsim

Outre le fait qu'il intègre la notion d'axe de référence, le logiciel AMAPsim gère les événements de croissance en parallèle. Cette gestion est basée sur un échéancier qui permet de gérer le temps discrétisé (Blaise and Reffye de 1994). Le principe général consiste à discrétiser le temps et à définir pour chaque date une liste d'événements à traiter (croissance des bourgeons terminaux et axillaires, mise en place des feuilles...). A chaque date un événement est traité, entraînant la création éventuelle d'une nouvelle entité (feuille, UC...) qui va venir s'insérer dans la structure topologique de l'arbre.

Les paramètres d'entrée du logiciel (Figure 5-12) se résument à l'âge et à une graine aléatoire. L'âge correspond à l'âge final de l'arbre à simuler tandis que la graine aléatoire est un chiffre compris entre 0 et 65000 lié à la nature stochastique du modèle. En théorie, pour un âge donné, 65000 arbres différents peuvent être simulés. A ces deux paramètres de bases s'ajoutent différentes options :

- d'une part, quatre niveaux de simplification de l'arbre simulé peuvent être obtenus, en jouant sur le nombre de cylindres et de polygones intervenant dans sa caractérisation géométrique ;
- d'autre part, on peut intégrer l'aspect dynamique des simulations en réalisant des sorties du même arbre à différents âges ;
- enfin, il est possible de simuler avec ou sans les aiguilles (ou feuilles).

L'ensemble de ces opérations se fait par l'intermédiaire du module de saisie pour la simulation intégrée dans l'interface *AMAP2SAR* développée dans le cadre de ce travail en collaboration avec le laboratoire de modélisation des plantes du CIRAD (Barczi *et al.* 1997) et décrit plus loin.

Deole	Pinus nigra nigrica (max	x 40)	Specie P	linus nigra nigrica	(without leaves) (max	40)
ge j	s		Age	5		
utput step	q		Quiput step	đ		
rom seed	To seed		From seed	দু স	oseed j	
한 가슴 가슴을 이번 가슴을 다.	Computer Cince			Constant	-	
		17-		compou		

Figure 5-12 : Interface AMAP2SAR, module de saisie des paramètres pour la simulation d'arbres a) avec aiguilles, b) sans aiguilles.

Le résultat de la simulation se présente sous la forme d'un fichier appelé « lignes élastiques » qui contient sous un format vectorisé (propriété du laboratoire du CIRAD) l'ensemble des informations relatives à l'arbre (nombre de cylindres, de polygones, leurs positions x y z, leur dimensions...). Ce format étant protégé, seul le module LandMaker d'AMAP développé par le CIRAD est capable de les lire pour visualiser les arbres mais il n'est pas possible d'en récupérer directement les informations. Le résultat de simulation est un arbre tridimensionnel d'une ressemblance étonnante avec un arbre réel (Figure 5-13).



Figure 5-13 : Exemple d'arbres tridimensionnels simulés, ici trois pins noirs d'Autriche de 20, 30 et 40 ans.

Le moteur de croissance ne permet pas actuellement de simuler des individus de pin noir de plus de 45 ans car il convient pour cela de réaliser des mesures expérimentales sur des arbres plus âgés. Les simulations (Figure 5-13) obtenues montrent l'évolution de la structure avec l'âge ainsi que la prise en compte de l'élagage naturel par la simulation. La visualisation de la fin d'activité des méristèmes pour les branches basses du houppier est également très nette sur les arbres de 30 et 40 ans.

La prise en compte de la variabilité au sein d'un même peuplement se fait quant à elle en réalisant des simulations au même âge pour différentes graines aléatoires. Un exemple est donné à la Figure 5-14 où 5 arbres de 30 ans ont été simulés avec 5 numéros différents de graine aléatoire. On peut distinguer entre autres la variabilité au niveau du houppier.



Figure 5-14 : 5 simulations de pins noirs de 30 ans avec des numéros de graines aléatoires variables.

La nature stochastique de la simulation nous permet donc d'appréhender la variabilité naturelle des peuplements forestiers étudiés et ainsi de retranscrire et extrapoler la variabilité observée au travers des mesures de terrain. A partir de là, s'entrevoit la possibilité de simuler des peuplements de pins noirs pour différentes conditions d'âge, de densité, et ainsi de remonter à l'information quantitative contenue dans les fichiers simulations (ou ligne élastique). Néanmoins pour y accéder, il convient de transformer ces fichiers ligne élastique en un format lisible et d'en extraire l'information afin d'obtenir une caractérisation fine et souple de nos peuplements forestiers de pins noirs d'Autriche.

5.5.3 Besoins pour la caractérisation "électromagnétique"

Les modèles radar utilisent diverses représentations du milieu forestier, dont la plus usuelle est celle d'un milieu multi-couches représentant les strates végétales, chaque couche contenant des éléments discrets représentant les organes végétaux. Dans le cas de résineux, chaque couche contient une collection de cylindres diélectriques regroupés en classes, chaque classe représentant les divers organes végétaux à savoir : aiguilles, branches de divers ordres et tronc. On utilise en général un milieu bi-couche avec une couche pour le houppier et une couche pour les parties élagués du tronc. On peut ensuite décomposer ce houppier en plusieurs couches pour prendre en compte l'hétérogénéité verticale. La Figure 5-15 représente cette caractérisation qui sera utilisée par la suite et décrite en détail (caractéristiques, justification d'une telle représentation, spécificités par rapport à d'autres.....) au Chapitre 6.



Figure 5-15 : Description globale d'un arbre pouvant alimenter un modèle électromagnétique comme celui du MIT/CESBIO, sous la forme d'une collection de cylindres diélectrique appelée "agrégats multi-échelle de diffuseurs" (détails voir Chapitre 6). Les cylindres diélectriques, au cœur de cette représentation, sont caractérisés par deux catégories de paramètres : géométriques et diélectriques, que nous regrouperons sous l'appellation de paramètres "électromagnétiques"; bien que parmi ceux-ci on retrouve beaucoup de paramètres dendrométriques classiques. Par exemple, pour les cylindres représentant le tronc, nous les dénommerons comme étant électromagnétiques, afin de bien distinguer les paramètres forestiers utilisés pour la modélisation théorique de ceux que l'on cherche à estimer par télédétection à des fins d'application.

La Figure 5-16 présente les paramètres géométriques utilisés pour caractériser les cylindres : rayon, longueur, densité et angle d'insertion par rapport à l'élément végétal porteur (par exemple, branches primaires par rapport au tronc).



Figure 5-16 : Paramètres géométriques liés aux cylindres diélectriques : exemple sur les branches d'ordre 1.

On comprend aisément que la plupart de ces paramètres sont dendrométriques comme ceux présentés aux figures précédentes, alors que certains d'entre eux sont spécifiques à la modélisation radar : angle d'insertion et densité linéaire, en plus d'un indice de courbure des branches décrit plus loin.

5.5.4 Vers l'obtention des paramètres dendrométriques et " électromagnétiques " : le logiciel AMAP2SAR

L'obtention de ces paramètres passe par le développement d'algorithmes permettant d'une part d'extraire l'information pertinente et d'autre part de la transformer en un format lisible par des logiciels classiques de traitement de données. Ceci nous a donc amené à développer et à implémenter une interface au nom de *AMAP2SAR* (Barczi *et al.* 1997; Castel *et al.* 1997). La méthode de caractérisation implémentée dans l'interface pour caractériser le milieu est basée sur 3 étapes :

- la simulation de différents arbres tridimensionnels avec le moteur de croissance AMAPsim,
- la transformation de ces arbres 3D en une collection de cylindres représentant les différents éléments de l'arbre : tronc, branches et aiguilles avec leur caractéristiques géométriques : position dans l'espace (x, y, z), diamètre, longueur et angle d'orientation. Par exemple, une branche est considérée comme une succession de cylindres de dimensions et d'orientations variables pour tenir compte de la conicité et de sa courbure;
- enfin, la dernière étape inclue l'adaptation de cette description avec celle utilisée par les modèles théoriques et en particulier les modèles de transfert radiatif. Ces modèles utilisent une description du couvert comme un milieu aléatoire discret multi-couches composées chacune de plusieurs catégories de cylindres diélectriques.

De plus, un filtre (Figure 5-17) permet de découper le couvert en strates horizontales en utilisant soit un intervalle de valeurs d'un des paramètres fixés *a priori*, soit un critère spécifique (zone branchée, non branchée, angle d'insertion ou diamètre des branches primaires).

*ile : 🕴 Inom	hame the rry houlds transfer and the phone spinoir with 2009 020 str				- Custoni	CAPILIC & L
	Activ	Min	Max		Branched Inne area	
Order	X	ĨI.	þ		Non branched trunc area	
Pos tion	i 7	jo .]10	Load	insertion angle	
Height	· 17	0.0000000.0	\$.010000e+00			
Length	•	9.999964e-03	5.000000e+00	Save		
Diameter	7	2.309405e-02	7.200000e-01	AppN	Resulting min height	Arsuting max height
Direction	iV	-7.098952e+01	P.000000#+01	12220	Parameter	Protection of the
Azimut	R	1.991453a+00	0.6974430+02	Customize height	Contraction of the second s	Cancel
Death	₩.)p	h			
Symbol number	Ø	Ħ	þ			

Figure 5-17 : Filtre d'extraction basé sur 9 critères et implémenté dans l'interface AMAP2SAR avec le module spécifique basé sur 4 critères.

Dans l'exemple de la Figure 5-17 il s'agit d'un arbre de 20 ans de 6 m de haut avec une zone de fût non branchée de 23 cm.

A partir des fichiers filtrés, pour les différents ordres de ramification, chaque branche est approximée par un seul cylindre dont les caractéristiques (longueur, diamètre...) sont déduites des n cylindres servant à la modéliser (Figure 5-18). Cette simplification tient compte des caractéristiques de chacun des cylindres représentant la branche, en pondérant les calculs par leur propriétés (un détail des calculs est donné en annexe du Chapitre 5 §A5.2). Par la suite, un cylindre moyen est calculé pour chaque ordre de ramification permettant de préciser les caractéristiques du couvert forestier sous une forme directement exploitable par les modèles radar théoriques. De plus, il est possible d'en déduire des résultats dendrométriques classiques et détaillés.



Figure 5-18 : Zoom sur une branche et sa représentation simplifiée pour les modèles radar théoriques comme une collection de cylindre, avec L, r et β , la longueur, le rayon et l'angle de branchaison respectivement. Cette simplification est obtenue par l'intermédiaire d'un module implémenté dans l'interface AMAP2SAR.

Un manuel d'utilisation pour l'interface AMAP2SAR (Barczi *et al.* 1997) a été réalisé et on peut s'y reporter pour de plus amples informations. Basée sur sa mise en œuvre, une caractérisation précise du couvert forestier a pu être réalisée. Il est à noter que le logiciel *AMAP2SAR* a été transféré à l'ESA.

5.6 Résultats de caractérisation précise du couvert forestier

L'interface a été par la suite utilisée pour caractériser architecturalement les peuplements de pins noirs présents sur le site. Mais avant cela une phase de validation des simulations a été réalisée sur la base de comparaison entre les données expérimentales et celles issues de fichiers numériques des arbres simulés.

5.6.1 Validation des simulations d'arbres générées par AMAPsim

La validation revient à comparer les données dendrométriques extraites *via* AMAP2SAR et les données mesurées expérimentalement sur des échantillons indépendants de ceux ayant servis à caler le moteur de croissance. Les simulations d'arbres se sont faites entre 6 et 45 ans par pas de 2 ans jusqu'à 28 ans et de 4 ans au delà. A chaque âge, 20 arbres ont été calculés (sans aiguilles) avec un numéro de graine tiré aléatoirement pour le premier, puis incrémenté par pas de 1 pour les suivants. Après une phase d'extraction et de simplification, permettant de distinguer la partie élaguée de la partie non élaguée du tronc, un arbre est caractérisé par deux fichiers correspondant aux deux parties. Les statistiques sont ensuite calculées automatiquement sur la base de ces fichiers par le biais d'un programme implémenté sur un tableur. La confrontation des résultats s'est faite sur la hauteur totale, le diamètre et la longueur des branches primaires au niveau de chaque étage, les résultats sont présentés à la Figure 5-19. Le Tableau 5-3 récapitule la qualité des ajustements obtenus.

Paramètres forestiers calculés <i>vs</i> mesurés	Mesures de l'ajustement		
	\mathbb{R}^2	EQM	
Longueur branches primaires (m)	0,77	0,23	1
Diamètre branches primaires (cm)	0,57	0,43	-
Hauteur totale fûts (m)	0,78	1,5	
Diamètre des fûts (cm)	0,69	2,33	٦

Tableau 5-3 : Mesure de la qualité de l'ajustement entre les données simulées dérivées d'AMAPsim et les mesures expérimentales réalisées pour les mêmes paramètres forestiers. EQM est l'Erreur Quadratique Moyenne.



Figure 5-19 : Confrontation données calculées et mesurées pour a) le diamètre des fûts, b) la longueur des fûts, c) le diamètre des branches primaires et d) leur longueur.

Les confrontations sont accompagnées d'un intervalle de confiance défini au niveau de $\alpha = 5\%$, signifiant que si une observation est extérieure à cet intervalle, l'hypothèse d'appartenance de cette observation à la population est rejetée. Le calcul de l'intervalle de confiance est donné par (Tomassone *et al.* 1983) :

$$y^{0} = \hat{y}^{0} \pm t_{(n-2;\alpha/2)} \times \sqrt{\hat{\sigma}^{2} \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x^{0} - \bar{x})^{2}}{\sum_{i} (x_{i} - \bar{x})^{2}} \right]}$$
(5-2)

avec :

- \hat{y}^{0} : prédiction de x⁰
- $\hat{\sigma}^2\,$: estimation non biaisée de la variance résiduelle
- t : variable de Student
- n : effectif
- a : seuil de signification

La comparaison des données calculées vs mesurées montrent un bon ajustement permettant d'obtenir une validation partielle des simulations d'arbres réalisées par le moteur de croissance AMAPsim. Aux résultats sont associés les intervalles de confiance au seuil de sécurité α de 5% associés à la valeur moyenne et sous hypothèse de normalité. Il apparaît dans le cas des diamètres des fûts que plusieurs points sont en dehors de cet intervalle. Une analyse approfondie de ces résultats permet d'interpréter cet écart (Figure 5-20).



Figure 5-20 : Evolution des résidus réduits du diamètre des fûts en fonction de l'âge des peuplements.

Il ressort de la Figure 5-20 que les résidus se décomposent en deux groupes, un premier groupe non structuré comprenant la majorité des observations et un deuxième (groupe A) présentant une structuration en fonction de l'âge. Ces derniers appartiennent à des peuplements du causse Méjean sur lesquels des valeurs de densités élevées ont été mesurées. A la vue de cette analyse, il apparaît un biais pour les peuplements correspondant aux résidus structurés. Ceci est la conjonction de plusieurs facteurs :

- la plus forte densité des peuplements de même classe d'âge sur Méjean par rapport ceux sur Mende ,
- la variation des conditions environnementales et sylvicoles comparée à celle des peuplements de la forêt domaniale de Mende ayant servi au paramétrage du moteur de croissance.

Néanmoins, ces résultats montrent la capacité du moteur de croissance à calculer des arbres représentatifs des peuplements forestiers présents sur le site d'étude. Il convient toutefois de pondérer les extrapolations des résultats à d'autres sites et pour la limite supérieure d'âge (45 ans).

5.6.2 Caractérisation dendrométrique classique et fine

Une phase de caractérisation dendrométrique et de quantification de la répartition de différents paramètres forestiers pour les différents niveaux de ramification prédits par les simulations a été réalisée. Les résultats sont dérivés des cylindres servant à obtenir une représentation simplifiée du couvert tout en préservant les caractéristiques géométriques des branches. Par exemple, un arbre simulé de 40 ans est représenté par 80000 à 95000 cylindres lorsqu'il est simulé sans simplification.

L'évolution des paramètres dendrométriques en fonction de l'âge a pu être dérivée. La Figure 5-21 illustre le comportement de différents paramètres. L'évolution de la longueur et du rayon en fonction de l'âge montre un comportement quasi linéaire sauf pour le fût qui tend vers une sigmoïde. Ce dernier comportement permet de retrouver une évolution classique observée sur les peuplements forestiers. L'évolution du volume compartimenté affiche un comportement fortement non linéaire du type puissance ou exponentiel. Il est à noter que le volume du houppier au dessus de 30 ans est supérieur au volume des fûts essentiellement dû au fort volume des branches primaires combiné au faible élagage.

Ces résultats mettent en évidence la puissance de l'approche car ils nous permettent d'obtenir l'évolution quantitative des paramètres de l'ensemble des ordres de branches en fonction de l'âge, aspect qui est très rarement abordé sur les milieux forestiers.



Figure 5-21 : Evolution des paramètres dendrométriques en fonction de l'âge pour a) la longueur, b) le rayon et c) le volume pour les différents niveaux de ramification de l'arbre.

Bien que ces résultats permettent une obtention d'informations dendrométriques pertinentes par une méthode beaucoup plus souple et plus précise que les voies classiques, elles n'en restent pas moins insuffisantes pour la modélisation radar. De plus, au travers de la Figure 5-21 ne transparaît aucune information sur la localisation et la répartition des paramètres, et on est en droit de penser qu'elles ne sont pas homogènes. Grâce à sa souplesse, AMAP via l'interface AMAP2SAR nous permet de passer ces étapes supplémentaires de description du milieu et d'arriver à la caractérisation "électromagnétique" du couvert forestier.

5.6.3 Caractérisation "électromagnétique" pour les modèles radar

5.6.3.1 Evolution des paramètres avec l'âge des peuplements

Afin d'arriver à une représentation exploitable par les modèles théoriques de rétrodiffusion radar, il est nécessaire de caractériser l'évolution de paramètres spécifiques aux modèles théoriques tels que les angles d'insertions relatifs et absolus (Figure 5-22) ou encore la densité linéaire (Figure 5-23a). Si les angles d'insertion relatifs et absolus sont identiques pour les branches primaires (Figure 5-16), ils divergent à partir du deuxième ordre avec des valeurs moyennes plus élevées pour l'angle d'insertion relatif. Cependant l'évolution de ces deux angles en fonction de l'âge est relativement stable.



Figure 5-22 : Evolution des angles d'insertion moyen des cylindres approximant les différents ordres de branches a) relatifs entre ordres porteurs-portés, b) absolus par rapport à la verticale.

Un indice de courbure (différence normalisée entre les longueurs de la branche et de son cylindre équivalent) a également été caractérisé pour les différents ordres de branches (Figure 5-23b). Ces comportements apparaissent plus complexes à interpréter comparés à la longueur ou encore au rayon des différents éléments. Ainsi, la densité linéaire (Figure 5-23a) varie fortement avec l'âge avec une amplitude de décroissance importante pour les branches d'ordre 1, beaucoup moins prononcée et ascendante pour les ordres supérieurs, tendant vers une limite pour l'ensemble des ordres. L'indice de courbure (Figure 5-23b) montre également une amplitude de variation importante pour les branches d'ordre 1 s'atténuant pour les ordres supérieurs. Ces derniers affichent un indice moyen généralement plus élevé qu'à l'ordre 1.



Figure 5-23 : Evolution avec l'âge des peuplements de a) la densité linéaire, et b) l'indice de courbure, pour les différents ordres de cylindres approximants les différents ordres de branches.

Contrastant avec ces fortes variations, l'angle d'insertion ne montre pratiquement aucune variation nette en fonction de l'âge, et entre les différents ordres. Cette constatation nous amène, dans ce cas, à nous interroger sur la capacité qu'a une valeur moyenne à représenter la variabilité spatiale et temporelle du paramètre considéré à l'intérieur du peuplement. La Figure 5-24 représentant la distribution de l'angle d'insertion relatif pour les différents ordres à deux âges apporte un premier élément de réponse.



Figure 5-24 : Histogramme de l'angle d'insertion relatif "*branching angle*" pour les différents ordres de branches et pour des peuplements de pins noirs de a) 16 ans et b) 40 ans.

En effet, les distributions montrent d'une part la variabilité en fonction de l'âge et de l'ordre, et d'autre part que si pour les jeunes peuplements la distribution peut être ajustée par une loi simple, ce n'est pas le cas pour les 40 ans où plusieurs modes apparaissent (combinaison de lois). Or, dans la majorité des études, la caractérisation des fonctions de densité de probabilité des angles d'insertion ne prend pas en compte cet aspect. De plus, il n'est pas question de considérer la variabilité spatiale notamment en fonction de la position dans le couvert. Les résultats de caractérisation du milieu forestier présentés jusqu'à présent est suffisant pour fournir des paramètres d'entrée au modèle électromagnétique et représente le niveau généralement atteint par la majorité des études menées jusqu'à présent.

Grâce à la souplesse de la description et à l'interface *AMAP2SAR* le passage à un niveau supérieur de précision à pu être envisagé en intégrant dans la description des diffuseurs leur position au sein de la couche végétale. Pour cela, des profils verticaux de distribution des différents paramètres électromagnétiques ont été générés.

5.6.3.2 Evolution de la distribution verticale des paramètres

De manière à intégrer ce facteur, des profils verticaux moyens (calculés sur les 20 arbres simulés par âge) de distribution des paramètres (longueur, diamètre, angle d'insertion...) en fonction de l'âge et de l'ordre de ramification ont été calculés par l'intermédiaire d'un découpage du couvert forestier en couches horizontales d'épaisseur constante (20 cm). Les résultats de la Figure 5-25 illustrent la répartition pour chaque ordre de ramification des paramètres dendrométriques pour deux classes d'âges (20 et 40 ans).

Une fluctuation est associée aux profils principalement due à la finesse du découpage utilisé en relation avec l'espacement des verticilles, ne masquant en rien la tendance générale du comportement des paramètres en fonction de la profondeur. Si la variation des paramètres va dans le sens d'une croissance homogène avec la profondeur pour les arbres de 20 ans, différentes zones sont distinguables sur les profils des arbres de 40 ans. La longueur et le diamètre des branches sont très corrélés et augmentent rapidement sur les premiers mètres du houppier avant d'arriver à une valeur relativement constante respectivement aux alentours de 2,8 m et de 3,5 cm excepté pour le deuxième ordre. Malgré les fluctuations, un déficit en volume des branches primaires est observable vers 2,6 m chez les arbres de 20 ans. Ce déficit est également observé pour la même hauteur sur les profils mesurés de biomasse présentés au Chapitre 3 et contribue à la validation des simulations.

Des profils d'angles d'insertion relative et d'effectifs viennent compléter la caractérisation verticale (Figure 5-26 et Figure 5-27). Si les angles d'insertions interviennent directement comme paramètre d'entrée dans les modèles électromagnétiques, les effectifs jouent un rôle indirect. Cependant, les distributions verticales des effectifs peuvent être d'un grand intérêt comme support à l'interprétation ondes-matière.



Figure 5-25 : Profils verticaux des paramètres de taille à l'intérieur du houppier pour les arbres de 20 ans a) diamètre, c) longueur, d) volume et pour les arbres de 40 ans b) diamètre, e) longueur et f) volume.



Figure 5-26 : Profils verticaux des angles d'insertion relatif a) pins de 20 ans et b) pins de 40 ans.

Ces profils sont complexes à analyser excepté pour les branches primaires pour lesquelles l'angle augmente progressivement avec la profondeur parallèlement à leur augmentation de poids, alors que pour les branches d'ordres supérieurs, les valeurs restent relativement constantes pouvant s'expliquer par :

- 1) l'élagage se faisant plus tôt pour les branches courtes qui ploient peu ou pas du tout,
- 2) la tendance de ces ordres à se positionner dans un plan.



Figure 5-27 : Profils verticaux du nombres de branches a) pins de 20 ans et b) pins de 40 ans.

Quant aux effectifs de branches, intervenant dans la densité volumique n_0 ils sont représentés à la Figure 5-27. Ce nombre fluctue autour d'une valeur constante pour les branches primaires ce qui est logique, alors que pour les ordres supérieurs, de fortes variations sont observées en fonction de la profondeur. C'est le cas par exemple des arbres de 40 ans où de forts effectifs sont observés sur les 6 premiers mètres du houppier tandis que chez les pins de 20 ans l'effectif augmente progressivement pour atteindre un maxima à mi-profondeur.

Les paramètres utilisés pour décrire le milieu forestier peuvent varier suivant les modèles de diffusion électromagnétiques considérés. Ainsi, certains modèles utilisent pour décrire l'orientation des diffuseurs un angle d'insertion absolue (angle par rapport à la verticale) à la place de l'angle d'insertion relatif. D'autre part, l'approximation d'une branche par un cylindre unique utilisée dans la majorité des modèles théoriques s'avère être une hypothèse forte qui dans certains cas est fortement biaisée (branches à forte courbure). Afin de tenir compte de cette caractéristique, un indice de courbure a été calculé pour les différents ordres de branches. Ce dernier peut entre autres nous servir 1) dans l'interprétation de l'interaction ondes-matière, 2) à pointer du doigt les améliorations à apporter aux modèles théoriques pour intégrer ces propriétés du milieu forestier. En effet l'interaction de l'onde va varier en fonction d'une branche droite ou courbée. La finesse de la description est un moyen d'étudier la sensibilité de la rétrodiffusion à ces caractéristiques des branches afin d'en tenir compte dans l'interprétation de l'interaction ondes-matière.

Les profils d'indice de courbure et d'angle d'insertion absolu sont présentés à la Figure 5-28. Ces profils sont complexes à analyser, en particulier ceux concernant l'angle d'insertion absolu. Pour l'indice de courbure, un comportement croissant en fonction de la profondeur dans la couronne est observé pour les branches primaires et d'ordres supérieurs chez les arbres de 20 ans. Sur les profils des pins de 40 ans seules les branches primaires montrent une croissance de l'indice de courbure en fonction de la profondeur alors que les ordres supérieurs oscillent plus ou moins autour d'un valeur constante.

De plus, une corrélation entre profils d'indice de courbure et d'angle d'insertion relatif est observée. Ceci est à rapprocher de la prise en compte de l'effet de la pesanteur entraînant une augmentation de l'angle d'insertion avec la profondeur accompagnée par un angle de reprise plus fort sur les branches du bas se répercutant sur l'indice de courbure.



Figure 5-28 : Profils verticaux des angles d'insertion absolus et indices de courbures pour les arbres des 20 ans a) et c) et pour les arbres de 40 ans b) et d).

L'ensemble de ces profils obtenus après simulations des arbres par AMAP*sim* et *via* AMAP2SAR montrent sans ambiguïté les potentialités d'une telle approche pour caractériser précisément le couvert forestier d'un point de vue "classique" mais également "électromagnétique". Il sont également d'un grand intérêt pour tester la validité des maquettes.

5.6.3.3 La distribution azimutale

Au total, une caractérisation précise est obtenue dans la dimension verticale et la question est de savoir maintenant si ces répartitions peuvent être considérées isotropes dans le plan horizontal d'un point de vue azimutal. Pour répondre à cette question, des simulations de plusieurs arbres de 30 ans ont été réalisées pour simuler une petite scène. Cette scène est artificielle ne reprenant en rien les densités de tiges mesurées expérimentalement sur les parcelles échantillonnées. Cette scène a été ensuite observée par le haut pour juger d'éventuelles anisotropies azimutales au sein d'un houppier (Figure 5-29). Les arbres simulés avec différentes graines aléatoires intègrent implicitement la gêne entre individus.



Figure 5-29 : Peuplement artificiel de pins noirs d'Autriche de 30 ans vu de haut simulé à partir d'AMAP*sim*.

Les résultats montrent que l'approximation d'homogénéité azimutale est pleinement justifiée, confortée en cela par des simulations réalisées pour différents âges, et l'étude des histogrammes des distributions azimutales. L'hypothèse d'isotropie azimutale sera utilisée par la suite dans le cadre de la modélisation théorique.

Basé sur ces simulations et l'ensemble de ces résultats, nous avons démontré la capacité de l'approche par *AMAP2SAR* pour caractériser de façon **souple et précise** le couvert forestier à des fins de modélisation radar et de caractérisation paysagère.

5.7 Conclusions

L'objectif de caractérisation du couvert forestier traité au cours de ce Chapitre nous a permis de mettre en place et d'apprécier l'intérêt de la modélisation architecturale 3D par l'AMAP pour :

• la caractérisation précise et souple du milieu forestier à des fins de modélisation électromagnétique ;

 envisager grâce au réalisme des plantes simulées des applications paysagère et forestière.

En particulier, cette approche de modélisation est apparue des plus performante pour décrire la forme et l'orientation des éléments constituant du couvert forestier, description difficile et laborieuse, et donc généralement absente dans les approches de modélisation. Au travers de l'interface AMAP2SAR développée pour l'extraction de paramètres forestiers et "électromagnétiques" à partir des maquettes, cette nouvelle approche générique pour la modélisation radar permet de s'adapter aux différents modèles théoriques actuels. De plus, le rendu 3D est des plus réalistes et s'avère potentiellement très intéressant pour les applications paysagères et la gestion de l'environnement.

A terme, la nouvelle génération de moteur de croissance AMAP devrait intégrer les spécificités d'AMAPsim (qualité de la modélisation architecturale) en prenant en compte explicitement la gêne et en intégrant des modules de mécanique et de répartition des assimilats performants. Le but étant d'obtenir un noyau générique sur lequel pourront venir se greffer des modules annexes pour différentes applications comme par exemple AMAP2SAR.

Ces assemblages peuvent être qualifiés de laboratoire pour formaliser et tester des idées, pour suggérer des expériences et pour intégrer des connaissances (Reffye de et al. 1996).

Mougin (1989) qualifiait de *voie prometteuse* la modélisation architecturale pour la caractérisation de couverts forestiers, nous ne pouvons qu'acquiescer et confirmer à la vue des possibilités qu'elle ouvre concernant l'interprétation de l'interaction onde-matière. Toutefois, et comme cela a été souligné au paragraphe 5.4.1.3, la relation de causalité entre données de terrain et simulation implique 1) que la qualité des simulations est assujétie à la qualité de l'échantillonnage et à sa représentativité du peuplement forestier 2) que si les lois sont valides pour un site donné, leur extrapolation à d'autres sites reste délicate, demandant un minimum de prises de données.

Concernant le coefficient de rétrodiffusion (σ^0), si l'analyse des résultats (Chapitre 4) a montré un lien avec les paramètres forestiers de la ressource, aucune interprétation n'est venue l'étayer. Ainsi en vue d'une généralisation de l'estimation de paramètres de la ressource forestière, plusieurs questions restent posées auxquelles nous allons essayer de répondre dans le Chapitre suivant. Cela a consister à développer une approche originale de modélisation électromagnétique de l'interaction ondes radar-milieu forestier mise en œuvre par un couplage du modèle architectural de plantes AMAPsim et du modèle de diffusion électromagnétique du MIT/CESBIO via l'interface AMAP2SAR.

Références bibliographiques

- Barczi, J. F., Castel, T., Caraglio, Y., Beaudoin, A., Rey, H., Chetaille, S., and Castagnas, L. (1997). "AMAP2SAR, AMAP sorter V1.0, user manual." ESA/ESTEC contract n° 163014/96/NL, 73p.
- Barczi, J. F., Reffye de, P., and Caraglio, Y. (1996). "Essai sur l'identification et la mise en oeuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale." Science Update. I.N.R.A., Versailles, France, 205-255.
- Barthélémy, D. (1991). "Levels of organization and repetition phenomena in seed plants." Acta Biotheoretica, 39(309-323).
- Barthélémy, D., Caraglio, Y., and Costes, E. (1996). "Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique des végétaux." *Science Update. I. N. R. A.*, Versailles, France, 89-139.
- Barthélémy, D., Edelin, C., and Hallé, F. (1989). "Architectural concepts for tropical trees, Tropical Forests: Botanical dynamics, speciation and diversity." In : Holm-Nielsen LB, Nielsen I et Balsler H (eds), Academic Press, London, 98-100.
- Barthélémy, D., Edelin, C., and Hallé, F. (1991). "Canopy architecture." In : Raghavendra AS (ed) Physiology of Trees, John Wiley & Sons(Chichester, U. K.), 1-20.
- Baskerville, G. L. (1965). "Estimation of dry weight of tree components and total standing crop in conifer stands." *Ecology*, 46(6), 867-869.
- Blaise, F. (1991). "Simulation du parallélisme dans la croissance des plantes et applications," , Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 186 p.
- Blaise, F. (1992). "Simulation de couverts végétaux réalistes en 3D." Archives Internationales de Photogrammétrie et de Télédétection, XVIIème Congrès ISPRS, 24, 207-212.
- Blaise, F., Barczi, J. F., Jaeger, M., Dinouard, P., and Reffye Ph, d. (1997). "Simulation of the growth of plants. Modeling of metamorphosis and spatial interactions in the architecture and development of plants Synthetic Worlds.", in press.
- Blaise, F., and Reffye de, P. (1994). "Simulation de la croissance des arbres et influence du milieu : le logiciel AMAPpara." Tankoano J (ed) Proceedings of the 2nd African Conference on Research in Computer Science (CARI'94), 12-18 October, 61-75.
- Blake, J., Somers, G., and Ruark, G. (1991). "Estimating limiting foliar biomass in conifer plantations from allometric relationships and self-thinning behavior." *Forest Sci.*, 37(1), 296-307.
- Caraglio, Y., and Barthélémy, D. (1996). "Revue critique des termes relatifs à la croissance et à la ramification des tiges des végétaux vasculaires." Science Update. I.N.R.A, 11-85.
- Castel, T., Beaudoin, A., Barczi, J. F., Caraglio, Y., Floury, N., and Le Toan, T. (1997). "On the coupling of backscatter models with tree growth models : Part 1: A realistic description of the canopy using the AMAP tree growth model." *Proceedings IGARSS'97 Symposium*, 784-786.
- Dauzat, J. (1985). "Effets des paramètres architecturaux et des conditions radiatives sur la télédétection de l'indice foliaire des couverts végétaux." Comptes rendus du 3ième Colloq. Int. sur les Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, 175-178.
- Dauzat, J. (1990). "Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques d'Elaeis guineensis." ATP n° 22: Modélisation des transferts radiatifs au sein d'une palmeraie, 150p.
- Dauzat, J. (1993a). "Radiative transfer simulation on computer models of *Elaeis guineensis*." PORIM International Palm Oil Congress (PIPOC): Update and Vision, 10p.
- Dauzat, J. (1993b). "Simulated plants and radiative transfer simulations." Colloq. Structure du Couvert Végétal et Climat lumineux: méthodes de caractérisation et applications, Crop Structure and Light Microclimate. Characterization and Applications, 271-278.
- Dauzat, J., and Hautecoeur, O. (1991). "Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux." Comptes rendus du 5ième Colloq. Int. sur les Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, 415-418.
- Dauzat, J., Lecoustre, R., Méthy, M., Reffye de, P., and Roy, J. (1988). "Modelling light profiles through canopies using a plant architectural model." *Proceedings Int. Congress Euroform New Energies.*
- Edelin, C. (1977). "Images de l'architecture des conifères," , Université des Sciences et Techniques du Languedoc-Roussillon, Montpellier.
- Fourcaud, T. (1995). "Analyse du comportement mécanique d'une plante en croissance par la méthode des éléments finis," , Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 148p.
- Godin, C., Costes, E., and Caraglio, Y. (1997). "Exploring plant topological structure with the AMAPmod software: an outline." Silva Fennica, 31(3), 357-368.

- Godin, C., Guédon, Y., Costes, E., and Caraglio, Y. (1996). "Chapter 4 : Measuring and analysing plants with the AMAPmod software." Plants to ecosystems, advances in computational life sciences, M. T. Michalewicz, ed., CSIRO, Autralia, 53-84.
- Guédon, Y. (1996). "Modélisation de séquences d'événements décrivant la mise en place d'éléments botaniques." *Science Update. I.N.R.A.*, 187-205.
- Guédon, Y., and Costes, E. (1996). "Modélisation de la croissance d'un axe végétatif." *Science Update. I.N.R.A*, 173-187.
- Hallé, F., and Oldeman, R. A. A. (1970). Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux, Masson & Cie, Paris, France.
- Hallé, F., Oldeman, R. A. A., and Tomlinson, P. B. (1978). Tropical trees and forests an architectural analysis, Springer Verlag, Berlin, Allemagne,.
- Hepp, E. T., and Brister, G. H. (1982). "Estimating crown biomass in loblolly pine plantations in the Cararolina flatwoods." Forest Sci., 28(1), 115-127.
- Jack, S. B., and Long, J. N. (1991a). "Analysis of stand density effects on canopy structure : a conceptual approach." *Trees*, 5, 44-49.
- Jack, S. B., and Long, J. N. (1991b). "Structure, production and leaf area dynamics : a comparison of lodgepole pine and sunflower." *Annals of botany*, 68, 247-252.
- Jaeger, M., and Reffye de, P. (1992). "Basic concepts of computer simulation of plant growth." Journal of Biosciences, 17(3), 275-291.
- Kasischke, E. S., Christensen Jr, N. L., and Haney, E. M. (1994). "Modeling of geometric properties of loblolly pine tree and stand characteristics for use in radar backscatter stuidies." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 32(4), 800-822.
- Landry, R., Fournier, R. A., and Ahern, F. J. (1996). "Tree vectorization : a method to describe tree architecture." soumise à IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.
- Landry, R., Lang, R. H., and Cacciola, R. (1995). "Fine tree architecture reconstruction in support of microwave models." CNES/IEEE international symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications, 85-93.
- Lang, R. H., Landry, R., Kavakhoglu, Ö., and Deguise, J. C. (1995). "Simulation of microwave backscatter from a red pine stand." SPIE, 2314, 538-548.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., and Guyon, D. (1992). "Relating forest biomass to SAR data." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30(2), 403-411.
- Lecoustre, R., Saito, K., Kumagai, Y., Honjo, T., Reffye de, P., and Ishida, Y. (1993). "Photo-realistic forest landscape simulation-application of GIS and plant modeling technique." *NICOGRAPH'93*, 223-236.
- Leersnijder, R. P. (1992). "Pinogram : a Pine Growth Area Model." Ecological Modelling, 61, 0-147.
- Martens, S. N., Ustin, S. L., and Norman, J. M. (1991). "Measurment of tree canopy architecture." International Journal of Remote Sensing, 12(7), 1525-1545.
- Mougin, E. (1989). "Télédétection de la végétation par micro-ondes. Mesure et modélisation des effets des paramètres du couvert sur la propagation et la rétrodiffusion des ondes radar,", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, ENSAT, Toulouse, 227p.
- Mougin, E., Lopes, A., Dauzat, J., Hoekman, D. H., Karam, M. A., and Fung, A. K. (1992). "Interpretation of microwave signatures of trees by a combined backscattering and plant structural model." *Huston Texas, USA*, p1215.
- Oldeman, R. A. A. (1974). "L'architecture de la forêt guyanaise, Mémoire," , Thèse de doctorat, ORSTOM, Paris, 204p.
- Oppenheimer, P. E. (1986). "Real time design and animation of fractal plants and trees." Computer graphics, 20(4), 55-64.
- Prusinkiewicz, P., and Lindenmayer, E. (1990). The algorithmic beauty of plants, , Berlin.
- Reffye de, P. (1976). "Modélisation et simulation de la verse du caféier, à l'aide de la théorie de la résistance des matériaux." *Café Cacao Thé*, 20(4), 251-272.
- Reffye de, P. (1979). "Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *coffea robusta*,", Thèse de doctorat d'état, Université de Paris-Sud Orsay, Paris, 195p.
- Reffye de, P. (1981a). "Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 1ère Partie. Etude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs." *Café Cacao Thé*, 25(2), 83-104.
- Reffye de, P. (1981b). "Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 2ème Partie. Etude de la mortalité des méristèmes plagiotropes." *Café Cacao Thé*, 25(2), 219-230.
- Reffye de, P. (1982). "Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 3ème Partie. Etude de la ramification sylleptique des

rameaux primaires et de la ramification proleptique des rameaux secondaires." *Café Cacao Thé*, 26(2), 77-96.

- Reffye de, P. (1983). "Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. 4ème Partie. Programmation sur micro-ordinateur de tracé en trois dimensions de l'architecture d'un arbre. Application au caféier." *Café Cacao Thé*, 27(1), 3-20.
- Reffye de, P., and Blaise, F. (1993). "Modélisation de l'architecture des arbres. Applications forestières et paysagères." *Revue Forestière Française*, XLV(sp), 128-136.
- Reffye de, P., Blaise, F., and Guédon, Y. (1993). "Modélisation et simulation de l'architecture et de la croissance des plantes." *Rev. Palais de la Découverte*, 209, 23-48.
- Reffye de, P., Dinouard, P., and Barthélémy, D. (1991a). "Modélisation et simulation de l'architecture de l'orme du Japon Zelkova serrata (Thunb.) Makino (Ulmaceae): la notion d'axe de référence." 2ème Colloque International sur l'Arbre, hors série, 251-266.
- Reffye de, P., Edelin, C., Françon, J., Jaeger, M., and Puech, C. (1988). "Plant models faithful to botanical structure and development." *Computer Graphics*, 22(4), 151-158.
- Reffye de, P., Elguero, E., and Costes, E. (1991b). "Growth units construction in trees : a stochastic approach." Acta Biotheoretica, 39, 325-342.
- Reffye de, P., Houllier, F., Blaise, F., and Fourcaud, T. (1996). "Essai sur les relations entre architecture d'un arbre et la grosseur de ses axes végétatifs." *Science Update. I.N.R.A.*, Versailles, France, 255-425.
- Rey, H., Godin, C., and Guédon, Y. (1996). "Vers une représentation formelle des plantes." Sciences Update I.N.R.A., Versailles, France, 139-173.
- Room, P., Hanan, J., and Prusinkiewicz, P. (1996). "Virtual plants : new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists." *Trends in Plant Science*, 1(1), 33-38.
- Sun, G., and Ranson, K. J. (1995). "A three-dimensional radar backscatter model for forest canopies." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33(2), 372-382.
- Tomassone, R., Lesquoy, E., and Millier, C. (1983). La regression : nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique, Masson, Paris, 180p.
- Ustin, S. L., Martens, S. N., and Vanderbilt, V. C. (1991). "Canopy architecture of a Walnut orchard." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing,, 29(6), 843-851.
- Viennot, X. G., Eyrolles, G., Janay, N., and Arques, D. (1989). "Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees." *Computer graphics*, 23(3), 31-40.
- Wang, Y., Day, J., and Sun, G. (1993). "Santa Barbara microwave backscattering model for woodlands." International Journal of Remote Sensing, 14(8), 1477-1493.

.

Chapitre 6

Interprétation du signal par couplage d'AMAP et du modèle du MIT/CESBIO Ce chapitre est le résultat d'une étroite collaboration entre le LCT et l'équipe de modélisation électromagnétique du Dr. T. Le Toan du CESBIO. La contribution des différents protagonistes se résument comme suit :

Protagonistes	Organismes	Contributions
T. Castel	LCT Cemagref-ENGREF	Caractérisation électromagnétiques du milieu
		Validation du modèle
		Interprétation électromagnétique et
		phénoménologique
		 modélisation semi-empirique
A. Beaudoin	LCT Cemagref-ENGREF	Gestion et suivi Scientifique
		Interprétation électromagnétique et
		phénoménologique
N. Floury	CESBIO UPS-CNRS-	Amélioration du modèle du MIT/CESBIO
G. Picard	CNES	Simulation et validation du modèle
		• interprétation électromagnétique et phénoménologique
T. Le Toan	CESBIO UPS-CNRS-	Suivi scientifique
	CNES	• interprétation électromagnétique et phénoménologique

Chapitre 6

Interprétation du signal par couplage d'AMAP et du modèle du MIT/CESBIO

6.1	Introduction	164
	6.1.1 Cadre conceptuel de l'approche	164
	6.1.2 Modèles théoriques de rétrodiffusion radar : intérêts et limites	166
6.2	Principales approches de modélisation	167
	 6.2.1 Description électromagnétique du milieu 6.2.2 Approches de modélisation électromagnétique 6.2.2.1 Approche en champ électromagnétique (<i>full wave</i>) 6.2.2.2 Approche basée sur la théorie du transfert radiatif (<i>radiative tranfer</i> RT) 6.2.2.3 Principes et formulation de base du transfert radiatif 6.2.2.4 Domaine de validité 	168 169 169 169 170 173
6.3	Le modèle du MIT/CESBIO : un modèle hybride	174
	 6.3.1 Choix du modèle du CESBIO 6.3.2 Caractérisation du milieu 6.3.3 Equations du transfert radiatif appliquées au milieu forestier en agré 6.3.4 Calcul cohérent : le "branching model" 6.3.5 Solutions du premier ordre des équations RT et mécanismes rétrodiffusion 	174 175 gat178 179 s de 179
6.4	Approche méthodologique de modélisation	180
	6.4.1 Caractérisation du milieu 6.4.2 Simulation et interprétation physique	181 182
	6.4.3 Modélisation semi-empirique	183
0 F	6.4.3 Modélisation semi-empirique	183
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 	183 184
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 	182 183 184 184 185
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.1 couvert forestier 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.1 pour le couvert forestier 	182 183 184 184 185 186 186 187 188 188
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2.1 pour le couvert forestier 6.5.2.2.2 pour le sol 6.5.2.2 pour le sol 	182 183 184 184 185 186 186 186 186 187 188 188 188 189 190
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 pour le couvert forestier 6.5.2.3 Précision des paramètres estimés et améliorations souhaitables 6.5 3 Simulation et interprétation : cas mono-couche de houppier 	182 183 184 184 185 186 186 187 188 188 188 189 190 190
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 pour le couvert forestier 6.5.2.3 Précision des paramètres estimés et améliorations souhaitables 6.5.3 Simulation et interprétation : cas mono-couche de houppier 6.5.3 1 Interprétation de l'écart aux données 	182 183 184 184 185 186 186 187 188 188 188 189 190 190 191
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 pour le couvert forestier 6.5.2.3 Précision des paramètres estimés et améliorations souhaitables 6.5.3 Simulation et interprétation : cas mono-couche de houppier 6.5.4 Simulation et interprétation : cas bi-couche du houppier 	182 183 184 185 186 186 186 187 188 188 189 190 190 191 194
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.1 couvert forestier 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 pour le couvert forestier 6.5.2.3 Précision des paramètres estimés et améliorations souhaitables 6.5.3 Simulation et interprétation : cas mono-couche de houppier 6.5.4 Simulation et interprétation : cas bi-couche du houppier 6.5.5 Simulation et interprétation : cas multi-couche du houppier 	183 183 184 185 186 186 187 188 189 190 191 194 198
6.5	 6.4.3 Modélisation semi-empirique Simulation et interprétation : cas du terrain plat 6.5.1 Stratégie et conditions de simulation 6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier 6.5.2.1 Caractérisation géométrique 6.5.2.1.2 Caractérisation du sol 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 Caractérisation diélectrique 6.5.2.2 pour le couvert forestier 6.5.2.3 Précision des paramètres estimés et améliorations souhaitables 6.5.3 Simulation et interprétation : cas mono-couche de houppier 6.5.4 Simulation et interprétation : cas bi-couche du houppier 6.5.5 Simulation et interprétation : cas multi-couche du houppier 6.5.5 Simulation et adécomposition des mécanismes en multi-couche 	183 183 184 185 186 186 187 188 189 190 191 194 198 198

6.5.5.3 Interprétation approchée de la liaison entre la rétrodiffusion bande paramètres forestiers	L et les 203
6.6 Simulation et interprétation : cas du terrain accidenté	209
6.6.1 Stratégie et conditions de simulation	209
6.6.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier	209
6.6.3 Simulations : cas multi-couches en terrain accidenté	211
6.6.4 Modélisation semi-empirique angulaire	214
6.6.4.1 Diffusion de volume approchée	214
6.6.4.2 Modélisation semi-empirique	216
6.6.4.3 Enseignements pour l'application du modèle semi-empirique de correc	tion 220
6.7 Conclusions	220
Références bibliographiques	222

Références bibliographiques

Chapitre 6

Interprétation du signal par couplage d'AMAP et du modèle du MIT/CESBIO

"Les sciences n'essaient pas d'expliquer, c'est tout juste si elles tentent d'interpréter; elles font essentiellement des modélisations. Par modèle, on entend une construction mathématique qui, à l'aide de certaines interprétations verbales, décrit les phénomènes observés. La justification d'une telle construction mathématique réside uniquement et précisément dans le fait qu'elle est censée fonctionner." John von Neumann

6.1 Introduction

6.1.1 Cadre conceptuel de l'approche

La Figure 6-1 illustre le cadre conceptuel que nous nous sommes donnés dans cette étude afin d'une part, de mieux comprendre le problème direct de compréhension de l'écho radar et de son contenu informatif en termes de paramètres forestiers, et d'autre part, d'aborder le problème inverse d'estimation des paramètres forestiers à partir des données RSO.

Rappelons que **dans l'approche** A abordée au Chapitre 4, des liens statistiques directs entre les paramètres forestiers et l'écho radar ont pu être établis, indiquant l'intérêt des certaines configurations RSO. De plus, l'effet perturbateur du relief a pu être modélisé empiriquement à partir de paramètres topographiques simples. Cependant, ces relations statistiques ne permettent pas de décrire et comprendre d'une part, les liens de causalité de nature physique existant entre l'écho radar et les paramètres forestiers, et d'autre part, l'effet perturbateur du relief.

De plus, dans une perspective d'inversion, ces relations statistiques empiriques peuvent être utilisées mais ne sont valables que pour le site sur lequel la loi a été calée, et donc pour des conditions forestières et environnementales limitées quant à l'extrapolation à d'autres sites.

Dans l'approche B faisant l'objet de ce Chapitre, et considérant le problème direct, une approche de modélisation théorique est abordée afin d'expliciter les liens de causalité entre les paramètres forestiers et l'écho radar. Il s'agit donc de relier physiquement le coefficient de rétrodiffusion radar σ° aux paramètres forestiers, en fonction de la configuration radar et des conditions forestières. Cette liaison physique ne peut être établie que si l'on peut traduire l'ensemble des paramètres forestiers en paramètres dits électromagnétiques, c'est-à-dire intelligible pour un modèle électromagnétique permettant de relier physiquement l'écho radar à ces paramètres, qui se divisent en deux catégories :





Figure 6-1 : comparaison des approches A) statistiques et B) de modélisation théorique pour le problème direct et inverse.

- paramètres géométriques :
 - l'organisation générale du milieu végétal en couches (strates) au-dessus du sol ;
 - ceux des diffuseurs élémentaires que sont les organes végétaux, décrits par la forme (cylindres, ellipsoïdes) et les dimensions (rayon, longueur) ;
 - l'organisation spatiale de ces diffuseurs, à savoir leur densité volumique dans le milieu, leur orientation spatiale et leur position.
- <u>paramètres diélectriques</u>, concernant les propriétés réactives du milieu forestier en terme électriques face à une illumination par un champ électromagnétique, et essentiellement liés à la teneur en eau de la végétation et du sol sous-jacent.

Ainsi, la compréhension du lien entre paramètres forestiers et écho radar passe par une phase intermédiaire de caractérisation du couvert, établissant deux liaisons successives :

• Un premier lien de nature variable entre les paramètres forestiers et les paramètres électromagnétiques ; dans le cas des paramètres géométriques, le lien est de nature dendrométrique et architecturale et donc direct avec les paramètres forestiers, mais difficile à établir. C'est ici qu'AMAP2SAR intervient de façon souple et puissante. Dans le cas de la constante diélectrique, le lien est biophysique puisque lié à la teneur en eau du végétal et aux propriétés diélectriques qui en découle. Idéalement, la liaison devrait être abordée à l'aide d'un modèle d'arbre et de peuplement intégrant à la fois l'architecture du couvert comme le fait AMAP, mais aussi le fonctionnement écophysiologique du couvert permettant de décrire les propriétés hydriques dont nous avons besoin. • Un deuxième lien de nature physique permet de remonter des paramètres électromagnétiques à l'écho radar, à l'aide d'un modèle théorique approprié.

A cela s'ajoute la prise en compte de la perturbation par le relief, qui intervient directement au niveau du lien électromagnétique par la prise en compte de paramètres topographiques issus d'un MNT.

6.1.2 Modèles théoriques de rétrodiffusion radar : intérêts et limites

Intuitivement, cette approche apparaît puissante afin de 1) mieux comprendre ce que le RSO "voit" et mesure réellement dans un couvert forestier, et 2) de déterminer si ce qu'il mesure est reliable à des paramètres forestiers ayant de surcroît un intérêt thématique. La réelle puissance de cette approche est qu'elle permet de décomposer et d'identifier les différents mécanismes d'interactions de l'onde avec le milieu végétal, afin de cerner ceux qui sont prédominants et donc la source de rétrodiffusion en liaison avec les caractéristiques du couvert.

Evidemment, cette puissance est au détriment de sa simplicité et on comprendra que l'approche sera d'autant plus ardue que l'on aborde des écosystèmes forestiers complexes. Ainsi, il est clair que cette approche sur un milieu forestier tropical est dans l'immédiat illusoire. A l'opposé, elle est tout-à-fait appropriée pour des écosystèmes "simples" comme des plantations équiennes et monospécifiques de résineux, mais du coup n'intéressera pour l'application que des écosystèmes somme toute très spécifiques et peu répandus.

Afin de surmonter à moyen terme cette limitation, la plupart des études précédentes utilisant cette approche se sont inscrites dans une approche ascendante (*bottom-up*), où l'on a commencé à s'attaquer à des situations forestières très simples. Suite aux conclusions que l'on en tire sur le lien entre l'écho radar et les paramètres forestiers, on aborde ensuite une situation plus complexe, nécessitant ainsi une amélioration à la fois de la caractérisation électromagnétique du milieu, et du modèle électromagnétique lui-même.

C'est dans cette continuité que s'inscrit cette étude. Un des problèmes sur lequel buttent les électromagnéticiens est celui du manque actuel de decription suffisante du milieu pour alimenter les modèles théoriques, ne permettant pas de conclure sur la validité de ceux-ci. Pour surmonter cette limitation, des équipes se sont récemment tournées vers l'utilisation de modèles de croissance de plantes (vectorisation, fractal...). Toutefois ces approches (cf Chapitre 5) manquent pour la plupart de bases biologiques et, dans ce contexte, AMAP permet d'atteindre un niveau de description suffisant voire dépassant les capacités actuelles des modèles théoriques dans leur formalisme, pour la prise en compte de phénomènes complexes comme la courbure des éléments végétaux.

Dans une perspective **d'inversion**, cette approche théorique est évidemment très limitée en ce sens que le modèle électromagnétique, certes analytique mais à la formulation mathématique particulièrement complexe sur des milieux naturels, et ayant recours à une foule de paramètres d'entrée, n'est généralement pas inversible. Cependant, une fois validé correctement par l'expérimentation, ce modèle devient un outil puissant permettant, dans des conditions de simulation bien ciblées, de réaliser une étude de sensibilité aux paramètres électromagnétiques du couvert forestier.

Elle permet de cerner les configurations radar existantes ou optimales permettant d'obtenir des invariants par rapport à des effets perturbateurs indésirables, et une sensibilité maximale aux paramètres forestiers recherchés. On peut alors tenter de développer des modèles d'inversion semi-empiriques comme nous le verrons.

Ce Chapitre est organisé de la façon suivante. Dans un premier temps, nous présentons très succinctement les diverses approches de modélisation théorique en milieu forestier, pour aborder un peu plus en détails le modèle retenu, en l'occurrence le modèle de transfert radiatif vectoriel du MIT/CESBIO. Par la suite, l'approche de modélisation est détaillée, en vue de l'interprétation de l'écho radar par le couplage de ce modèle avec AMAP. Les résultats de simulation et l'interprétation qui en découle sont finalement présentés en deux parties, tout d'abord pour le cas d'un terrain plat, et ensuite pour le cas plus complexe d'un terrain accidenté.

6.2 Principales approches de modélisation

La Figure 6-2 reprend les principales approches de modélisation développées au cours de ces dernières années, tant au niveau du type de description du milieu qu'au niveau des approches théoriques développées.



Figure 6-2 : Synopsis des différentes approches de modélisation théorique de rétrodiffusion radar des surfaces naturelles.

6.2.1 Description électromagnétique du milieu

Le milieu peut être décrit de trois façons :

1. en couches continues horizontales, chacune caractérisée par une constante diélectrique effective du milieu et une fonction de corrélation de la permittivité diélectrique du milieu pour tenir compte de sa variabilité, fonction décomposée en ses composantes verticale et horizontale sous hypothèse de symétrie azimutale dans ce dernier cas (Borgeaud *et al.* 1987; Nghiem *et al.* 1993). Cette approche n'a pas besoin de beaucoup de paramètres car elle représente de façon synthétique les propriétés diélectriques du milieu due à l'arrangement spatial des diffuseurs élémentaires (troncs, branches, aiguilles), mais la difficulté majeure est de relier la fonction de corrélation aux paramètres géométriques du couvert ;

2. en couches horizontales continues incrustées d'éléments discrets diélectriques de formes simples (cylindres, ellipsoïdes, sphères..) représentant les différents éléments du couvert, à savoir : le tronc, les branches de différents ordres et les aiguilles (ou les feuilles). Les éléments sont géométriquement caractérisés par des paramètres de taille : rayon et longueur par exemple pour des cylindres; quant à l'architecture, elle est partiellement prise en compte par l'orientation et la densité volumique des diffuseurs, sinon les diffuseurs sont considérés disposés aléatoirement dans la couche. Les diffuseurs sont finalement caractérisés par leur constante diélectrique. On tient compte de la variabilité sur chacun de ces paramètres grâce à leur histogramme obtenu expérimentalement, ou bien à leur loi de distribution si elle est connue.

C'est de loin l'approche la plus utilisée par les électromagnéticiens (Chauhan *et al.* 1991; Karam and Fung 1982; Karam and Fung 1989; Kuga *et al.* 1990; Lang *et al.* 1994; Lopes *et al.* 1991; Saatchi *et al.* 1994; Ulaby *et al.* 1990). Cette description a également été appliquée aux milieux forestiers ouverts ou discontinus (McDonald and Ulaby 1993; Sun *et al.* 1991).

Cette approche discrète a des avantages conceptuels et théoriques comparée à l'approche continue, d'une part elle est plus en prise directe avec l'appréhension dendrométrique habituelle d'un couvert forestier, et d'autre part, elle permet de remonter aux principales sources de rétrodiffusion du signal radar. Cependant, elle ne permet pas de tenir compte entièrement de l'architecture du couvert, c'est-à-dire à l'arrangement spatial des diffuseurs qui n'est pas aléatoire mais structuré selon le mode architectural élaboré par la plante, d'où la nécessité d'approches 3D ;

3. en simulant des plantes 3D de forme simple (Sun and Ranson 1995) ou plus complexes et plus réaliste visuellement (Lang *et al.* 1995; Lin and Sarabandi 1996). Jusqu'à présent, ces représentations mettaient en œuvre des modélisations du milieu peu réalistes car basées sur une réalité biologique, botanique et architecturale partielle voire inexistante. Il s'agit d'une reconstruction plus ou moins détaillée de l'arbre. C'est donc ici qu'intervient AMAP pour améliorer cette représentation.

6.2.2 Approches de modélisation électromagnétique

Sur ces différentes descriptions du milieu forestier peuvent être appliquées les propriétés de diffusion des ondes électromagnétiques généralement formulées selon deux principales approches théoriques :
1. une dite en champ électromagnétique ou encore appelée cohérente (full wave);

2. l'autre basée sur le transport de l'énergie appelée transfert radiatif (radiative transfer).

Ces approches sont présentées exclusivement pour la description discrète du couvert forestier, englobant la majorité des approches de modélisation menées à ce jour, et qui a été mise en œuvre dans le cadre de ce travail.

6.2.2.1 Approche en champ électromagnétique (full wave)

Cette approche est directement basée sur les équations de Maxwell et consiste à calculer le champ électromagnétique moyen dans le couvert. En principe, il est possible de tenir compte de toutes les interactions entre particules, en pratique la formulation devient très vite compliquée. Pour pallier cela, on a recours à diverses approximations. Parmi les plus utilisées se trouvent l'approximation de Born modifiée. Ces approximations prennent en compte l'atténuation de l'onde incidente par le milieu correspondant à la diffusion de 1^{ier} ordre. Lopes and Mougin (1990) ou Mougin *et al.* (1990b) ont utilisé cette approche pour calculer l'atténuation de couverts de conifères, obtenant de bons résultats entre mesures simulées et observées en bande X. Des résultats d'atténuation et de rétrodiffusion de couverts forestiers en basse fréquence (bande L et P) ont également été obtenues par ces approches (Dong *et al.* 1995; Lang *et al.* 1994). Ces modèles permettent de prendre en compte l'interférence entre diffuseurs, phénomène cohérent ou de corrélation entre les champs électriques qui ne peut être appréhendé que par la prise en compte de la phase du champ en relation avec le positionnement des diffuseurs dans le milieu. Finalement, les diffusions simples et doubles peuvent être prises en compte (Saatchi and McDonald 1997).

Comme nous l'avons vu auparavant, deux objectifs assignés au modèle sont de déterminer la contribution des divers mécanismes de rétrodiffusion, et d'identifier pour chacun quelle est la part respective issue des différents constituants du couvert forestier (tronc, branches de différents ordres, aiguilles, phénomènes cohérents....). Ainsi, au-travers de ce type de modélisation, des études théoriques récentes basées sur un modèle *full wave* dégradé et des mesures expérimentales (Moghaddam and Saatchi 1995) ont permis d'identifier l'importance relative des mécanismes de rétrodiffusion pour de jeunes et vieux peuplements de pins en forêt boréale à partir de données polarimétriques aéroportées haute fréquence (bande C) et basse fréquence (bande P et L).

La principale limitation de ce type de modélisation est qu'elle nécessite une description tridimensionnelle précise du milieu modélisé afin de tenir compte de la position absolue et relative des diffuseurs, permettant une conservation de la phase absolue du signal. Jusqu'à maintenant, une telle description était pratiquement inexistante limitant ainsi l'utilisation de cette approche.

De plus, l'approche cohérente n'est appropriée que pour les milieux faiblement diffusants, i.e. pour lesquels le coefficient de variation de la constante diélectrique est spatialement faible (Lee and Kong 1985 cité par Dobson *et al.* 1989).

6.2.2.2 Approche basée sur la théorie du transfert radiatif (radiative tranfer RT)

C'est l'approche utilisée dans cette étude (malgré que la précédente aurait pu l'être aussi, vu la restitution tridimensionnelle autorisée par AMAP). Il s'agit dans ce cas d'un développement énergétique des équations de Maxwell se traduisant en terme de puissance (intensité) et non de champ. Par conséquent l'information de phase absolue est perdue. Cette approche est particulièrement adaptée pour formuler l'absorption, la diffusion et l'émission naturelle de radiations à l'intérieur d'un volume remplie de particules élémentaires interagissant avec les ondes incidentes (Schanda 1978; Schanda 1986). Toutefois, le développement heuristique de cette théorie ne possède pas la rigueur mathématique de l'approche cohérente. Le développement découle du principe de conservation de l'énergie et sous hypothèse d'addition incohérente de *l'intensité spécifique* représentant la puissance moyenne émise par unité de surface (da) d'angle solide (d Ω) et d'intervalle de fréquence (dv) s'exprimant en W/m²/sr/Hz (Fung 1994).

De plus, si l'état complet de polarisation n'est pas considéré, l'intensité spécifique est dite scalaire (correspondant à la somme des deux premiers termes du vecteur de Stokes introduit au Chap. 2) et on parle d'équation scalaire du transfert radiatif, alors que la prise en compte de l'état de polarisation nécessite l'utilisation de l'ensemble des **paramètres du vecteur de Stokes**, on parle alors d'équation vectorielle du transfert radiatif (ou VRT pour *Vector Radiative Transfer*) (Kuga *et al.* 1990).

6.2.2.3 Principes et formulation de base du transfert radiatif

Le transfert radiatif repose tout d'abord sur le calcul de la diffusion par les diffuseurs élémentaires de forme simple comme des cylindres, incrustés dans le milieu multi-couche. On calcule ainsi la matrice de diffusion [S] (définie au Chap. 2) pour un cylindre donné, qui permet de caractériser comment l'énergie incidente est diffusée autour de celui-ci. Le calcul repose sur des bases complexes d'interaction électromagnétique, qui dépendent du rayon, de la longueur, de l'orientation et de la constante diélectrique du cylindre.

Pour une classe de cylindre représentant un type d'élément végétal, on calcule ensuite une matrice de diffusion moyenne en pondérant le calcul par la distribution en longueur, rayon et orientation des cylindres, pour une direction incidente θ , ϕ vers la direction quelconque de diffusion θ' , ϕ' .

$$< S(\theta,\phi;\theta',\phi') >= \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{rl}^{r2} \int_{ll}^{l2} S_{k}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot p(\phi)p(\theta)p(r)p(l) d\phi d\theta dr dl$$
(6-1)

ou en principe, les distributions sont rarement connues

Cette matrice moyenne permet ensuite de connaître les propriétés de diffusion et d'atténuation de cette classe de diffuseurs, au-travers de deux matrices, la matrice d'extinction et de phase.

La matrice d'extinction k_e représente l'atténuation de l'onde incidente par absorption et diffusion dans le milieu naturel contenant n_0 particules par unité de volume et prenant pour expression (Hsu *et al.* 1994) :

$$= \frac{2\pi n_0}{k} \begin{bmatrix} 2 Im < S_{hh} > 0 & Im < S_{hv} > Re < S_{hv} > \\ 0 & 2 Im < S_{vv} > Im < S_{hv} > -Re < S_{hv} > \\ 2 Im < S_{vh} > 2 Im < S_{hv} > Im < S_{vv} + S_{hh} > Re < S_{vv} - S_{hh} > \\ -2Re < S_{vh} > 2Re < S_{hv} > -Re < S_{vv} - S_{hh} > Im < S_{vv} + S_{hh} > Im < S_{vv} + S_{hh} > \\ \end{bmatrix}$$
(6-2)

où les termes <S> sont calculés avec l'équation dans la direction de propagation (π , π - θ).

Quant à la matrice de phase $\overline{P}(\theta, \phi, \theta', \phi')$, elle caractérise la diffusion du vecteur de Stokes par n_0 particules en provenance de la direction (θ', ϕ') vers la direction (θ, ϕ) avec comme expression :

$$\overline{P}(\theta,\phi,\theta',\phi') = n_0 M(\theta,\phi,\theta',\phi')$$
(6-3)

où M est la matrice de Stokes (cf Chapitre 2).

Afin de tenir compte de plusieurs classes de diffuseurs dans le milieu, on opère une sommation des matrices k_e et P de chaque classe

Ensuite, la formulation des équations du transfert radiatif dans le milieu multicouches incrustés de diffuseurs discrets est basée sur trois fonctions : 1) la matrice d'extinction, décrivant l'atténuation de l'intensité spécifique lors de la propagation de l'onde; 2) la matrice de phase, caractérisant le lien existant entre l'intensité incidente et diffusée dans n'importe quelle direction, et enfin 3) la fonction d'émission propre du milieu. Cette dernière est négligeable en télédétection radar active, tandis que les fonctions d'extinction et de phase sont de première importance et sont reliées directement aux propriétés géométriques et diélectriques comme nous venons de le voir (6-1), (6-2).

L'équation vectorielle du transfert radiatif appliquée dans chaque couche caractérisant le milieu forestier est une équation intégro-différentielle exprimant le taux de variation de l'énergie le long de la direction de propagation et prend la forme (Le Toan *et al.* 1992; Ulaby *et al.* 1986):

$$\cos\theta \frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{n}}(\theta,\phi,z)}{\mathrm{d}z} = -\overline{k}_{\mathrm{en}}(\theta,\phi,z) \cdot \overline{I}_{\mathrm{n}}(\theta,\phi,z) + \int_{4\pi} \mathrm{d}\Omega' \overline{P}_{\mathrm{n}}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{I}_{\mathrm{n}}(\theta',\phi',z)$$
(6-4)

avec n = 1,2,3...N couches, et \overline{I} est le vecteur de Stokes. Le premier terme du membre de droite rend compte de l'atténuation en propagation de l'intensité spécifique, alors que le deuxième terme traduit l'apport de l'intensité spécifique en provenance d'autres directions de l'espace et rendant compte de la diffusion.

La résolution de cette équation a pour objectif l'obtention de l'intensité totale diffusée (I_s) par le milieu illuminé, permettant ainsi de calculer le coefficient de rétrodiffusion à partir de l'intensité incidente (I_i) comme (Ulaby *et al.* 1982b):

$$\sigma^{\circ}_{pq} = 4\pi \cos(\theta) \frac{I_{sp}}{I_{iq}}$$
(6-5)

où p, q sont les polarisations H ou V. Dans le calcul de l'intensité diffusée I_s, on doit prendre en compte les différents mécanismes élémentaires contribuant à la rétrodiffusion :

diffusion de volume par les éléments végétaux (houppier, des troncs et du sol), diffusion de surface par le sol et finalement l'interaction entre la diffusion de volume et la réflextion de surface au sol, tel qu'illustré à la Figure 6-2. Une diffusion de volume originant d'une diffusion directe une à une des cylindres est dite diffusion du premier ordre, alors qu'une double diffusion issue de l'interaction entre 2 diffuseurs est dite du 2nd ordre, etc. Evidemment, plus l'ordre est élevé et plus le problème se complique. En général, les modèles s'arrête à l'ordre 1 pour des milieux peu denses.

Ensuite, on considère que ces différents mécanismes s'ajoutent les uns aux autres de façon soit incohérente (sans tenir compte d'effets cohérents de phase).



Figure 6-2 : Principaux mécanismes de rétrodiffusion. Exemple sur une forêt de pins noirs. O rétrodiffusion du sol σ°_{sol} , O diffusion de volume par les éléments végétaux σ°_{vol} , O diffusion-réflexion et son symétrique O réflexion-diffusion, due à l'interaction des éléments végétaux et du sol, et O réflexion-diffusion-réflexion, ces trois dénommés termes d'interaction σ°_{int} .

Ceci permet finalement d'exprimer le σ° total sortant du couvert à une seule couche comme étant la somme de ces termes, qui pour un couvert couvrant, est simplement :

$$\sigma^{0} = \sigma_{\text{vol}}^{0} + T^{2} \left(\sigma_{\text{sol}}^{0} + \sigma_{\text{int}}^{0} \right)$$
(6-6)

avec : σ^{0}_{vol} la diffusion de volume provenant des différents éléments végétaux : troncs, branches et aiguilles; σ^{0}_{inter} le terme d'interaction entre les éléments végétaux (troncs, branches, aiguilles) et le sol. T² est la transmission totale aller-retour au travers du houppier.

L'équation du transfert radiatif ne possède pas de solution analytique, et les méthodes itératives ou numériques sont les plus couramment utilisées pour leur résolution (Kuga *et al.* 1990). On procède par l'ordre 0, puis 1, 2, etc, ce qui permet d'obtenir une expression pour chacun des mécanismes de rétrodiffusion à l'ordre considéré, et s'exprimant

en fonction des termes de la matrice de phase et d'extinction. Certains de ces termes seront détaillés plus loin dans le cas du modèle du MIT/CESBIO.

Quant au terme de sol, plusieurs modèles calculant les contributions du sol dans le coefficient de rétrodiffusion ont été développés depuis plusieurs années. Les principales approches sont basées sur le modèle de Kirchoff (Hsu *et al.* 1994; Peake 1959; Ulaby *et al.* 1982a) et plus récemment IEM (Integral Equation Model) (Fung 1994), tenant compte de la rugosité de surface et de la constante diélectrique.

6.2.2.4 Domaine de validité

La mise en œuvre des équations du transfert radiatif nécessite néanmoins certaines hypothèses *a priori* (Picard 1997) que l'on vérifiera dans les conditions de site abordées dans cette étude :

• le milieu ne doit pas être fortement diffusant, et doit donc présenter de faibles fluctuations spatiales de permittivité diélectrique, liées à la densité du milieu et à la constante diélectrique de ses composantes ; ceci se décrit par le coefficient de variation de la permittivité diélectrique donné par :

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{(\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\rm m})^2}{\varepsilon_{\rm m}^2} \, v_{\rm f} \tag{6-7}$$

où ε_s est la permittivité diélectrique des diffuseurs, ε_m la permittivité moyenne et v_f la fraction de volume occupé par les éléments végétaux dans le couvert pour tenir compte de leur densité (% de l'espace occupé). Dans le cas de nos peuplements, cette fraction de volume est faible et inférieur à 0,1%, et il en résulte un σ_{ε} de l'ordre de 0.5, dans ces conditions, le milieu peut être considéré peu diffusant;

- la prise en compte nécessaire de diffusions multiples en fonction de la densité du milieu ; lorsque V_f reste inférieur à 0,1%, pour (Ishimaru 1978) cité par (Mougin 1989) c'est la diffusion de 1^{ier} ordre qui prédomine. Pour les milieux plus denses, des phénomènes de diffusion multiple entre particules ne peuvent plus être négligés, en particulier en polarisation croisée HV, alourdissant considérablement le temps calcul. Sur notre site, V_f est inférieur à 0,1%, nous pouvons considérer que la diffusion du 1^{er} ordre;
- le découpage en couches horizontales successives du milieu forestier par l'approche discrète suppose, d'une part que l'on considère a priori la couche homogène verticalement et horizontalement (symétrie azimutale dans le plan horizontal), ce qui est loin d'être rencontré dans tous les types de milieux forestiers. Dans notre cas, et comme nous l'avons montré au Chapitre 4, le milieu peut être considéré comme isotrope azimutalement au niveau de l'arbre, évitant les effets de structure en relation avec la direction de visée du RSO. Dans le cas d'un couvert discontinu ou à structure périodique (sylviculture en ligne), une correction peut être introduite ad hoc (McDonald and Ulaby 1993; Sun et al. 1991; Whitt and Ulaby 1994) mais ne sera pas nécessaire ici ;
- pour le calcul de la matrice de diffusion des diffuseurs (cf Chapitre 2), différentes approximations peuvent être utilisées en fonction de la taille des diffuseurs par rapport à la longueur d'onde. Ainsi, dans le cas de cylindres diélectriques, si le rayon a est petit devant la longueur d'onde λ traduite par le nombre d'onde $k=2\pi/\lambda$, c'est-à-dire ka << 1, l'approximation liée à la diffusion dite de Rayleigh pour le calcul de la matrice de diffusion est utilisée (Karam *et al.* 1988; Kastler 1992). Dans notre cas, les données de rayons des cylindres mesurés oscillent entre 0,5 mm (aiguilles) et 200 mm (troncs) et

nous utilisons les bandes L ($\lambda = 25$ cm) et C ($\lambda = 5$ cm). Dans ce cas, les variations du paramètre ka vont de 0,06 à 24, entraînant que l'hypothèse de l'approximation de Rayleigh n'est pas toujours vérifiée, surtout en bande C. Un calcul plus rigoureux est alors proposé par (Karam and Fung 1988) en approximant le cylindre de longueur finie par un cylindre similaire de longueur infinie à partir du moment où la longueur est supérieure à 5 fois le rayon, ce qui est largement vérifié sur nos données.

Les caractéristiques du site montrent qu'elles répondent à l'ensemble des critères d'application des équations du transfert radiatif.

6.3 Le modèle du MIT/CESBIO : un modèle hybride

Les principaux modèles basés sur la théorie du transfert radiatif et simulant l'interaction d'une onde radar avec un milieu forestier sont développés en majorité aux Etats-Unis. Parmi ces modèles figurent principalement celui développé conjointement par le MIT et le CESBIO (Hsu *et al.* 1994), celui de l'université du Texas communément appelé modèle de Karam et Fung,(Karam *et al.* 1992) et le modèle MIMICS développé par l'université du Michigan (Ulaby *et al.* 1990).

Ces modèles sont dans leurs fondements assez similaires par rapport aux principes énoncés ci-dessus. Sans être exhaustif, ils différent quelque peu dans :

- la caractérisation du milieu utilisée : nombre de couches, discontinuité horizontale ou pas de celles-ci, représentation des diffuseurs par des formes plus ou moins simples en un nombre de classes variable, milieu aléatoire ou structuré selon l'architecture, etc...
- la formalisation des interactions électromagnétiques : modèle utilisé pour le calcul de la matrice de phase, pour la pondération sur les distributions des paramètres, prise en compte d'effets cohérents, modèle de diffusion du sol ...
- la solution des équations du transfert radiatif : ordre de la résolution, méthode numérique, prise en compte des différents mécanismes de rétrodiffusion...

6.3.1 Choix du modèle du CESBIO

Notre choix s'est porté sur le modèle du MIT/CESBIO, qui est similaire aux autres cités ci-dessus et qui en a été largement le précurseur. Le choix de ce modèle réside dans sa capacité existante, ou développée dans le cadre de cette étude à prendre en compte différents phénomènes observés ou supposés sur notre milieu forestier, à savoir :

- les effets cohérents due à l'interférence possible des diffuseurs organisés selon l'architecture de la plante;
- la prise en compte de l'hétérogénéité verticale du couvert par le découpage du milieu en plusieurs strates horizontales ;
- la prise en compte de la topographie via la pente et l'azimut du terrain.

Par ailleurs, le LCT a un historique de collaboration avec le CESBIO sur ce type de modélisation et ce travail de thèse est en continuité directe avec celle-ci (Beaudoin *et al.*, 1994), d'autre part, la proximité des deux équipes et du site d'étude optimise grandement la collaboration dans cette étape délicate de modélisation théorique.

Nous présentons dans ce qui suit successivement la caractérisation du milieu utilisée par le modèle et les quelques spécificités du modèle par rapport aux principes et équations du transfert radiatif énoncés auparavant.

6.3.2 Caractérisation du milieu

A la base, le modèle utilise 3 couches pour décrire le milieu forestier à savoir : une couche de houppier, une couche de tronc élagué et une couche pour la végétation arbustive, le tout positionné au dessus d'une surface rugueuse de sol. Dans notre cas, la végétation arbustive sous-jacente est peu abondante, la description de base est ramenée à un modèle bi-couches (Figure 6-3), avec une seule couche pour le houppier. Par la suite, on peut décomposer ce houppier en plusieurs couches pour prendre en compte l'hétérogénéité verticale.



Figure 6-3 : Configuration de base du modèle MIT/CESBIO à deux couches pour les peuplements de pins noirs d'Autriche.

Dans chaque couche, les différents éléments végétaux : tronc, branches d'ordres successifs et aiguilles, sont représentés par autant de classe de diffuseurs. Ces diffuseurs, dans le cas de résineux, peuvent raisonnablement être représentés par des cylindres diélectriques, dont la taille est caractérisée simplement par le rayon et la longueur. Quant à l'arrangement spatial, il est dans la plupart des modèles représenté par l'orientation des diffuseurs via 2 angles (élévation et azimut), ainsi que par la densité volumique no. Le positionnement relatif entre classe de diffuseurs et absolu dans la couche n'est alors pas pris en compte. Ainsi, cette représentation est insuffisante pour représenter l'architecture de l'arbre, car elle ne tient pas compte de la hiérarchie des différents éléments végétaux et de leur positionnement relatif entre eux. C'est ainsi que le modèle a la particularité d'utiliser une représentation de l'architecture par un **agrégat multi-échelle de diffuseurs diélectriques**, c'est-à-dire un assemblage organisé de diffuseurs reliés entre eux en allant successivement du tronc, aux branches d'ordre croissant jusqu'aux aiguilles. Cette représentation, plus réaliste, permet également d'alimenter la partie du modèle, dite *branching model*, tenant compte d'effets cohérents et décrite plus loin.

Dans ce cas, par rapport aux autres modèles, l'arrangement spatial de chaque classe de diffuseurs, illustré à la Figure 6-4 est cette fois-ci représenté par :

• l'angle d'insertion relatif β à la classe de diffuseurs d'ordre immédiatement inférieur, par exemple, l'angle d'insertion des branches primaires par rapport au tronc; cette représentation permet par construction successive de connaître également les angles d'orientation en élévation et azimut de tous les diffuseurs, nécessaire à la modélisation;

• La densité linéaire ρ (n/m) des diffuseurs toujours par rapport à l'ordre immédiatement inférieur, par exemple la densité linéaire des branches primaires par rapport au tronc (nombre de branches par mètre de tronc). Elle est estimée connaissant les effectifs de branche et la profondeur de la strate. Cette représentation permet également par construction successive et connaissant la densité de tronc à l'hectare ρ_t (n/m²) de remonter à la densité volumique n_0 des diffuseurs (n/m³) nécessaire à la modélisation pour le calcul des matrices d'extinction et de phase.



Figure 6-4 : paramètres géométriques utilisés dans la modélisation électromagnétique, ici un exemple sur les branches d'ordre 1.

In fine, la Figure 6-5 présente la caractérisation du milieu multi-couches au-dessus d'un sol rugueux, utilisée par le modèle MIT/CESBIO et obtenue à l'aide d'AMAP2SAR et d'autres sources



Figure 6-5 : Description globale d'un arbre pouvant alimenter un modèle électromagnétique comme celui du MIT/CESBIO, sous la forme d'une collection de cylindres diélectrique appelée "agrégats multi-échelle de diffuseurs".

6.3.3 Equations du transfert radiatif appliquées au milieu forestier en agrégat

Le propos ici n'est pas de rentrer dans la formulation complète et de surcroît lourde du modèle, mais de rester à un niveau de détail permettant d'en saisir à la fois les bases communes à tous les modèles de RT ainsi que ses spécificités. Le modèle (Hsu 1996) allie une formulation basée sur l'application des équations vectorielles du transfert radiatif (VRT) sur le milieu multi-couches, complétée par un calcul de l'amplitude de diffusion de la structure en agrégat tel que nous venons de la voir, afin de tenir compte d'éventuels effets cohérents (Yueh *et al.* 1992). C'est pourquoi l'on parle d'un modèle hybride, c'est-à-dire basée sur le transfert radiatif mais prenant en compte partiellement de effets cohérents abordés plus rigoureusement par les modèles *full wave*.

Comme les permittivités moyennes de chacune des couches sont voisines, la réfraction et la réflexion entre les différentes couches peuvent être négligées, sauf pour le sol. Sous ces hypothèses, l'intensité de l'onde descendante arrivant de la couche n-1 est égale à celle de l'onde incidente arrivant sur la couche n. Cette hypothèse est considérée valide pour la végétation (Hsu 1996; Karam *et al.* 1992; Ulaby *et al.* 1990) du fait des proches valeurs de permittivité de l'air et de la végétation. Quant à l'interface du sol (z=-D), elle est décrite par la matrice de réflexion calculée au moyen du modèle de Kirchhoff.

Les solutions itératives de l'équation de transfert radiatif sont calculées en supposant la prépondérance des effets d'extinction sur la diffusion. Ainsi, le premier terme de l'équation (6-4) est dominant et la solution d'ordre 0 est obtenue en ignorant le deuxième terme dû aux diffusions provenant d'autres directions que la direction de propagation. La solution d'ordre 1 est alors calculée en substituant la solution d'ordre 0 de l'intensité spécifique dans l'intégrale de l'équation (6-4). Ce schéma est répété pour l'obtention des solutions d'ordres supérieurs et la solution peut ainsi être décomposée en série selon :

$$\bar{I}_{n}(\theta,\phi,z) = \bar{I}_{n}^{0}(\theta,\phi,z) + \bar{I}_{n}^{1}(\theta,\phi,z) + \bar{I}_{n}^{2}(\theta,\phi,z) + \dots \dots$$
(6-8)

 \bar{I}'' correspond à l'intensité incidente atténuée par les particules de la couche végétale, \bar{I}' correspond à la diffusion de premier ordre, et ainsi de suite. En général, seules les solutions d'ordre 0 et 1 sont calculées car au delà le temps calcul devient très vite prohibitif, et leur contribution au signal rétrodiffusé est souvent négligeable dans le cas de milieux peu denses comme la forêt.

Dans le cas de couverts forestiers de conifères, le modèle repose sur une seule forme de base : le cylindre diélectrique homogène de longueur finie modélisant les différents constituants du couvert (tronc, branches, aiguilles). C'est à partir de cette forme de base que sont calculés les éléments de la matrice de phase, qui correspondent à l'amplitude de diffusion des cylindres de chaque ordre moyenné sur leurs distributions en taille (rayon, longueur) et orientation (incidence, azimut) comme nous l'avons vu auparavant. En principe, les fonctions de densité de probabilité (fdp) des paramètres sont rarement connues pour l'ensemble des classes de diffuseurs. Le modèle du MIT/CESBIO, utilise la fdp d'orientation pour la classe de diffuseurs des branches primaires, tandis que pour les autres paramètres et les autres diffuseurs, ils sont caractérisés par une valeur moyenne affublée d'un écart type. On peut donc voir dès à présent l'intérêt que représente le modèle AMAP pour obtenir ces distributions ou statistiques du l^{er} ordre.

D'autre part, il ressort de l'équation (6-3) que le calcul de l'amplitude de diffusion moyenne est une sommation incohérente des différentes classes de diffuseurs ne tenant aucunement compte de leur position relative. Ainsi, une des originalités du modèle du MIT/CESBIO est sa capacité à tenir compte de la position relative des diffuseurs par une représentation en agrégat ("cluster" Figure 6-5) permettant d'intégrer dans le calcul du σ^0 certains effets cohérents et ce, au travers du "branching model" (Yueh *et al.* 1992).

6.3.4 Calcul cohérent : le "branching model"

Pour un agrégat de cylindre (Figure 6-4) avec un cylindre central (tronc) et N cylindres agrégés (branches et aiguilles), l'amplitude totale de diffusion S_{pq} est :

$$S_{pq} = S_{0pq} + \sum_{n=1}^{N} S_{npq}^{ej\phi_n}$$
 (6-9)

où S_{0pq} et S_{npq} sont respectivement l'élément pq de la matrice de diffusion du cylindre central et du n^{ième} cylindre agrégé, pq représentant les polarisations horizontale (h) et/ou verticale (v). ϕ_n représente la phase relative du n^{ième} cylindre par rapport au cylindre central en fonction de leur position relative, s'écrivant par le produit scalaire :

$$\phi_{n} = \left(\overline{k}_{i} - \overline{k}_{s}\right) \cdot \overline{r}_{n} \tag{6-10}$$

avec \bar{k}_i et \bar{k}_s les vecteurs de l'onde incidente et diffusée et \bar{r}_n le vecteur position du n^{ième} cylindre par rapport au cylindre central. Tout est donc ramené au cylindre central où est réalisée la sommation cohérente (en phase) des ondes provenant de tous les cylindres agrégés. Sous hypothèse forte d'équipartition linéaire et d'indépendance des positions des diffuseurs, (Yueh *et al.* 1992) donne l'approximation pour les produits croisés nécessaires à la constitution de la matrice de phase :

$$< S_{\alpha\beta}S_{\gamma\delta}^{*} > = < S_{0\alpha\beta}S_{0\gamma\delta}^{*} > + N < S_{n\alpha\beta}S_{n\gamma\delta}^{*} > + N < S_{0\alpha\beta} > < S_{n\gamma\delta}^{*} > < e^{-i\phi_{n}} > + N < S_{0\alpha\beta}^{*} > < S_{n\gamma\delta} > < e^{+i\phi_{n}} > + N(N-1) < S_{m\alpha\beta} > < S_{n\gamma\delta}^{*} > < e^{-i\phi_{n}} >$$

$$(6-11)$$

 α , β , δ et γ = h ou v. Sur la première ligne sont présentés les termes incohérents (sans tenir compte de la phase), la deuxième et troisième ligne représentent les termes cohérents (tenant compte de la phase). La modification de la matrice de phase qui en résulte doit s'accompagner d'une modification de la matrice d'extinction afin de respecter la conservation de l'énergie (Hsu 1996).

6.3.5 Solutions du premier ordre des équations RT et mécanismes de rétrodiffusion

L'ensemble des mécanismes présentés à la Figure 6-2 se dérivent de la solution numérique itérative jusqu'à l'ordre 1 des équations du transfert radiatif vectoriel, incluant le branching model. Ces mécanismes s'expriment simplement en fonction des termes pq de la matrice d'extinction ou de phase. Par exemple, pour une couche de houppier avec une seule classe de diffuseurs, la rétrodiffusion de volume est donnée par :

$$\sigma^{\circ}(\theta)_{pqv} = \frac{4\pi n_0 \cos(\theta) < \left|S_{pq}(\theta, \pi - \theta)\right|^2 >}{\left(Ke_p + Ke_q\right)} \left[1 - \exp\left(-\left(Ke_p + Ke_q\right)H_c \sec(\theta)\right)\right]$$
(6-12)

L'amplitude de diffusion est pondérée par un facteur de perte (terme entre crochet) qui est le résultat de l'intégration du facteur d'atténuation associé au volume pour une hauteur de couronne Hc. K_e est le coefficient d'extinction donné par :

$$\operatorname{Ke}_{p(q)} = \sum_{k=0}^{k} \frac{4\pi n_{0_{k}}}{k_{0}} < \operatorname{imS}(\pi - \theta, \pi - \theta)_{p(q)_{k}} >$$
(6-13)

Le coefficient de rétrodiffusion du sol représenté par la solution d'ordre 0 est atténué deux fois par le couvert forestier et prend pour expression :

$$\sigma_{pqs}^{0} = \sigma_{pqs} \cdot T^{2} \text{ ou encore}$$

$$\sigma_{pqs}^{0} = \sigma_{pqs} \cdot \exp\left[-\left(Ke_{pc} + Ke_{qc}\right)H_{c}\sec(\theta)\right] \cdot \exp\left[-\left(Ke_{pt} + Ke_{qt}\right)H_{t}\sec(\theta)\right]$$
(6-14)

 σ_{pqs} représente le coefficient de rétrodiffusion du sol calculé à partir du modèle de Kirchhoff. Les termes exponentiels représentent l'atténuation aller-retour du couvert forestier pour la couronne (c) et les troncs (t). Les solutions correspondant aux autres mécanismes de la Figure 6-2 sont détaillées en annexe de ce chapitre.

Après cette présentation du modèle du MIT/CESBIO couplé au modèle AMAP présenté au chapitre 5 permettant la caractérisation du milieu, nous utilisons cette modélisation couplée afin d'interpréter les résultats expérimentaux exposés au chapitre 4. Examinons tout d'abord en détails la méthodologie de modélisation adoptée, avant d'aborder les résultats de simulations en terrain plat et accidenté.

6.4 Approche méthodologique de modélisation

La Figure 6-6 présente la méthodologie utilisée se déroulant en trois grandes étapes :

- 1. caractérisation par AMAP du milieu forestier en terrain accidenté vu par un RSO ;
- 2. simulation du coefficient de rétrodiffusion avec le modèle du MIT/CESBIO, confrontation aux données expérimentales et interprétation physique ;
- 3. Prise en compte de l'interprétation physique en vue de la validation du modèle semiempirique de correction des effets angulaires et du développement d'un modèle d'inversion semi-empirique.



Figure 6-6 : Approche méthodologique de couplage du modèle AMAP avec le modèle MIT/CESBIO, se déclinant en trois étapes.

6.4.1 Caractérisation du milieu

La première étape consiste à fournir sur le site d'étude une **représentation du milieu forestier** en terrain plat et accidenté qui soit exploitable par le modèle théorique, tel que nous l'avons définie auparavant et représentée à la Figure 6-5. Il faut dans un premier temps fournir l'ensemble des paramètres électromagnétiques concernant le couvert lui-même (pfor), à savoir les paramètres géométriques et diélectriques. Tout d'abord, nous utilisons l'interface AMAP2SAR pour fournir l'ensemble des paramètres géométriques caractérisant les agrégats de diffuseurs (Figure 6-5). Puisque nous nous intéressons à la sensibilité du signal radar aux paramètres forestiers évoluant avec l'âge, cette représentation sera donc réalisée en fonction de l'âge du couvert. Il faut aussi représenter la géométrie de la surface du sol sous-jacent, soit sa rugosité représentée par la hauteur RMS H_{rms} et la longueur de corrélation l, via des observations et des données de la littérature.

Ensuite, il faut caractériser les propriétés diélectriques du couvert ainsi que du sol. La constante diélectrique moyenne des différentes classes de cylindres et celle du sol sont obtenues à partir des mesures de teneur en eau injectées dans des modèles adaptés de constante diélectrique décrits plus loin.

La composante topographique du milieu est prise en compte via le modèle numérique d'élévation, permettant de dériver deux paramètres topographique (ptopo), à savoir la pente et l'azimut locaux, pour chaque pixel des images RSO.

Finalement, les paramètres de prise de vue RSO (prso) à injecter dans le modèle sont : la fréquence (bandes L et C), la polarisation pq (HH, HV ouVV), l'incidence θ et la direction de visée ϕ du RSO.

Evidemment, cette caractérisation du milieu n'est pratiquement réalisable que sur une portion réduite de l'espace. Elle se fait sur les deux jeux d'unités élémentaires homogènes utilisées au Chap. 4, pour lesquelles nous disposons en totalité ou partiellement de toutes les données nécessaires pour dériver les paramètres décrits ci-dessus.

6.4.2 Simulation et interprétation physique

L'étape de simulation proprement dite vise à simuler le coefficient de rétrodiffusion radar en fonction des paramètres forestiers, topographiques et RSO. Ces simulations sont alors confrontées aux observations disponibles sur les unités élémentaires. Il est à noter que l'on utilise les données RSO ayant subies le premier niveau de post-traitement topographique, à savoir les données RSO de départ β° qui ont été étalonnées en présence de relief via la normalisation de l'aire du pixel en terrain accidenté, soit $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$. Ainsi, cette quantité conserve sa dépendance physique à la topographie que l'on cherche à reproduire et comprendre via le modèle théorique. Il est à noter que nous exprimons expérimentalement σ° uniquement en fonction du seul angle θ_{loc} , valable sous hypothèse de symétrie azimutale du couvert forestier, alors que la modélisation théorique prend en compte la pente et l'azimut du terrain entrant dans le calcul de θ_{loc} .

Les simulations sont en premier lieu réalisées sur un **modèle bi-couche**, soit la version initiale avec **une seule couche pour le houppier** (Figure 6-3). C'est l'approche qui a été la plus utilisée jusqu'ici dans la plupart des travaux de modélisation théorique qui est reprise ici afin d'en évaluer le domaine de validité et surtout ses limites. L'écart ou le bon ajustement entre les observations et les simulations est alors interprété et analysé grâce à un premier outil fourni par le modèle théorique, à savoir la décomposition des divers mécanismes de rétrodiffusion, au sein desquels peuvent être précisées les principales sources de la rétrodiffusion : sol, tronc, houppier, et dans ce dernier cas, les éléments végétaux prédominants dans la réponse radar : branches de différents ordres et aiguilles.

Dans la mesure où le modèle bi-couche s'avère insatisfaisant à reproduire les mesures, parce que limité pour décrire la variabilité verticale dans le houppier comme nous l'avons vu au Chapitre 5, ou bien pour s'assurer tout simplement qu'il ne s'agit pas tout simplement de hasard lorsque l'ajustement semble bon, on réitère la modélisation en :

- augmentant la précision de la représentation géométrique du couvert grâce à la puissance d'AMAP permettant une caractérisation verticale en plusieurs couches;
- modifiant le modèle théorique pour s'accommoder d'un nombre de couches croissant dans le houppier ;
- simulant à nouveau la réponse radar, etc.

Par la suite, on dispose alors d'un nouvel outil d'analyse amélioré et puissant, à savoir la décomposition du signal non seulement selon les différentes sources de rétrodiffusion décrites ci-dessus, mais également en fonction de la profondeur z dans le couvert.

Lorsqu'un niveau satisfaisant de conformité avec les observations est atteint, on peut passer à une phase d'interprétation physique pour en faire une synthèse et en tirer les conclusions sur la nature du lien existant entre la réponse radar, les paramètres forestiers et topographiques, tel qu'abordé à la Figure 6-1.

6.4.3 Modélisation semi-empirique

La dernière étape est d'intégrer ces enseignements dans le développement d'une approche d'inversion à l'aide d'un ou de modèles semi-empiriques. On cherchera tout d'abord à éliminer au mieux l'influence des paramètres topographiques (ptopo) sur le signal radar, via un modèle semi-empirique faisant intervenir les paramètres topographiques et un minimum d'autres paramètres, voire idéalement aucun, liés au type de terrain imagé. Cette modélisation sera évidemment d'autant plus aisée que la modélisation théorique aura permis d'isoler un mécanisme simple de comportement angulaire de la rétrodiffusion. Le but étant d'obtenir un coefficient de rétrodiffusion équivalent au cas d'un terrain plat.

Par la suite, la finalité est évidemment d'obtenir un modèle d'inversion semiempirique de la réponse radar en paramètres forestiers recherchés, au moins valable pour les conditions de site abordées expérimentalement en termes de stade de croissance de l'espèce considérée, et de la topographie.

Dans un premier temps, ce modèle doit se construire sur la base des mécanismes de rétrodiffusion isolés et des principales caractéristiques des diffuseurs concernés par ces mécanismes. L'approche la plus logique consiste à réaliser une étude de sensibilité de la réponse radar aux paramètres affectant le mécanisme isolé. Ensuite, on peut pointer les paramètres n'ayant peu ou pas d'influence pour tenter de simplifier l'expression mathématique du ou des mécanismes physiques. Une autre approche est de tenter de relier l'écho radar directement au(x) paramètre(s) impliqués à l'aide de relations ajustées sur les données simulées par l'étude de sensibilité et faisant intervenir un minimum de paramètres de calage.

Dans un deuxième temps, la relation semi-empirique déduite entre l'écho radar et les paramètres identifiés, doit intégrer le lien qui existent entre ces derniers et les paramètres forestiers recherchés, lien connu ou à établir par une approche par exemple allométrique ou autre.

Prenons l'exemple d'un cas hypothétique où le principal mécanisme de rétrodiffusion isolé serait la diffusion par les troncs, lui-même affecté essentiellement par la densité de tiges et leur diamètre ; on peut réaliser une étude de sensibilité à ces deux paramètres, en déduire des relations semi-empiriques, et ensuite relier les deux paramètres concernés à une quantité comme la surface terrière qui fait intervenir la section du tronc (donc le diamètre) et la densité de tiges. Par la suite, on peut essayer de relier directement par assemblage en un seul modèle semi-empirique l'écho radar à cette section terrière.

On voit bien que ce modèle d'inversion aura un caractère hybride que l'on qualifiera de biophysique, terme couramment utilisé en télédétection et en particulier en radar vu les aspects à la fois biologiques et physiques mis en jeu dans le signal. Ce modèle sera d'autant plus simple que l'on aura trouvé la ou les configurations radar qui permettent d'avoir un lien le plus direct possible avec le paramètre recherché.

A plus long terme, on cherchera ainsi à participer au développement d'approches d'inversion en paramètres forestiers pour des conditions forestières et environnementales certes les plus larges possibles, par complexification des sites expérimentaux abordés intégrant les enseignements tirés des études précédentes, mais également les plus précises dans leur domaine de validité.

Le travail de modélisation reporté dans ce qui suit a été réalisé en deux étapes : dans un premier temps, nous nous sommes confinés au cas du terrain plat, et dans un deuxième temps, la modélisation a été complexifiée par ajout de la composante topographique.

6.5 Simulation et interprétation : cas du terrain plat

6.5.1 Stratégie et conditions de simulation

De façon générale, la simulation doit recouvrir le plus largement possible le domaine des paramètres forestiers en fonction de l'âge des peuplements ainsi que les conditions topographiques, comme le montre la Figure 4-8 (*cf* Chapitre 4). Vu la relative complexité des phénomènes physiques mis en œuvre et la nouveauté de l'approche de couplage d'un modèle architectural d'arbre et d'un modèle théorique de rétrodiffusion radar, on se confinera en premier au cas du terrain plat voire peu pentu (< 10°), de façon à :

- s'affranchir largement de l'effet topographique, que l'on peut considérer négligeable dans ces conditions de faibles pentes (à confirmer par la suite) ;
- se familiariser avec la nouvelle approche de modélisation multi-couches et l'interprétation physique qui en découle.

Dans ce cas, on dispose de 46 des 58 unités élémentaires homogènes en terme d'observations. On se souviendra que ces unités (cf Chapitre 3) ont la propriétés suivantes :

- homogénéité en âge et structure horizontale (pas de trouées significatives) ;
- situation topographique homogène (pas de vallons par exemple) ;
- superficie de cette unité homogène suffisante pour estimer $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ de façon satisfaisante en présence du bruit du speckle.

Sur ces 46 unités, on pourrait simuler un σ° pour chacune d'elle, en injectant tous les paramètres qui lui sont propres. Cependant, on s'intéressera plutôt à reproduire la tendance de σ° en fonction du stade de croissance du pin noir sur le site et donc de l'âge. En effet, les écarts à la tendance sur le site pour certaines unités, parfois liés à certaines particularités dendrométriques, topographiques, à la sylviculture..., peuvent induire des erreurs sur les liaisons physiques prépondérantes sur le site entre paramètres et écho radar. Dans ce cas, on réalisera les simulations à différents âges avec un incrément. L'âge est utilisé pour piloter AMAP, qui donnera ainsi en quelque sorte une représentation moyenne des arbres constituant les peuplements de cet âge et dans les conditions stationnelles abordées du site. Reste ensuite à injecter la densité de tige mesurée sur l'unité, nécessaire à la prise en compte de la densité de chaque classe de diffuseurs comme nous l'avons vu.

Rappelons qu'au départ, une modélisation classique bi-couche est utilisée (une couche dans le houppier). On se focalisera ensuite sur la modélisation multi-couches à des âges pour lesquels une réelle variabilité verticale est observée (> 20 ans) et en particulier à 2 stades clefs observés, à savoir autour de 24 et 36 ans, âges entre lesquels une modification significative de l'architecture et de la géométrie a été observée et ayant un impact potentiel sur la réponse radar. Rappelons qu'au-delà, les simulations n'ont pas été réalisées puisque le modèle AMAP a été validé jusqu'à 45 ans pour l'instant. De toute façon, on comprendra que la modélisation au-delà de cet âge présente moins d'intérêt, puisque pour les configurations radar abordées, le signal ne présente malheureusement plus de sensibilité au stade de croissance.

Vu le niveau d'avancement certes conséquent mais partiel de la modélisation par couplage avec AMAP, dû à l'importance des développements impliqués à la fois dans AMAP2SAR et dans le modèle MIT/CEBIO, le principal travail réalisé par modélisation a été de mieux interpréter le lien physique entre la rétrodiffusion radar et les paramètres forestiers que ce qui a pu être fait dans le passé. La phase réelle de modélisation semiempirique pour l'inversion devra être abordée par la poursuite du travail de cette thèse grâce à une modélisation plus systématique en fonction des conditions forestières et des configurations RSO abordées expérimentalement.

Nous présentons successivement, le résultat de caractérisation du milieu, les simulations et interprétations pour les approches bi-couches et multi-couches, et une synthèse de l'interprétation physique.

6.5.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier

On se reportera à la Figure 6-5 qui reprend schématiquement la représentation d'un milieu forestier en termes géométriques et diélectriques manipulables par le modèle MIT/CESBIO, sous la forme d'agrégats multi-échelle de cylindres diélectriques représentant les arbres.

Le Tableau 6-1 résume la caractérisation du milieu forestier qui a été réalisée, en fonction de la capacité actuelle du modèle du MIT/CESBIO à ingérer des descriptions plus ou moins précises du milieu en terme de distribution de paramètres. Encore une fois, il est à noter que toute la capacité d'AMAP n'a pu être exploitée, puisque tous les modèles théoriques sans exception ne sont pas encore à un stade suffisant de développement pour tenir compte de toute la complexité du milieu, en particulier de la courbure des branches.

Couche	paramètre s	classes diffuseurs	paramètres	unités	stats	source
	profondeur	aiguilles	rayon	cm	1	m+A
			longueur	cm	1	m+A
			densité linéaire	n/m	1	m+A
			angle insertion	deg	1	m+A
			cste diélectrique		3	m+MU
NIEME		branches	rayon	cm	1	А
COUCHE		d'ordre n :	longueur	cm	1	A
HOUPPIER		BO1, BO2,	densité linéaire	cm	1	A
		BO3, BO4	angle insertion	deg	2	A
			cste diélectrique		3	m+MU
		tronc dans	rayon	cm	1	A+m
		le houppier	longueur	cm	1	A+m
			densité	n/m2	1	A+m
			surfacique		1	A+m
			cste diélectrique		3	m+U
TRONC	profondeur	tronc	rayon	cm	1	A+m
			longueur	cm	1	A+m
			densité	n/ha	1	m
ELAGUE			surfacique			m
			cste diélectrique		3	m+U
	milieu	interface	hauteur RMS	cm	3	o+1
SOL	semi-infini	sol/air	long. Corrélation	cm	3	o+1
			cste diélectrique		3	m +H

Tableau 6-1 : Résumé des paramètres pour la modélisation théorique, par couche et par classe de diffuseurs, incluant les sources d'obtention.

Légende : stats et fdp :

1- moyenne et écart-type + loi uniforme source :A : AMAP

2- histogramme sans fdp 3- moyenne seule sans fdp m : mesures in-situ

- o: estimation de visuelle
- l: littérature
- U: modèle Ulaby el-Rayes (1987)
- H : modèle sol Hallikainen 1985)

6.5.2.1 Caractérisation géométrique

6.5.2.1.1 couvert forestier

L'âge a été tout d'abord utilisé pour piloter AMAP. Pour chaque âge une vingtaine d'arbres sont simulés, transformés par l'interface AMAP2SAR en collection de cylindres sur laquelle on obtient les histogrammes et statistiques du 1^{er} ordre des paramètres, en fonction du découpage en couches horizontales. Le milieu forestier a été simulé successivement avec un houppier à une, deux et finalement plusieurs couches de 20 cm d'épaisseur, avec dans tous les cas une seule couche pour les troncs élagués.

Caractérisation du houppier

Revenons sur la caractérisation du houppier en termes géométriques et architecturaux, qui est la phase la plus délicate et généralement déficiente dans les approches de modélisation menées jusqu'à présent. Outre le fait qu'AMAP nous permet de remonter aux statistiques du 1^{er} ordre de chacun des paramètres, ce qui ne pouvait être fait que grossièrement et laborieusement par le passé, une caractérisation plus fine peut être obtenue en utilisant directement les histogrammes des paramètres. Dans la version actuelle du modèle MIT/CESBIO, seuls les histogrammes d'angles d'insertion relatifs de chaque ordre de branches ont pu être exploités entièrement, et sont représentés à la Figure 6-7 en fonction de l'âge.

Elle y fait apparaître un angle d'insertion relativement constant pour les ordres 2 à 4, centré autour de 85°. Par contre, on notera l'évolution marquée de l'histogramme pour les branches d'ordre 1 (Figure 6-7a). Dans ce cas, on observe que le mode de l'histogramme pour de jeunes peuplements est tout d'abord centré sur 75° avec une faible dispersion, pour ensuite décroître vers 65° vers 28 ans. A partir de là, le mode remonte vers 85° avec une augmentation de la dispersion. Le comportement de l'angle d'insertion des branches primaires est primordial pour la prise en compte de l'architecture globale du houppier, puisqu'il conditionne tous les autres ordres et donc affecte leur orientation spatiale dans le houppier.

Jusqu'à maintenant, on utilisait des lois de distribution théoriques plus ou moins validées pour représenter la distribution de l'orientation des branches (Lopes *et al.* 1991; Mougin *et al.* 1990a). Or, les histogrammes montrent que ces distributions ne sont pas toujours justifiées car trop simplistes. Ainsi, l'utilisation d'histogrammes des angles d'insertion issus d'AMAP représente une avancée significative en modélisation pour la prise en compte de l'architecture du couvert.

Pour les autres paramètres, le modèle utilise pour l'instant les statistiques du 1^{er} ordre moyenne et écart-type. On se reportera aux figures 5-25 et 5-26 du chapitre 5 illustrant les résultats, où les moyennes des paramètres sont représentés soit pour tout le houppier, soit en fonction de la profondeur dans le houppier. On y retrouve pour chaque couche les diamètres donnant les rayons r, les longueurs l utilisables directement, le nombre de diffuseurs par couche aisément transformable en densité linéaire ρ . Les indices de courbure de la Figure 5-28 ne sont pas inclus dans la modélisation mais donne une indication utile sur l'écart existant entre l'approximation d'une branche courbe par un seul cylindre équivalent.

Concernant la caractérisation des aiguilles, le modèle AMAP ne prend pour l'instant en compte les aiguilles que *via* la connaissance de la portion foliée des branches de divers ordres. Sachant que chaque ordre peut porter des aiguilles et ce en proportion variable de leur longueur, les caractéristiques géométriques ont donc été obtenues essentiellement à partir de mesures *in situ* : longueur, densité linéaire, diamètre, angles d'insertion.

6.5.2.1.2 Caractérisation du sol

La rugosité de l'interface air-sol a été caractérisé de façon classique à l'aide de la hauteur RMS et de la longueur de corrélation, décrivant respectivement les irrégularités du terrain dans les dimensions horizontales et verticales. Le sol s'est avéré difficile à quantifier, à cause de la présence de la litière, de mousses et de cailloux affleurants, d'où l'impossibilité à mesurer la rugosité de façon exhaustive. Dans ce cas, des estimations visuelles basées sur l'expérience et la littérature ont permis de déterminer une fourchette pour les deux paramètres de rugosité. Les valeurs moyennes utilisées sont respectivement de 2,5 cm pour la hauteur Hrms et 6,5 cm pour la longueur de corrélation l.

Il est à noter que ce manque de caractérisation précise n'est pas trop préjudiciable pour plusieurs configurations radar, pour lesquelles il est prévu que l'écho de sol contribue peu au signal rétrodiffusé total. Ceci n'est cependant pas le cas pour la bande L-HH et pour des jeunes peuplements (plus forte pénétration).





6.5.2.2 Caractérisation diélectrique

6.5.2.2.1 pour le couvert forestier

La constante diélectrique des éléments végétaux est essentiellement une fonction des propriétés diélectriques de l'eau dans les tissus et donc de la teneur en eau, mais aussi de la densité anhydre du matériau végétal (Ulaby and El-Rayes 1987). De même qu'il a fallut décrire au mieux avec AMAP la répartition spatiale dans le couvert des éléments végétaux en termes géométriques, il est nécessaire de quantifier la répartition spatiale de la constante diélectrique dans les différents organes végétaux. Cela revient essentiellement à évaluer la répartition de la teneur en eau au sein du couvert. De plus, cette répartition doit être idéalement connue en fonction de l'âge, de la position topographique ayant éventuellement un impact, ainsi que de l'heure du jour, car il est évidemment impossible d'estimer extensivement les teneurs en eau simultanément au passage du RSO.

Rappelons que l'ensemble des mesures de teneur en eau reportées au Chapitre 3 ont démontré que:

- la variation horaire était faible pour tous les éléments végétaux ;
- la teneur en eau était très similaire dans les branches des différents ordres et les aiguilles, sauf pour celles de l'année, plus humide ;
- sur la base de quelques peuplements situés en conditions topographiques très marquées, il n'est pas apparu d'impact significatif de la pente ;
- la répartition radiale de l'eau à partir d'un certain diamètre n'est pas homogène pour les branches primaires et le tronc, l'eau étant naturellement concentrée dans le zone d'aubier, avec une diminution nette vers le cœur.

Dans ces conditions, les mesures de teneur en eau lors du passage du RSO SIR-C ont pu être réalisées sur un nombre restreints d'âges et pour chaque âge, sur quelques individus. Quant à la dépendance radiale, nous avons considéré une distribution radiale homogène de la teneur en eau.

Les mesures de teneur en eau en plus des densités anhydres sont ensuite utilisées dans le modèle de mixture d'Ulaby et el Rayes (Ulaby and El-Rayes 1987) pour en déduire la constante diélectrique moyenne pour les deux fréquences utilisées, bandes L et C, tel que reporté dans le Tableau 6-2. Les fluctuations observées de teneur en eau pour une classe donnée de diffuseurs induisent des variations faibles de constante diélectrique. On peut ainsi se contenter de la valeur moyenne.

Il est à noter que les mesures de teneur en eau ont été réalisées lors du survol d'octobre, et leur extrapolation au survol d'avril peut être hasardeuse. En effet, des variations saisonnières de teneur en eau provoquent des variations de constante diélectrique pouvant mener à des interprétation erronées. Des études menées *in situ* sur des vergers de noyers (McDonald *et al.* 1991; Way *et al.* 1991; Weber and Ustin 1991) ont montré l'impact non négligeable des variations journalières et saisonnières de la constante diélectrique des diffuseurs, en particulier des rameaux et du sol. De plus, des précipitations pluvieuses et neigeuses ont été constatées en avril, détrempant la végétation et le sol et empêchant ainsi une caractérisation des modifications de constante diélectrique. C'est pourquoi seules les données d'octobre sont retenues pour la modélisation théorique.

6.5.2.2.2 pour le sol

Si la teneur en eau n'a pas montré une dépendance à l'âge du peuplement, il en va de même pour la teneur en eau du sol. Celle-ci a été évaluée sur quelques peuplements d'âge varié et est de l'ordre de 25 % (humidité pondéral). On en déduit via le modèle d'Hallikainen la constante diélectrique du sol, en fonction de la texture du sol (% argile et % sable) ainsi que la fréquence RSO utilisée. Les valeurs obtenues sont reportées au Tableau 6-2.

	Bande L	Bande C
Fûts	20,7 + j6,9	17 + j5,6
Branches	22,8+j7,5	18,9 + <i>j</i> 6
Aiguilles	18,8 + <i>j</i> 6,3	15,4+j5
Sol	11,8+j3,2	12,35 + j2,1

Tableau 6-2 : Constantes diélectriques calculées pour les différentes catégories de diffuseurs et pour deux fréquences.

Les détails des modèles de calcul de la constante diélectrique pour la végétation et le sol sont donnés à l'annexe du Chapitre.

6.5.2.3 Précision des paramètres estimés et améliorations souhaitables

Malgré le recours à la description améliorée du couvert à l'aide d'AMAP, la prudence s'impose sur la précision de certains paramètres. Globalement, la précision est très bonne pour les troncs et décroît pour les branches. Ceci est particulièrement vrai pour les branches d'ordre 2 et 3, pour lesquelles la précision sur les effectifs est moindre du fait de la ramification (effets multiplicatifs) et est difficile à valider. Quant aux aiguilles, même si les caractéristiques géométriques sont bien estimées, leur répartition dans le couvert, à la fois sur les différents ordres de branches et sur la portion foliée, demande à être affinée.

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de simulation réalisés successivement avec une modélisation du houppier mono-couche, bi-couche et multi-couches.

6.5.3 Simulation et interprétation : cas mono-couche de houppier

La Figure 6-8 présente les résultats de simulation en fonction de l'âge pour SIR-C en bande L et C pour les polarisation HH et HV à 55° d'incidence. Les estimations de $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ sont issus des 46 unités élémentaires situées en terrain peu pentu, alors que les simulations ont été réalisées sur les âges 8, 10, 14, 16, 22, 24, 28, 32, 36, 40 et 45 ans. Le trait plein représente le coefficient de rétrodiffusion total $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$, et les autres traits représentent la décomposition en mécanismes de rétrodiffusion dominants.

Malgré le peu d'intérêt de la bande C pour l'estimation des paramètres forestiers, il est tout de même intéressant d'analyser les résultats de simulation afin de valider la modélisation pour une gamme de configurations RSO la plus large possible. On remarque un bon ajustement en polarisation HH, et un moins bon pour HV, avec décroissance après 20 ans. Dans les deux cas, la diffusion de volume domine. En bande L-HH, l'ajustement est bon aux faibles âges, où l'on remarque une contribution significative du sol et de l'interaction houppier-sol. Cependant, la courbe décroît fortement après 20 ans. Ceci est également observé pour L-HV. Globalement, le niveau de la simulation est bon autour de 20 ans, mais présente une forte décroissance après cet âge.



Figure 6-8 : Evolution du coefficient de rétrodiffusion avec l'âge pour les configurations radar SIR-C bande C (haut) et L (bas) pour les polarisations HH(gauche) et HV (droite). Comparaison théorie (—)-expérience (o). Décomposition des principaux mécanismes intervenant dans la rétrodiffusion du signal radar.

6.5.3.1 Interprétation de l'écart aux données

Afin de comprendre cet écart, il convient d'évaluer s'il provient d'une représentation bi-couches trop simpliste. Dans ce cas, on étudie les principaux mécanismes de rétrodiffusion décomposés en courbes distinctes à la Figure 6-8. Dans les quatre cas de figure la diffusion de volume domine, en particulier après 20 ans où la simulation s'écarte de la tendance observée. Il semble donc qu'il faille chercher une explication de cette chute du coté du mécanisme de diffusion de volume dans le houppier. La Figure 6-9 présente la contribution à la diffusion de volume de la diffusion provenant respectivement des troncs, des différents ordres de branches BO_n et finalement des aiguilles. Rappelons que la cohérence qui s'ajoute émane des effets d'interférence possibles entre tous les éléments végétaux structurés selon l'architecture propre du pin noir.

On remarque en bande C une contribution significative des aiguilles de l'ordre de 40%, ce qui est attendu du fait de la faible pénétration de la bande C dans le couvert et de la taille des diffuseurs se rapprochant de la longueur d'onde (5,6cm). L'ensemble des branches contribuent en gros pour 30%. Finalement, on note de forts effets cohérents de l'ordre de 30%.

En bande L, ces contributions changent du fait de la plus grande longueur d'onde et donc de la plus grande pénétration et de l'interaction avec des objets plus volumineux que les aiguilles. On remarque tout d'abord une prédominance de la diffusion de volume des branches primaires qui décroît fortement après 28 ans. Cette contribution diminue successivement pour les branches secondaires et tertiaires, avec un comportement avec l'âge similaire à celui des branches primaires. Finalement, on note un effet significatif de la cohérence particulièrement en polarisation HH (40%) et moindre en HV (20%).

Revenons aux branches primaires BO1 qui jouent un rôle important en bande L, tel qu'observé ci-dessus et signalé auparavant (Hsu *et al.* 1994). A la Figure 6-9, la décroissance de la contribution des branches primaires avec l'âge et après 24 ans explique la décroissance du σ° total simulé en fonction de l'âge. La diffusion de volume est affectée essentiellement par le diamètre des branches et leur densité dans le volume végétal, ainsi que leur orientation. Ceci signifie que probablement l'un de ces paramètres est mal pris en compte en fonction de l'âge et de la profondeur dans le houppier ou que les approximations réalisées dans le modèle théorique sont trop restrictives. Toutefois, dans cette dernière hypothèse, le modèle repose sur un formalisme éprouvé dans leur gamme de validité.

Nous avons tout d'abord constaté que la chute observée ne pouvait venir d'une mauvaise prise en compte de l'architecture de la branchaison *via* les paramètres d'orientation, car c'est sur ces paramètres que la prise en compte est la meilleure. Par ailleurs, une étude de sensibilité dans une gamme raisonnable de variation de l'orientation des branches a démontré qu'elle ne peut expliquer la chute observée du signal.

Revenons donc aux paramètres de dimension des branches. Dans le cas d'un houppier mono-couche, on utilise la moyenne et l'écart-type du diamètre et de la longueur calculés sur toutes les branches primaires de la couronne, et ce en fonction de l'âge. Il a été démontré que le diamètre a un rôle primordial dans la rétrodiffusion de volume par les branches en bande P et L, alors que la longueur a un rôle négligeable dans sa gamme des valeurs observées (Hsu *et al.* 1994).



Figure 6-9 : Contribution relative des branches, aiguilles et de la cohérence à la diffusion de volume. Le code de niveaux de gris reprend celui de la Figure 6-5.

Afin d'étudier l'impact du diamètre sur la rétrodiffusion, une étude de sensibilité a permis de simuler la diffusion des branches primaires, en fixant les autres paramètres et en ne faisant varier que le rayon, dans ce cas-ci avec un angle d'illumination constant par rapport aux cylindres de 90°. La Figure 6-10 présente cette simulation en fonction du rayon (1/2 diamètre) moyen des BO1, relié à l'âge.

Ce diagramme reprend 2 des 3 principaux types de diffusion par un cylindre : pour les faibles rayons, on observe une forte augmentation de la rétrodiffusion, c'est la zone de diffusion de Rayleigh. Ensuite, on observe des oscillations dus à des effets de résonance (ici on ne voit que la première), c'est la zone dite de Mie.



Figure 6-10 : Evolution du coefficient de rétrodiffusion σ^0 L-HH en fonction du rayon des cylindres caractérisant les branches d'ordre 1.

Ce diagramme explique sans équivoque la chute observée dans la simulation de la Figure 6-8 provenant du fait qu'entre 22 et 40 ans, l'augmentation du rayon moyen cause une diminution de la rétrodiffusion de l'ordre de 5 dB. Or, les observations indiquent au contraire une légère augmentation de la rétrodiffusion. La cause est à chercher donc en partie dans la mauvaise représentativité du diamètre des branches primaires dans le houppier en relation avec le pouvoir pénétrant des ondes radar. La variabilité verticale de la statistique sur le diamètre des BO1 n'est pas aléatoire mais suit un accroissement comme le démontre les profils issus d'AMAP à la Figure 5-25 (cf Chapitre 5), accroissement d'autant plus marqué que le peuplement est âgé (comparaison 20 et 40 ans à la Figure 5-25). Or, l'onde radar a un pouvoir pénétrant plus ou moins grand selon la configuration radar considérée, on s'attend à ce que les différentes strates du houppier ne répondent pas de la même façon et aient une contribution relative au signal total rétrodiffusé qui varie. Ainsi, il est fort probable que ce soient les branches primaires du haut du couvert qui contribuent le plus, et ceux-ci ont des diamètres beaucoup plus faibles que la moyenne prise sur toute la profondeur. Ainsi, ces résultats mettent en évidence explicitement les carences de l'hypothèse implicite d'homogénéité verticale généralement utilisée dans le modèle et l'on doit passer à une représentation à deux voire plusieurs couches.

6.5.4 Simulation et interprétation : cas bi-couche du houppier

Nous avons observé sur le cas du pin noir que la variabilité verticale des paramètres du houppier était significative après 20 ans (voir figure 4-23 du Chapitre 4). Ajouté à cela le temps de calcul très lourd depuis la caractérisation du milieu multi-couches jusqu'aux résultats de simulation, nous nous sommes donc confinés par la suite à des simulations bicouches pour des âges supérieurs à 20 ans (24, 28, 32, 36, 40 et 45 ans).

Se pose alors la question du critère pour déterminer l'épaisseur de chacune des deux strates horizontales superposées. Nous avons vu que le diamètre des branches primaires joue un rôle primordial, c'est le critère qui est utilisé. Sur la base des profils verticaux du diamètre tels que ceux reportés à la Figure 5-25 du Chapitre 5, le découpage se fait au niveau de la zone intermédiaire entre le haut du couvert présentant une augmentation rapide du diamètre en descendant dans le couvert, et la partie plus basse où l'accroissement est moindre.

La Figure 6-11 comporte les résultats de simulation en mode bi-couche pour la bande L en HH et HV, incluant partiellement le résultat précédent en mode mono-couche apparemment valable pour des âges inférieurs à 20 ans. On remarque tout de suite que la chute observée auparavant a été largement rattrapée par le modèle bi-couche. Une amélioration nette a également été observée pour les autres configurations.



Figure 6-11 : Coefficient de rétrodiffusion L-HH et L-HV simulé par le modèle 1, 2 et n couches.

Observons maintenant la décomposition du signal dans les deux couches, à la Figure 6-12 pour le cas d'un peuplement de 24 ans. Les graphes sont accompagnés d'une simulation AMAP pour comparaison avec les résultats et aide visuelle à l'interprétation. Ensuite, chaque graphe présente la répartition verticale en pourcentage de la diffusion de volume totale, entre les deux couches et dans chacune, pour les différentes classes d'éléments végétaux : BO1, BO2, BO3, aiguilles, auxquels s'ajoute le terme de cohérence. A noter le code de niveau de gris des différents éléments végétaux correspondant à la codification utilisée à la Figure 6-5.

La rétrodiffusion totale issue des deux couches peut s'exprimer par :

$$\sigma^{\circ}_{\text{vol} \text{total}} = \sigma^{\circ}_{\text{vol}1} + \sigma^{\circ}_{\text{vol}2} T_{1}^{2}$$
(6-15)

avec une diffusion de volume venant directement de la couche supérieure (1), et une autre venant de la couche inférieure (2) atténuée par la présence de la couche supérieure (1) par un facteur de transmission T^{2}_{1} aller-retour. Dans chaque couche, l'écho de volume est la somme des échos provenant de différents ordres de branches (BO1, BO 2 et BO3) et les aiguilles :

$$\sigma^{\circ}_{vol_{i}} = \sigma^{\circ}_{tr_{i}} + \sigma^{\circ}_{bol_{i}} + \sigma^{\circ}_{bol_{i}} + \sigma^{\circ}_{bol_{i}} + \sigma^{\circ}_{aig_{i}} + \sigma^{\circ}_{coh_{i}}$$
(6-16)

Cette décomposition simple en mécanisme dans les couches est utilisée dans l'analyse qui suit. Considérons tout d'abord la bande C. On remarque pour les trois états de polarisation que la couche supérieure d'une profondeur de 3,6m contribue pour plus de 80%. Ensuite, les aiguilles contribuent majoritairement dans cette couche, suivi de la cohérence et des BO1 (ou bo1) (sauf pour C-HV). Ainsi, la bande C est sensible essentiellement aux aiguilles dans les premiers mètres du couvert, avec une contribution tout de même des BO1, du fait que dans le sommet du couvert, on retrouve peu de BO2 et BO3, les aiguilles étant portées en majorité par les BO1. A noter l'effet de cohérence marqué du fait de la structuration nette de la masse foliaire dans les premiers mètres du couvert.

En bande L, la première couche contribue pour au moins 60%. Dans celle-ci, les branches d'ordre 2 et surtout 1 dominent. A noter l'effet de cohérence beaucoup plus fort en VV. Le terme σ°_{BO1} domine dans la première couche, et est affecté par des diamètres plus petit que dans la 2^{ième} couche, où l'influence des bol est plus petite à cause d'une contribution relative plus faible et une atténuation par la couche 1, malgré des diamètres plus gros. Ce qui explique en bande L le meilleur ajustement avec les données expérimentales par rapport à la modélisation mono-couche (Figure 6-8).

Ainsi, on peut déjà interpréter le signal croissant en bande L avec l'âge comme étant lié surtout à l'évolution des branches primaires dans la partie supérieure du houppier, de façon relativement complexe puisque l'on doit tenir compte de la distribution verticale des paramètres de ces branches, jouant à la fois en rétrodiffusion et en atténuation. Heureusement la caractérisation des branches primaires est plus simple que les autres ordres. Cependant, ces derniers, même s'ils jouent peu en rétrodiffusion, doivent être pris en compte dans les propriétés d'atténuation des couches supérieures.

La modélisation multi-couches devraient nous permettre de pousser plus loin ce raisonnement en vue de l'interprétation des données SIR-C et en particulier de la bande L pour l'interprétation du lien σ° -paramètres forestiers.



Figure 6-12 : Résultats de simulation en mode bi-couche pour le houppier, pour les configurations de SIR-C et un peuplement de 24 ans : profils verticaux et décomposition des mécanismes. Le code de niveaux de gris est celui utilisé à la Figure 6-5.

6.5.5 Simulation et interprétation : cas multi-couche du houppier

Dans la partie qui suit, nous avons extrapolé la simulation à plusieurs couches, pour des âges de 24 et 36 ans entre lesquels une variation significative de l'arbre dans son architecture et ses paramètres dendrométriques est observée. Le milieu est découpé en couches de 20 cm d'épaisseur.

6.5.5.1 Représentation de la décomposition des mécanismes en multi-couche

Mais tout d'abord, dotons-nous à cette étape-ci d'une représentation mathématique relativement simple issue des solutions du 1^{er} ordre des équations du TR, à l'aide du schéma de la Figure 6-13 représentant une configuration hypothétique à 3 couches. Pour une fréquence, un état de polarisation et une incidence θ donnés, la diffusion totale de volume est donnée par la somme de la diffusion de volume dans chacune des couches, chacune atténuée par l'ensemble des strates qui lui sont supérieures (Figure 6-13A). La diffusion de volume dans chaque couche est elle-même la somme de la diffusion de volume issue des différentes classes de diffuseurs (Figure 6-16A).



Figure 6-13 : Représentation multi-couche : A) exemple à 3 couches avec les contributions de chaque couche ; B) décomposition dans chaque couche.

Ainsi, la diffusion de volume totale dans sa composante verticale est donnée par :

$$\sigma^{\circ}_{\text{voltotal}} = \sigma^{\circ}_{\text{vol}_{1}} + \sigma^{\circ}_{\text{vol}_{2}} T_{1}^{2} + \sigma^{\circ}_{\text{vol}_{3}} T_{1}^{2} T_{2}^{2} \dots$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \sigma^{\circ}_{\text{vol}_{j}} \prod_{l=1}^{j-1} T_{l}^{2}, \quad (pour \ l \neq j, l \neq 0)$$
(6-17)

où n est le nombre de couches, σ°_{volj} est la diffusion de volume totale de la couche j, T^{2}_{l} est la transmission aller-retour d'une couche et P est le produit appliqué sur les transmissions des n-1 couches supérieures.

Pour chaque couche j, on peut maintenant décomposer selon les différentes classes de diffuseurs :

$$\sigma^{\circ}_{vol_{i}} = \sigma^{\circ}_{tr_{i}} + \sigma^{\circ}_{bol_{i}} + \sigma^{\circ}_{bo2_{i}} + \sigma^{\circ}_{bo3_{i}} + \sigma^{\circ}_{aig_{i}} + \sigma^{\circ}_{coh_{i}}$$
(6-18)

où les indices tr, bo1, bo2, bo3 et aig sont pour le tronc, les branches d'ordres 1,2, 3 et les aiguilles, et coh pour le terme de cohérence. Considérant la diffusion de volume du 1^{er} ordre (interactions multiples négligeables entre diffuseurs), rappelons que chacun de ces termes de la couche j pour la k^{ième} classe de diffuseur (tr, bo, etc) et pour une combinaison de polarisations pq s'exprime par :

$$\sigma^{\circ}_{pq_{k}} = \frac{4\pi \cos\theta \,\sigma_{pq_{k}} \,(1 - T_{pq}^{2})}{(Ke_{p_{k}} + Ke_{q_{k}})}$$
(6-19)

où l'indice de couche j est implicite. Deux termes sont capitaux dans cette équation et permettent de faire le lien avec les paramètres des cylindres de la classe k de la couche j : l'amplitude de diffusion volumique σ_{pqk} et le coefficient d'extinction en polarisation p à l'aller et q au retour, Kepk et Keqk. Comme nous l'avons vu auparavant, ces deux quantités sont au cœur de la liaison entre l'écho radar et les paramètres forestiers via les propriétés géométriques et diélectriques des éléments végétaux entrant dans le calcul de la matrice de diffusion.

L'amplitude de diffusion volumique σ_{pqk} tient compte des propriétés de rétrodiffusion d'une classe de cylindres dans le volume qui les contiennent (confiné par la couche), est lié aux paramètres des cylindres *via* la matrice de diffusion par la relation :

$$\sigma_{pqk} = no_k < \left| S(\theta, \pi - \theta) \right|_{pq_k}^2 >$$
(6-20)

où k est la k^{ième} classe de diffuseurs (tr. bo1, bo2, bo3, aig), n_o la densité volumique (n/m^3) et $\langle S \rangle$ la matrice de diffusion moyennée sur les différents états de taille et orientation des diffuseurs, dans la direction de rétrodiffusion (θ , $\pi-\theta$) (6-3).

L'amplitude de diffusion σ_{pq} est ensuite intégrée verticalement dans la couche j afin de tenir compte de la somme des échos de volume ainsi que de l'atténuation totale de la couche qui les contiennent, ce qui donne analytiquement le terme de droite en $1-T^2_{pqj}$. La transmission T_{pqj} s'exprime en fonction du coefficient d'extinction total de la couche j Ke_{pj} et Ke_{qj} (1/m) par la relation :

$$\Gamma_{pq} = 1/L_{pq} = \exp\left[-(Ke_p + Ke_q)Hsec\theta\right]$$
(6-21)

où l'indice de couche j est implicite, L est l'atténuation totale de la couche et H l'épaisseur de la couche considérée.

Ke est relié aux paramètres de toutes les k classes de cylindres diélectriques via la matrice de diffusion [S] par la relation :

$$Ke_{p} = \sum_{k=0}^{k} \frac{4\pi n_{0_{k}}}{k_{0}} < imS(\pi - \theta, \pi - \theta)_{pk} >$$
(6-22)

où k est la k^{ième} classe de diffuseurs (tr. BO1, BO2, BO3, aig), n_{ok} sa densité volumique (n/m³) et $\langle S \rangle$ la matrice de diffusion moyennée sur les différents états de taille et orientation des diffuseurs, dans la direction de propagation (π - θ , π - θ) (6-2).

Ainsi, la matrice de diffusion des cylindres est au cœur du lien entre l'écho de volume total et les paramètres géométriques des éléments du couvert. Nous y reviendrons.

6.5.5.2 Résultats et interprétation

Les Figure 6-14 et Figure 6-15 présentent les résultats de simulation toujours pour SIR-C et respectivement pour des arbres de 24 ans et 36 ans, dont la présentation reprend la forme de la Figure 6-12. En plus, les traits horizontaux matérialisent la profondeur du houppier, à partir du sommet, contribuant respectivement à 50% et 95% de la rétrodiffusion totale de volume. Le premier niveau à 50% détermine en quelque sorte la profondeur à laquelle se situe le centre de la diffusion dans le couvert, alors que le deuxième niveau fixé arbitrairement à un seuil de 95% détermine la profondeur qui contribue significativement à l'écho de volume total, niveau en-dessous duquel on considère que la contribution de volume additionnelle est négligeable.

Pour une couche donnée, la sommation de gauche à droite donne 100% de la courbe totale σ^{0}_{voli} , et lorsque l'on intègre verticalement cette courbe totale, on retrouve 100% de la rétrodiffusion de volume totale sortant du couvert $\sigma^{0}_{vol total}$, mesurable par un capteur RSO spatioporté.

Bande C

Sur un peuplement de 24 ans (Figure 6-14), on remarque tout d'abord pour toutes le polarisations une diffusion par les aiguilles dominante, de l'ordre de 40-50% pour une couche donnée, avec un apport non négligeable des branches d'ordre 2 voire d'ordre 1 en VV (30%). La cohérence joue également un rôle non négligeable, de l'ordre de 30%. Les résultats des études précédentes avaient déjà largement déterminé cette source dominante en bande C.

Cependant, sa répartition verticale a été peu étudiée. On note que la source de diffusion provient à 50% des 2,5 m premiers mètres, et à 95% des 4,8m, pour une hauteur totale du houppier de 7m. A noter une forte dissymétrie vers le haut, avec une augmentation rapide de la diffusion dans le premier mètre, suivi d'une décroissance plus ou moins lente.

Lorsque l'on passe à un peuplement de 36 ans à la Figure 6-15, toujours en bande C, les contributions relatives des différents éléments végétaux est sensiblement la même, mais cette fois-ci, une chute de la profondeur contributive est observée avec 50% provenant des deux premiers mètres, et 95% pour environ 3m. Cette diminution de la couche contributive vient principalement d'une atténuation accrue dans les strates supérieures due à la densité de certains ordres de branches (2 et 3) et donc des aiguilles portées par ces ordres.



Figure 6-14 : Résultats de simulation en mode multi-couches pour le houppier, pour les configurations de SIR-C et un peuplement de 24 ans : profils verticaux et décomposition des mécanismes. Le code de niveaux de gris reprend celui utilisé à la Figure 6-5 (échelle verticale différente de la Figure 6-12)



Figure 6-15 : Résultats de simulation en mode multi-couches pour le houppier, pour les configurations de SIR-C et un peuplement de 36 ans. : profils verticaux et décomposition des mécanismes. Le code de niveaux de gris est celui utilisé à la Figure 6-5.

Cette atténuation accrue explique également la symétrie verticale plus marquée de la diffusion, provenant d'une chute plus rapide sous le centre de diffusion.

En synthèse de la bande C, la rétrodiffusion origine des aiguilles avec des contributions non négligeables de petites branches d'ordre 2 et 3, et la profondeur de la strate contributive diminue avec l'âge, et n'est que de l'ordre de quelques mètres. Ainsi, on comprend qu'une relation ne peut être établie en bande C avec les paramètres globaux du couvert comme le volume ou la biomasse sur pied, parce que d'une part, la biomasse des aiguilles explorée n'est pas bien corrélée à la biomasse totale, et d'autre part à cause de la saturation du signal avec l'âge du peuplement empêchant de sonder la biomasse foliaire répartie dans les basses couches.

Bande L

Dans le cas de la bande L présentant une sensibilité intéressante aux paramètres forestiers, on remarque pour un peuplement de 24 ans (Figure 6-14) un comportement attendu très différent de la bande C. Dans ce cas-ci, les aiguilles jouent peu en rétrodiffusion vu leur faible taille devant la longueur d'onde (25cm). D'autre part, ce sont les branches primaires BO1 qui ont un rôle primordial, de l'ordre de 50% en HH, 25 à 50% en VV et surtout de l'ordre de 80% en HV. Dans ce cas, on voit que les mécanismes de rétrodiffusion sont plus simples qu'en bande C, hormis pour HH où plusieurs ordres de branche contribuent en plus des aiguilles.

Quant à la profondeur de la source de diffusion (niveau 50%), elle décroît de VV à HV puis HH, du fait des propriétés d'atténuation différentes des ondes polarisées H ou V, avec une atténuation plus forte dans ce dernier cas et plus faible dans le premier, expliquant une atténuation intermédiaire pour la combinaison HV. Cependant, la couche à 95% est à peu près la même soit de l'ordre de 5m, avec une légère augmentation de la profondeur également de VV, HV à HH. On notera ainsi que la bande L sonde essentiellement la masse ligneuse des branches de divers ordres en proportion variée selon la polarisation, dans une couche de plusieurs mètres.

Dans le cas d'un peuplement de 36 ans (Figure 6-15), on remarque aussi une forte remontée vers le haut du centre de diffusion (niveau 50%), atteignant 1,8m en VV et 2,5m en HH. La couche contributive (niveau 95%) est également plus faible, descendant de 3,5 à 4m de VV, HV à HH. Encore une fois, ceci est à mettre sur le compte de la plus forte atténuation sur des arbres plus âgés considérant en plus la forte incidence de SIR-C (trajet plus long dans le couvert), atténuation variable entre les 3 polarisations.

Il est à noter cependant que la contribution relative des différents éléments végétaux est différente du cas 24 ans, avec un accroissement du rôle des BO2 qui à 36 ans, "explosent" suite à une ramification intense dans le haut du houppier, diminuant du coup le rôle des bo1, demeurant tout de même significatif (sauf en HH).

Analysons plus en détails la bande L.

6.5.5.3 Interprétation approchée de la liaison entre la rétrodiffusion bande L et les paramètres forestiers

Maintenant que la principale source de diffusion a été cernée, en particulier en polarisation HV qui nous intéresse plus particulièrement en raison de sa plus forte sensibilité aux paramètres forestiers (cf Chapitre 4), tentons d'analyser le double lien

physique et biophysique avec les paramètres du couvert tel qu'il est schématisé à la Figure 6-16, en utilisant et simplifiant les équations de la section précédente.



Figure 6-16 : Représentation schématique du double lien biophysique entre l'écho radar et les paramètres électromagnétiques vus, et les **paramètres forestiers usuels des troncs**, en fonction du stade de croissance.

Reprenons la diffusion de volume multi-couches exprimée par l'équation (6-19), que pour les branches primaires BO1. En fait, pour simplifier le problème, il est possible de dériver à partir des équations multi-couches une équation de diffusion de volume pour une seule couche équivalente effective. Elle correspond à une couche bornée inférieurement par la profondeur au-delà de laquelle la contribution des couches inférieures n'intervient plus. Nous ne rentrerons pas ici dans le détail du passage multi-couche à cette couche effective.

En reprenant l'équation de la diffusion de volume mono-couche équivalente σ° pour un état de polarisation pq et en distinguant deux termes, on obtient (6-23) :

$$\sigma^{\circ'}_{pq}(\theta) = F_1 F_2 = \left[4\pi \cos\theta \sigma'_{pq} \right] \left[\frac{\left[1 - \exp(-(Ke'_p + Ke'_q)H'_c \sec\theta) \right]}{Ke'_p + Ke'_q} \right]$$
(6-23)

où l'indice de branches primaires BO1 est implicite. Le premier terme concerne la diffusion volumique par les branches primaires, alors que le deuxième terme concerne
l'atténuation de cette diffusion volumique par tous les éléments végétaux de la couche équivalente effective.

Lien avec la diffusion volumique

Explicitons tout d'abord le lien avec le premier terme, qui rappelons-le s'exprime par :

$$\sigma^{\circ'_{pq}}(\theta) \propto n_0 < \left| S_{pq}(\theta, \pi \cdot \theta) \right|^2 > F_2$$
(6-24)

où pour une incidence fixée, σ° est proportionnel à la densité volumique des branches no dans la couche effective d'épaisseur H'_c et à l'amplitude de diffusion moyennée <S> sur les distributions des paramètres des cylindres représentant les branches primaires.

Examinons maintenant le lien de ces quantités à la fois avec l'âge des peuplements et avec les paramètres usuels des fûts.

on peut exprimer n_0 simplement par :

$$n_{o} = \rho_{b}\rho_{t} \tag{6-25}$$

où ρ_b est la densité linéaire des branches primaires sur le tronc et ρ_t est la densité de troncs à l'hectare. On peut considérer en première approximation que la densité linéaire des branches primaires dans les premiers mètres supérieurs est constante en fonction de l'âge (et uniquement dans le haut), donc on obtient approximativement à la valeur de densité linéaire près (Figure 6-17a):

$$n_o \propto \rho_t$$
 (6-26)

La Figure 6-17b montre l'évolution décroissante de n_o des branches primaires obtenue par *AMAP2SAR*, incluant aussi les ordres 2 et 3 qui eux, croissent avec l'âge dû à la ramification avec l'élongation des branches primaires porteuses (effet multiplicatif nonlinéaire).

Voici donc un premier lien direct avec un des principaux paramètres forestiers, variant de façon décroissante proportionnellement à la loi puissance établie au Chapitre 3.



Figure 6-17 : a) Liaison entre la densité volumique des branches primaires BO1 et la densité des tiges. b) Evolution avec l'âge de la densité volumique n_o des différents ordres de branches. Le trait noir gras est un fit polynomial d'ordre 2. Les points sont issus d'AMAP.

Examinons maintenant le lien plus complexe avec le terme <S>, où le moyennage est effectué selon l'équation (6-1) sur la distribution du rayon r, la longueur l et l'orientation. Tout d'abord, (Hsu *et al.* 1994) ont démontré que la longueur jouait peu, et une petite étude de sensibilité a permis de le confirmer. C'est le seul paramètre des branches ayant peu d'influence dans sa gamme de variabilité naturelle avec l'âge et pour la bande L.

Examinons ensuite le lien avec l'orientation des branches, en liaison avec l'architecture du couvert. Il est clair qu'au fur et à mesure de la croissance du pin noir, la différenciation architecturale s'effectue principalement dans les basses couches du houppier, tandis que le haut reproduit une structure similaire du fait du mode architectural de cette espèce. Or, la couche effective, quoique légèrement variable avec l'âge, concerne que les 3-4 premiers mètres du couvert. Il en résulte qu'en première approximation, la distribution en orientation des branches primaires sera très similaire pour différents âges et aura un effet considéré constant sur le moyennage de S.

Reste le principal paramètre affectant l'amplitude de diffusion, le rayon r des branches. Considérons simplement la moyenne du rayon dans la couche effective. Or, il s'avère que sous hypothèse de diffusion de Rayleigh, valable en tout cas pour de arbres de moins de 50 ans où le critère kr < 1 est respecté, l'amplitude de diffusion varie approximativement en r⁴ (Ulaby *et al.* 1982a).

On peut donc poser:

$$< \left| S_{pq}(\theta, \pi - \theta) \right|^{2} > \propto r^{4}$$
 (6-27)

Cependant, ceci n'est qu'une approximation, du fait de la complexité des phénomènes de diffusion mis en jeu en fonction du rayon.

Etudions maintenant l'évolution du rayon en fonction de l'âge des peuplements à la Figure 6-18a, utilisée dans la modélisation mono-couche. Malgré qu'il ne s'agisse pas du cas de la couche équivalente effective concernée ici, la linéarité entre les rayons et l'âge, et donc entre celui des branches et du tronc, peut être aisément démontrée comme pour le cas de la Figure 6-18a. Ceci veut également dire que le rayon des branches primaires de la couche effective est proportionnel au paramètre forestier classique qu'est le diamètre du tronc d_t à 1,3m (=2r), qui croît aussi quasi-linéairement avec l'âge. On peut donc poser : r $\propto dt/2$. On peut faire le même raisonnement sur la section S des branches et du tronc S_t , $S \propto S_t$.

Dans ce cas, l'équation précédente devient :

$$< |S_{pq}(\theta, \pi \cdot \theta)|^{2} > \propto S_{t}^{2}$$

avec
$$S_{t} = \frac{\pi}{4} d_{t}^{2}$$
(6-28)

En intégrant (6-28) et (6-27) dans (6-26), on obtient approximativement :

 $\sigma^{\circ'}_{pq}(\theta) \propto (\rho_t S_t^2) F_2$



Figure 6-18 : Evolution en fonction de l'âge a) du rayon moyen des branches primaires et du tronc issue d'AMAP, utilisée pour la modélisation. b) du produit de la densité de tige à l'hectare ρ_t et du carré de la section S_t des tiges à 1,3m.

Ainsi, en première approximation, au terme près d'atténuation F2, la rétrodiffusion est indirectement proportionnelle au produit de la densité de tige à l'hectare ρ_t et du carré de la section St des tiges à 1,3m, deux paramètres forestiers classiques. La décroissance avec l'âge de la densité de tige liée à la sylviculture en place et suivant une loi puissance, provoque donc une décroissance de la rétrodiffusion, mais qui est rattrapée et même compensée en positif du fait que la section des troncs S et des branches augmente avec l'âge et que l'onde radar y est sensible à la puissance 2. Ceci donne globalement un accroissement pratiquement linéaire du produit des deux termes (Figure 6-18b), et donc l'augmentation observée de la rétrodiffusion radar.

(6-29)

Si on examine la section S_t , nous avons vu au niveau d'un arbre qu'elle permettait de remonter aux bio-volumes et biomasses compartimentées dans celui-ci, par une relation allométrique telle que celle de la Figure 3-17 au Chapitre 3. Or, en multipliant cette section par la densité de tiges, ρ_t , on exprime alors tout simplement à une constante près le biovolume moyen des tiges, mais aussi celui compartimenté du fait de la relation allométrique ci-dessus. C'est ce qui explique finalement que σ° est très bien corrélé statistiquement au volume des fûts.

Ainsi, comme l'avait proposé (Beaudoin 1992), la surface terrière du tronc (section de tronc à l'hectare) exprimée dans le produit $\rho_t S_t$ et auquel est sensible le radar *via* les branches, est central dans la liaison entre les paramètres vus de la branchaison et les paramètres forestiers classiques.

Liaison avec l'atténuation

Malheureusement cet accroissement linéaire attendu est affecté par le deuxième terme F2, lié à l'atténuation du milieu dans la couche effective. Dans ce cas-ci, tous les éléments végétaux et en particulier les branches affectent cette atténuation. Rappelons que F2 est exprimé par :

$$F_{2}\left[\frac{\left[1-\exp(-(Ke'_{p}+Ke'_{q})H'_{c}\sec\theta)\right]}{Ke'_{p}+Ke'_{q}}\right]$$
(6-30)

avec

$$Ke_{p(q)} = \sum_{k=0}^{k} \frac{4\pi n_{0_{k}}}{k_{0}} < imS(\pi - \theta, \pi - \theta)_{p(q)_{k}} >$$
(6-31)

où l'on retrouve encore une fois les densités de volume des différents éléments végétaux, et la dépendance à la matrice de diffusion. Le comportement de F2 est du coup plus complexe, mais tentons de l'expliquer de façon simple. L'évolution des n_0 est reportée à la Figure 6-17, où l'on voit une augmentation pour les ordres 2 et 3, alors que l'ordre 1 décroît globalement tel que décrit auparavant. Ce qui est intéressant, c'est la somme de ces densités décrivant de façon globale la quantité de diffuseur dans le volume végétal. On s'aperçoit qu'il croît avec l'âge pour plafonner ensuite, et on peut démontrer que son comportement est lié globalement au produit de la densité de tige à l'hectare et au carré du diamètre des troncs.

Quant à la matrice de diffusion pour les différents ordres, on peut reprendre en partie le raisonnement effectué dans le cas de la rétrodiffusion, sauf que le comportement selon le rayon est moins direct. Une chose apparaît clairement, on peut poser l'hypothèse de matrice de diffusion très semblables pour les ordres 2 et 3 et peu importe l'âge, car ces branches sont peu variables en caractéristiques comparé aux branches primaires. Dans ce dernier cas, l'atténuation augmentera avec le rayon croissant avec l'âge, via la modification de la matrice de diffusion.

Ainsi, la combinaison de tous ces facteurs fait que le terme F2 croît avec l'âge de façon complexe et difficile à relier clairement aux paramètres forestiers. Cependant, on peut dire que cet accroissement de l'atténuation avec l'âge dépend fortement du n₀ total. Le terme F2 a donc pour effet d'atténuer la sensibilité du terme F1 aux paramètres forestiers, et c'est ce qui cause donc la perte de sensibilité à partir d'un certain âge des couverts forestiers, dénommée saturation du signal. On peut conclure en disant que la rétrodiffusion radar est un équilibre subtil et de nature antagoniste entre l'effet de la rétrodiffusion par un ensemble de branches dans le houppier, et l'atténuation par ce même ensemble.

On comprendra qu'à cette étape-ci du travail, les liaisons physiques et biophysiques entre la branchaison et l'écho radar, donnant naissance à une sensibilité de l'écho radar aux paramètres forestiers, devra être approfondie par une étude de sensibilité théorique aux paramètres de la branchaison et en particulier à la densité et au rayon des branches. Ceci permettrait de tirer des enseignements quant à la possibilité d'obtenir des relations d'inversion semi-empiriques sous forme par exemple d'abaques, à mettre en relation avec les paramètres forestiers d'intérêt.

6.6 Simulation et interprétation : cas du terrain accidenté

6.6.1 Stratégie et conditions de simulation

Par la suite, nous avons abordé le cas du terrain accidenté. Dans ce cas, ce qui nous intéresse c'est le comportement relatif de la rétrodiffusion d'un peuplement en pente par rapport à celui observé en terrain plat. Or, en fonction des mécanismes isolés sur le cas du terrain plat, et malgré leur relative complexité, il se peut fort bien que le comportement relatif angulaire de ces comportements soit relativement simple en première approximation. Ceci permettrait de dériver et valider le modèle semi-empirique de correction angulaire tel qu'exposé au Chapitre 4. A cette fin, nous utilisons à nouveau la modélisation multi-couches en intégrant la pente et l'azimut du terrain, et en tentant de simplifier cette modélisation relativement au comportement angulaire.

Nous disposons expérimentalement de peu d'unités LCT en terrain très pentu pour couvrir une gamme de situations suffisantes pour confronter les simulations aux observations. Dans ce cas, nous avons eu recours à un autre jeu moins précis mais plus volumineux d'unités élémentaires d'échantillonnages, telles que définies au Chapitre 4. Rappelons que ces unités ont les caractéristiques suivantes :

- homogène en âge, et appartenant à une classe d'âge allant de 0 à 140 ans, par pas de 20 ans;
- homogène en situation topographique définie par l'angle d'incidence local θ_{loc} ;
- de taille suffisante pour estimer $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ en présence de speckle

Le modèle du MIT/CESBIO a été adapté par ces concepteurs afin de tenir compte de la pente et de l'azimut du terrain, causant une modification de la géométrie de tous les mécanismes de rétrodiffusion, tel que vu au Chapitre 4. A cette étape-ci des travaux, nous nous sommes contentés de réaliser une modélisation théorique multi-couche pour un peuplement de 36 ans et pour des pentes situés dans le plan d'incidence, soit faces ou opposées au radar.

6.6.2 Résultats de caractérisation du milieu forestier

Rappelons la configuration générale d'un RSO observant un terrain accidenté supportant un milieu forestier à la Figure 6-19. Le milieu forestier lui-même est celui déjà caractérisé auparavant et en particulier à la section 6.5.2. d'est-à-dire un milieu d'une hauteur totale H décomposé en deux couches : troncs et houppiers, cette dernière d'une épaisseur totale H_c étant décomposée en multi-couches, contenant la collection de diffuseurs de différents types. A noter qu'à cette étape-ci, l'impact de la topographie sur les caractéristiques forestières (via l'influence de l'exposition, de la réserve en eau, de l'épaisseur du sol, etc) n'a pas été pris en compte.

Le terrain est caractérisé localement par sa pente α et son azimut β , alors que la visée radar est caractérisée par son angle d'incidence θ et de visée azimutale ϕ . On pourrait considérer la réponse angulaire de la rétrodiffusion en fonction des deux angles (α , β). Cependant, on peut poser l'hypothèse sur notre site que la réponse radar est symétrique en azimut de visée relatif à l'azimut du terrain (β - ϕ), ce qui simplifie le problème. En conséquence, on peut utiliser seulement l'angle d'incidence local θ_{loc} donné par le produit scalaire entre le vecteur incident de l'onde radar i et le vecteur normal au terrain n :



Figure 6-19 : Configuration générale d'un RSO observant un milieu forestier en terrain accidenté.

On peut ainsi calculer l'angle d'incidence local pour différents capteurs (ERS-1, JERS-1, SIR-C/X-SAR....etc) avec leur configuration propre de visée radar (θ,ϕ) pour différents couples de pente et d'azimut local (α,β) . On notera qu'un θ_{loc} peut correspondre à différents couples pente-azimut. Aussi, chaque capteur ayant des angles d'incidence θ et de visée ϕ différents, il en résulte que l'incidence locale d'un point donné du terrain, ainsi que la gamme prise par cet angle sur tout le site sera très différente d'un capteur à l'autre. Des résultats sont repris en annexe du Chapitre 6, alors que le Figure 6-3 présente la gamme possible prise par θ_{loc} sur notre site. A noter qu'un angle supérieur à 90° correspond à une situation d'ombre ; ceci a été constaté sur les images SIR-C alors qu'aucune ombre n'apparaît pour les images de JERS-1 et ERS-1.

	θ (deg)	$\theta_{loc} \min (deg)$	$\theta_{loc} \max (deg)$
SIR-C/X-SAR	55°	5	105
JERS-1	38°	0,6	88
ERS-1	23°	1,8	73

Tableau 6-3 : Valeurs théoriques minimales et maximales pouvant être prises par le θ_{loc} pour des configurations topographique typiques du site, à savoir des pentes allant 0 à 50°, et des azimuts allant de 0 à 360°.

6.6.3 Simulations : cas multi-couches en terrain accidenté

A cette étape-ci, nous n'avons pu simuler en multi-couches qu'un peuplement de 36 ans pour des situations topographiques dans le plan d'incidence, c'est-à-dire avec une pente face ou opposée au radar, se traduisant par une différence entre l'azimut du terrain et visée radar ($\beta-\phi$) = 0° ou 180°. Pour chaque cas d'exposition, nous avons utilisé des pentes de 6, 18 et 30°, fournissant un total de 6 valeurs de θ_{loc} . Nous avons considéré que la simulation pour un peuplement de 36 ans représentait la situation moyenne du comportement angulaire sur le site, par ailleurs peu variable en fonction de l'âge comme nous l'avons vu au Chap. 4.

Evidemment, les résultats de simulation dans ce cas devraient être confrontés à la classe d'âge correspondante 20-40 ans des observations $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$. Cependant, il s'est avéré que cette classe souffrait d'un manque d'observations. Dans ce cas, nous avons moyenné pour chaque classe de θ_{loc} les coefficients de rétrodiffusion entre 0 et 60 ans, de façon à obtenir une statistique satisfaisante en terme de moyenne, affublée d'un écart-type traduisant la variabilité induite par l'âge du peuplement.

La Figure 6-20 présente les résultats de simulation confrontés aux observations. On note tout d'abord un ajustement variable selon les configurations abordées, traduisant la nécessité de poursuivre la validation de la modélisation multi-couche. En particulier, un écart de 2dB est observé pour C-HH et L-HH (J-ERS 38°). Cependant, un bon ajustement est observé pour les données bande L de SIR-C qui nous intéressent plus particulièrement.

Intéressons-nous maintenant au comportement angulaire, abstraction faite du niveau absolu des courbes simulées. On note tout d'abord que le comportement angulaire est bien reproduit (parallélisme des observations et de la courbe simulée) pour tous les cas et pour des angles inférieurs à 70°, mais que les résultats se dégradent souvent au-delà. Par ailleurs, il s'est avéré que la contribution du volume était encore une fois prédominante, sauf pour les très faibles θ_{loc} où un écho de sol peut être présent (sol perpendiculaire au rayonnement).

Nous allons donc à nouveau décomposer la diffusion de volume dans le houppier, dans sa composante verticale seulement, et ce pour les différents angles d'incidence. La Figure 6-21 présente cette décomposition pour la configuration SIR-C. On remarque tout d'abord qu'au fur et à mesure que l'incidence augmente, le centre de diffusion (mode du profil) remonte vers le haut, et ce d'autant plus vite que l'incidence est forte. Ensuite, on remarque un rétrécissement de la source de diffusion s'opère pour des incidences élevées (profil plus piqué).

Dotons-nous à nouveau de représentations et d'outils simples pour comprendre et interpréter le comportement angulaire, et dériver un modèle semi-empirique de correction du relief.



Figure 6-20 : Comportement angulaire moyen observé (âge moyen de 40 ans) et comparaison avec la simulation angulaire théorique multi-couches



Figure 6-21 : Résultats de simulation multi-couche pour les configurations SIR-C : profils verticaux de la rétrodiffusion de volume σ°_{vol} de pins noirs de 36 ans, pour différents angles d'incidence locaux dans le plan d'incidence.

6.6.4 Modélisation semi-empirique angulaire

6.6.4.1 Diffusion de volume approchée

Reprenons la diffusion de volume multi-couches représentée par un mono-couche équivalente, tel qu'exprimé à l'équation (6-23) de la section précédente. Maintenant, on doit prendre en compte le changement de géométrie dû à la topographie. Un zoom fait sur la Figure 6-19 nous permet de nous focaliser sur la géométrie de propagation de l'onde radar au sein du volume forestier localisée en terrain plat et accidenté suivant le schéma de la Figure 6-22, réalisé dans le plan d'incidence par souci de clarté.

Tout d'abord, nous considérons que les arbres poussent aussi verticalement en terrain pentu que plat, ce qui est vérifié sur notre site. Nous considérons ensuite une couche équivalente au multi-couche, au-dessus du sol affecté d'une pente α . Cette pente crée une inclinaison de la couche de houppier de profondeur H_c. Cette inclinaison crée une variation de l'angle d'incidence local θ_{loc} sur le couvert, en posant l'hypothèse de parallélisme de la couche avec le terrain sous-jacent. Notons cependant que l'incidence de l'onde par rapport à la structure de l'arbre, θ_{arbre} , demeure le même, ce qui aura son importance par la suite.



Figure 6-22 : Configuration géométrique d'un RSO observant un milieu forestier (dans le plan d'incidence): a) terrain pentu faisant face à la visée radar, b) terrain plat et c) terrain pentu opposé à la visée radar.

Considérons maintenant le processus de diffusion de volume. On s'aperçoit que l'inclinaison de la couche de houppier crée une variation du chemin optique L_{loc} dans le couvert matérialisé par une flèche, et qui s'exprime par :

$$L_{loc} = H_c \cos\alpha \sec\theta_{loc} \tag{6-33}$$

Ainsi, pour un θ_{loc} près de 0°, le chemin optique est minimal; au alentour de 90° lorsque le vecteur radar incident tangente la pente, le chemin optique devient infini, audelà, c'est la zone d'ombre.

Maintenant, si on considère les coefficients d'extinction et de rétrodiffusion de volume au sein de la couche, ou peut poser l'hypothèse que ceux-ci ne dépendent pas de la topographie, car l'angle d'incidence au niveau de l'arbre est constant. C'est-à-dire que lorsque que l'on calcule Ke' et σ ', faisant intervenir les paramètres d'orientation des diffuseurs, cette orientation relative au faisceau radar incident ne change pas avec la topographie. Ceci a été vérifié par la modélisation théorique. Par exemple, le tableau Tableau 6-4 montre une stabilité du coefficient d'extinction Ke'h et Ke'v en fonction de θ_{loc} pour différentes configurations radar et pour des arbres de 24 et 36 ans (variations inférieures à 1%).

	Ke'p(m-1)							
	Pins 36 ans			Pins 24 ans				
Conf.	p=	=H	p=V		p=H		p=V	
radar	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
C 23°	0,148	0,002	0,144	0,005	0,054	0,001	0,052	0,002
$L 38^{\circ}$	0,138	0,003	0,127	0,006	0,042	0,003	0,036	0,002
C 55°	0,148	0,002	0,144	0,005	0,054	0,001	0,052	0,002
L 55°	0,139	0,003	0,126	0,006	0,042	0,003	0,035	0,003

Tableau 6-4 : Stabilité des valeurs des coefficients d'extinctions Ke' issues du modèle théorique obtenues pour une large gamme de θ_{loc} , et pour 2 âges de peuplements.

A partir de ces caractéristiques, l'équation de diffusion de volume pour une combinaison de polarisations pq et intégrant les effets de pente en modifiant l'équation (6-12) est approchée par :

$$\sigma^{\circ'}_{pq} (\theta_{loc}) = \frac{4\pi \cos(\theta_{loc}) \sigma'_{pq}}{Ke'_p + Ke'_q} \left[1 - \exp(-(Ke'_p + Ke'_q)L_{loc}(\theta_{loc}))\right]$$
(6-34)

où L_{loc} est donné par l'équation (6-33). Cette équation permet de comprendre simplement le comportement angulaire simulé et théorique. Au fur et à mesure que (θ_{loc}) augmente, on remarque une première variation en cos (θ_{loc}), pressentie par l'observation des courbes de la Figure 6-20 et lié à la densité de puissance sur le terrain pentu. Cependant ce comportement angulaire n'est pas aussi abrupt avec l'angle d'incidence. Intervient alors une pondération par le terme exponentiel 1-exp(), tenant compte de l'atténuation du signal d'autant plus grande que le chemin optique L_{loc} augmente avec l'incidence locale. Cette pondération sera d'autant plus forte que le terme exponentiel tend vers 1 (milieu transparent), donnant un comportement angulaire plutôt aplati ; à l'opposé, on retrouvera un comportement maximal en cos(θ_{loc}) lorsque ce terme tendra vers 0, soit lorsque le milieu est très atténuant. Ainsi, les propriétés d'atténuation du couvert liées à son épaisseur Hc et au coefficient d'atténuation ke' sont au cœur de la réponse angulaire du couvert. Afin de valider l'approximation de l'éq. précédente, nous avons simulé $\sigma_{pq}^{\circ}(\theta_{loc})$ avec le modèle multi-couche complet du MIT, nous donnant par ailleurs en sortie les valeurs équivalentes à un mono-couche de ke' et σ' . Nous injectons alors ces valeurs dans l'expression simplifiée mono-couche. La comparaison entre la simulation exacte et celle approximée est donnée à la Figure 6-23 montrant une très bonne concordance, valable du fait que la diffusion de volume est largement dominante peu importe la topographie, ce qui est notre cas sauf aux faibles incidences où la prudence s'impose.



Figure 6-23 : Exemple de comportement angulaire sur un peuplement de 36 ans, incluant : les observations (•), les simulations angulaires multicouches MIT/CESBIO (0),
l'approximation par la diffusion de volume équivalente monocouche (-----)et finalement la correction angulaire semi-empirique en cosⁿ(----).

6.6.4.2 Modélisation semi-empirique

A partir de l'équation simplifiée de diffusion de volume ci-dessus, nous allons dériver et valider le modèle semi-empirique de correction angulaire en cosinus puissance n, tel qu'utilisé au Chapitre 4. En se basant sur la Figure 6-22, le but est de ramener la réponse radar en terrain pentu équivalente à celle en terrain plat (centre de la figure). Ceci se fait simplement par l'utilisation de l'expression de l'équation (6-35) et plus particulièrement du ratio entre $\sigma^{0}(\theta_{loc})$ et σ^{0} pour l'angle d'incidence de référence en terrain plat, ce qui donne par élimination des termes constants :

$$\frac{\sigma_{pq}^{\circ'}\left(\theta_{loc}\right)}{\sigma_{pq}^{\circ'}\left(\theta_{ref}\right)} = \left[\frac{\cos\theta_{loc}}{\cos\theta_{ref}}\right] \left[\frac{\left[1 - \exp(-(Ke_{p}^{'} + ke_{q}^{'})L_{loc})\right]}{\left[1 - \exp(-(Ke_{p}^{'} + ke_{q}^{'})L_{ref})\right]}\right]$$
(6-35)

où l'incidence locale de référence en terrain plat est égale à l'incidence du capteur $\theta_{ref} = \theta$, et le chemin optique dans ce cas est $L_{ref} = H_c \sec(\theta_{ref})$.

L'application d'une correction angulaire à l'aide de cette équation serait possible, permettant de retrouver $\sigma_{pq}^{\circ}(\theta_{ref})$, à condition de connaître plusieurs paramètres du terrain, tout d'abord l'angle d'incidence locale θ_{loc} et la pente du terrain α , disponible via le MNT et calculé par l'équation (6-32). Cependant, les coefficients d'extinctions du couvert Ke', et de l'épaisseur du couvert Hc du terme L_{loc}, sont évidemment beaucoup plus problématiques voir impossible à obtenir : pour Ke', il dépend du type de couvert et est une quantité physique complexe à déterminer comme nous l'avons vu ; quant à H_c, c'est un paramètres forestier et comme l'on cherche *in fine* à mesurer par RSO des paramètres forestiers ...

A des fins opérationnelles, nous allons démontrer que l'on peut approximer le rapport de l'équation (6-35) par une expression plus simple valable pour une large gamme angulaire et ne comportant que deux paramètres.

Dans l'équation (6-35), on peut approximer au numérateur et au dénominateur le produit cos(1-exp) par un seul cosinus à la puissance n pour tenir compte de la pondération du cosinus par le terme exponentiel. Le rapport théorique s'approxime alors par :

$$\frac{\sigma^{\circ}_{pq}(\theta_{loc})}{\sigma^{\circ}_{nq}(\theta_{ref})} \approx \left[\frac{\cos\theta_{loc}}{\cos\theta_{ref}}\right]^{n}$$
(6-36)

En posant (6-35) dans (6-36), on obtient :

$$\frac{[1 - \exp(-(Ke'_p + Ke'_q)L_{loc})]}{[1 - \exp(-(Ke'_p + Ke'_q)L_{ref})]} \approx \left[\frac{\cos\theta_{loc}}{\cos\theta_{ref}}\right]^{n-l}$$
(6-37)

Afin d'estimer la valeur de n, posons :

$$x = \frac{\cos\theta_{loc}}{\cos\theta_{ref}}$$

$$y = \frac{[1 - \exp(-(Ke'_p + Ke'_q)L_{loc})]}{[1 - \exp(-(Ke'_p + Ke'_q)L_{ref})]}$$
(6-38)

ce qui donne la relation :

$$y \approx x^{(n-1)} \tag{6-39}$$

$$\log y \approx (n-1)\log x \tag{6-40}$$

Ainsi, (n-1) est la pente de la droite liant les valeurs logarithmiques de x et y. Ensuite, par régression linéaire sur plusieurs couples (x,y), on estime la pente (n-1) de l'ajustement linéaire ainsi que la qualité de celui-ci via le coefficient de détermination r^2 .

Pour valider l'approximation, nous avons calculés des couples (x,y) à partir de jeux de valeurs de θ_{loc} , Ke' et Hc possibles pour divers capteurs, dans les gammes suivantes :

- Ke' :0,04 à 0,3 m⁻¹
- H_c : 1-20 m ;
- α : 0-50°, β : 0-360° (pour le calcul de θ_{loc}).



Figure 6-24 : Evolution des valeurs du coefficient *n* prises pour différentes conditions de visée radar et de peuplements via K_e' et H'_c. Les points sont les estimations de n par régression, les traits pleins sont dérivés d'un modèle empirique.

Les résultats d'estimation de n pour ces combinaisons et pour chaque capteur sont repris à la Figure 6-24 montrant l'évolution du n estimé en fonction du coefficient d'extinction Ke' et de l'épaisseur du couvert H'c. A noter toutefois que certaines combinaisons présentées n'ont pas de sens quant aux conditions réelles rencontrées, lorsque par exemple le Ke est de 0,04 pour des couverts de 20 m d'épaisseur ou quand le Ke tends vers 0,3 pour une épaisseur de couvert de 1 m. Les valeurs théoriques de n, se répartissant entre 0,19 et 1, affichent un comportement variable en fonction des configurations radar. L'évolution du n montrent une forte liaison avec le Ke et l'épaisseur du couvert Hc. Quant aux valeurs de R² issus de la régression, ils étaient systématiquement supérieurs à 0,95. On peut donc modéliser empiriquement la relation entre n, Ke et H_c, sur la base de la loi issue de la procédure de régression ci-dessus, et intégrant en plus l'effet angulaire inclus dans le termes L_{loc} et L_{ref} sous la forme de jeux de 3 coefficients propres à chaque capteur ayant une incidence de référence fixe θ . Ainsi, on peut démontrer que l'on obtient la relation empirique compacte suivante :

$$n = 1 + a \cdot \log\left(\frac{1 - \exp(-b\tau)}{1 - \exp(-c\tau)}\right)$$
(6-41)

où le produit $\tau' = (Ke_p' + Ke_q')H'_c$ est l'épaisseur optique aller-retour du couvert et a, b et c sont des coefficients de calage qui prennent des valeurs spécifiques pour chaque capteur (Tableau 6-5). Ainsi le facteur n est exprimé uniquement en fonction de l'épaisseur optique τ du couvert.

Config.	а	b	с
ERS-1 23°	2,148	0,889	1,808
JERS-1 38°	1,025	0,845	5,531
SIR-C 55°	0,927	0,915	8,738

Tableau 6-5 : Valeurs des paramètres a, b et c de l'équation (6-41).

Maintenant, pour valider globalement l'approximation par le ratio en cosinus puissance n, nous avons simulé des rapports théoriques $\sigma^0(\theta_{loc})/\sigma^0(\theta_{ref})$ issus de la modélisation théorique complète, qui nous donne également les valeurs d'épaisseur optique τ . On calcule alors la valeur de n (6-41) utilisée ensuite dans le modèle semi-empirique de l'équation (6-36). On compare alors les résultats qui sont reportés à la Figure 6-25 présentant l'approximation pour les peuplements de 24 et 36 ans et les configurations de visée d'ERS-1, JERS-1 et SIR-C. Un rapport de 0 dB concerne un terrain plat, un rapport positif concerne des pentes faces au radar (faible θ_{loc}) et un rapport négatif des pentes opposées au radar (forts θ_{loc}).

L'approximation du rapport théorique par le rapport semi-empirique est systématiquement meilleure pour les pins de 36 ans ($\tau \approx 1,6$). L'épaisseur optique plus faible pour les pins de 24 ans ($\tau \approx 0,5$) induit de fortes variations en particulier pour les configurations de visées correspondant aux faibles et forts θ_{loc} avec une sous-estimation par le rapport semi-empirique. D'autre part, on constate que l'approximation se dégrade pour des angles d'incidence du capteur plus faible comme 23° pour ERS. Malgré tout, les écarts sont la plupart du temps largement inférieurs à 1dB et pour les plus forts, concernent des situations topographiques aux extrêmes peu rencontrées dans la réalité. Ainsi, le rapport semi-empirique utilisé pour la correction est satisfaisant vis-à-vis de la théorie.



Figure 6-25 : Approximation du rapport théorique par le rapport semi-empirique où la puissance n est calculée à partir de l'équation (6-41) et de l'épaisseur optique obtenue théoriquement sur des peuplements de 24 et 36 ans.

6.6.4.3 Enseignements pour l'application du modèle semi-empirique de correction

Ainsi, nous avons pu démontrer que la valeur de n, permettant de façon compacte d'exprimer le comportement angulaire de la rétrodiffusion d'un couvert forestier en présence de relief, avait une signification physique somme toute relativement simple liée essentiellement à la propriété d'atténuation. Nous pouvons désormais parler de modèle semi-empirique de correction angulaire.

Dans la pratique pour l'application, il est évidemment impossible d'obtenir n à partir de τ qui est inconnu. n a été obtenu empiriquement dans notre cas pour réaliser les corrections uniquement sur la base de la rétrodiffusion observée en présence de relief matérialisé par θ_{loc} .

Dans le futur, une étude de sensibilité sur la gamme prise par τ pour une large gamme de couverts permettrait de cerner la gamme de variabilité de n, permettant ainsi de déterminer soit une gamme réduite de valeurs de n somme toute assez universelle, ou au pire, des valeurs de n par grands types de végétation (résineux, feuillus, etc) permettant une correction angulaire sans trop de connaissances *a priori* du milieu forestier. Ceci dit, dans le cas qui nous concerne, nous avons pu voir que les valeurs de n sont plutôt proches de 1 du fait de la forte atténuation des couverts aux fréquences usuelles L et C, ce qui suggère dans le doute d'appliquer une valeur comprise entre 0,8 et 1 pour toute la scène, ce qui permettra de toute façon de réduire significativement l'effet du relief pour classifier les thèmes ou bien inverser le signal en paramètres.

6.7 Conclusions

A partir du couplage du modèle architecturale de plantes AMAP et du modèle du MIT/CESBIO de nouvelles voies sont ouvertes au niveau :

• de la *simulation* de données radar et de l'étude de leur sensibilité à différents paramètres forestiers (âge et géométrie des peuplements) et environnementaux (topographie, etc) ;

• de la *validation* pour l'instant partielle *via* les améliorations concernant la caractérisation du milieu (AMAP2SAR) et la finesse de description (multicouche, incorporation des histogrammes...) utilisée par le modèle du MIT/CESBIO;

• de *l'interprétation* des mécanismes de diffusion au travers d'analyses quantitatives;

• du *développement* d'un modèle semi-empirique de correction angulaire des images radar validé par la théorie;

• de la *mise en évidence* explicite des faiblesses d'hypothèses utilisées ad hoc par les modèles radar (homogénéité verticale de la végétation) ;

• de la *prospective* sur la pertinence des configurations radar actuelles et à venir pour inférer sur les paramètres forestiers intéressant les gestionnaires.

L'ensemble de ces points soulignent l'apport de cette approche ayant permis d'explorer plus en détails *ce que l'on mesure réellement* avec les données radar acquises en milieu forestier. La principale conclusion est que l'écho radar est physiquement relié à la section des branches et à leur densité volumique, dont le produit auquel est sensible le radar est en fait une quantité similaire à la surface terrière des tiges, mais appliquée aux branches ; or, comme ces deux quantités sont corrélées entre elles, cela explique pourquoi l'écho radar se corrèle avec le volume des troncs.

Les progrès réalisés ne doivent pas occulter la difficulté de mise en œuvre de la méthodologie devant être étendue à des peuplements plus âgés et à d'autres types de données radar. Dans un souci de généralisation d'utilisation des données radar cette approche devra s'intéresser :

• à d'autres sites (plat et accidenté) et à d'autres situations forestières (différentes espèces, forêts gérées et naturelles...);

• à l'interprétation des diverses quantités radar (polarimétrique, interférométrique...) en utilisant différentes catégories de modèles théoriques (VRT, cohérents...).

Finalement, parmi les travaux à venir, un premier consistera à optimiser l'approche, de manière à embrasser le plus grand nombre de situations rencontrées sur le terrain, afin de faire émerger les points clés de l'approche spatialisée mise en œuvre au travers de la télédétection RSO.

Références bibliographiques

- Beaudoin, A. (1992). "Observation de la terre par radar imageur : estimation de la biomasse forestière,", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 172p.
- Borgeaud, M., Shin, R. T., and Kong, J. A. (1987). "Theoretical models for polarimetric radar clutter." Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 1(1), 73-89.
- Chauhan, N. S., Lang, R. H., and Ranson, K. J. (1991). "Radar modeling of boreal forest." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 29(4), 627-638.
- Dobson, M. C., MC Donald, K., and Ulaby, F. T. (1989). "Modeling of forest canopies and analyses of polarimetric SAR data." No. 211000-1, Final Report, ERIM.
- Dong, Y., Richards, J. A., and Cashman, J. (1995). "A model of volume attenuation and backscattering by foliage at L- and P-bands." International Journal of Remote Sensing, 16(7), 1231-1247.
- Fung, A. K. (1994). Microwave scattering and emission models and their applications, Artech House, Boston London.
- Hsu, C. C. (1996). "Theoretical models for microwave remote sensing of forests and vegetation," Doctor of philosophy, MIT, Boston, 191p.
- Hsu, C. C., Han, H. C., Shin, R. T., Kong, J. A., Beaudoin, A., and Le Toan, T. (1994). "Radiative transfer theory for polarimetric remote sensing of pine forest at P band." *International Journal of Remote Sensing*, 15(14), 2943-2954.
- Ishimaru, A. (1978). Wave propagation ans scattering in random media, tomes 1 et 2. Academic press, New-York, 572p.
- Karam, M. A., and Fung, A. K. (1982). "Propagation and scattering in multi-layered random media with rough interfaces." *Electromagnetics*, 2, 239-256.
- Karam, M. A., and Fung, A. K. (1988). "Electromagnetic scattering from a layer of finite-length randomly oriented dielectric circular cylinders over a rough interface with application to vegetation." International Journal of Remote Sensing, 9(6), 1109-1134.
- Karam, M. A., and Fung, A. K. "A first order backscattering model for forested canopy with a volumefraction profile." *Proceedings IGARSS'89 Symposium*, Vancouver Canada, 2836-2839.
- Karam, M. A., Fung, A. K., and Antar, Y. M. M. (1988). "Electromagnetic wave scattering from some vegetation samples." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 26(6), 799-807.
- Karam, M. A., Fung, A. K., Lang, R. H., and Chauhan, N. S. (1992). "A microwave scattering model for layered vegetation." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(4), 767-784.
- Kastler, A. (1992). Cours de physique générale : Optique, 6ième édition, Masson, Paris, 1110p.
- Kuga, Y., Whitt, M. W., McDonald, K. C., and Ulaby, F. T. (1990). "Scattering models for distributed targets." Radar polarimetry for geoscience applications, C. E. F. T. Ulaby, ed., Artech House, Norwood, 364p.
- Lang, R. H., Chauhan, N. S., Ranson, K. J., and Kilic, O. (1994). "Modeling P-band returns from a red pine stand." *Remote Sens. Environ.*, 47, 132-141.
- Lang, R. H., Landry, R., Kavakhoglu, Ö., and Deguise, J. C. (1995). "Simulation of microwave backscatter from a red pine stand." SPIE, 2314, 538-548.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Goze, S., Kong, J. A., Hsu, C. C., Han, H. C., and Shin, R. T. (1992). "Microwave interaction and analysis of polarimetric data : retrieval of forest biomass." 9352/91/NL/LC (SC), Contrat ESA/ESTEC.
- Lee, J. K., and Kong, J. A. (1985). "Active microwave remote sensing of an anisotropic random medium layer." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23, 910-928.
- Lin, Y.-C., and Sarabandi, K. "A coherent scattering model for forest canopies based on Monte Carlo simulation of fractal generated trees." ,Proceedings of IGARSS'96 Symposium, Lincoln Nebraska USA.
- Lopes, A., and Mougin, E. (1990). "Microwave coherent propagation in cylindrical-shaped forest components : interpretation of attenuation observations." *IEEE Trans. Geosci. Remote* Sensing, 28(3), 315-324.
- Lopes, A., Mougin, E., Le Toan, T., Karam, M. A., and Fung, A. K. (1991). "A simulation study on the influence of leaf orientation on ellyptically polarized microwave propagation on a coniferous forest." Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 5(7), 753-776.
- McDonald, K. C., Dobson, M. C., and Ulaby, F. T. (1991). "Modeling multi-frequency diurnal bacscatter from a Walnut orchard." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 29(6), 852-863.
- McDonald, K. C., and Ulaby, F. T. (1993). "Radiative transfer modeling of discontinuous tree canopies at microwave frequencies." *International Journal of Remote Sensing*, 14(11), 2097-2128.
- Moghaddam, M., and Saatchi, S. (1995). "Analysis of scattering mechanisms in SAR imagery over Boreal forest : results from BOREAS'93." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(5), 1290-1296.

- Mougin, E. (1989). "Télédétection de la végétation par micro-ondes. Mesure et modélisation des effets des paramètres du couvert sur la propagation et la rétrodiffusion des ondes radar," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, ENSAT, Toulouse, 227p.
- Mougin, E., Lopes, A., Karam, M. A., and Fung, A. K. (1990a). "Modelling the microwave polarimetric transmission through forest canopie.".
- Mougin, E., Lopes, A., and Le Toan, T. (1990b). "Microwave propagation at X band in cylindricalshaped forest components : attenuation observations." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 28(1), 60-69.
- Nghiem, S. V., Le Toan, T., Kong, J. A., Han, H. C., and Borgeaud, M. (1993). "Layer model with random spheroidal scatterers for remote sensing of vegetation canopy." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 7(1), 49-75.
- Peake, W. H. (1959). "Interaction of electromagnetics waves with some natural surfaces." *IRE Trans.* on Antennas and Propagation, AP-7, 324-329.
- Picard, G. (1997). "Etude expérimentale et théorique de la diffusion radar des milieux forestiers," DEA, Université de Paris VII, Paris, 23p.
- Saatchi, S. S., Le Vine, D. M., and Lang, R. (1994). "Microwave backscattering and emission model for grass canopies." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 32(1), 177-186.
- Saatchi, S. S., and McDonald, K. C. (1997). "Coherent effects in microwave backscattering models for forest canopies." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35(4), 1032-1044.
- Schanda, E. "Interaction of electromagnetic waves with the environment." Ecole d'été de physique spatiale du CNES, Principes physiques et mathématiques de la télédétection, Strasbourg France, 449-463.
- Schanda, E. (1986). Physical fundamentals of remote sensing, Berlin, Heildelberg.
- Sun, G., and Ranson, K. J. (1995). "A three-dimensional radar backscatter model for forest canopies." IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33(2), 372-382.
- Sun, G., Simonett, D. S., and Strahler, A. H. (1991). "A radar backscatter model for discontinuous coniferous forests." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 29(4), 639-650.
- Ulaby, F. T., and El-Rayes, M. A. (1987). "Microwave dielectric spectrum of vegetation- part II: dualdispersion model." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-25(5), 550-557.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1982a). *Microwave remote sensing : active and passive*, Artech House, Norwood.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1982b). *Microwave remote sensing : active and passive*, Artech House, Norwood.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1986). *Microwave remote sensing : active and passive*, Artech House, Norwood.
- Ulaby, F. T., Sarabandi, K., Mc Donald, K., Whitt, M., and Dobson, M. G. (1990). "Michigan microwave canopy scattering model." *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), 1223-1253.
- Way, J. B., Paris, J., Dobson, M. G., McDonald, K., Ulaby, F. T., Weber, J. A., Ustin, S. L., Vanderbilt, V. C., and Kasischke, E. S. (1991). "Diurnal change in trees as observed by optical and microwave sensors : the EOS synergism study." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 29(6), 807-821.
- Weber, J. A., and Ustin, S. L. (1991). "Diurnal water relations of Walnut trees : implications for remote sensing." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 29(6), 864-874.
- Whitt, M. W., and Ulaby, F. T. (1994). "Radar response of periodic vegetation canopies." International Journal of Remote Sensing, 15(9), 1813-1848.
- Yueh, S. H., Kong, J. A., Jao, J. K., Shin, R. T., and Le Toan, T. (1992). "Branching model for vegetation." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 390-402.

Chapitre 7

Approche spatialisée d'estimation des paramètres de la ressource forestière



Chapitre 7

Approche spatialisée d'estimation des paramètres de la ressource forestière

7.1 Introduction	224
7.2 Différents scénarios d'estimation spatialisée forestière	de la ressource 225
 7.2.1 Premier scénario : estimation des paramètres fore données RSO 7.2.2 Deuxième scénario: simulation 3D et estimation of forestiers à l'aide du modèle architectural de croisssance 7.2.2.1 Simulation et visualisation de pins noirs en 3D 7.2.2.2 Obtention d'informations forestières géolocalisées p Couplage SIRS et maquette Estimation des paramètres forestiers Simulation visuelle d'un paysage 	estiers à l'aide des 226 des paramètres ce 227 ar maquette 228 228 228 228 229
7.3 Résultats d'estimation spatialisée des parame	ètres forestiers 229
 7.3.1 Par les données RSO seules 7.3.1.1 Identification des principales sources d'erreurs de l' 7.3.1.1.1 Erreurs d'estimation liées aux forts volumes et à la to 7.3.1.1.2 Erreurs d'estimation liées aux variations des caractér 7.3.1.1.3 Erreurs d'estimation liées à l'imprécision sur le coeffi 7.3.1.2 Exemple de spatialisation de paramètres de la resso 7.3.2 Par le modèle architectural de croissance AMAP 7.3.2.1 Estimation des paramètres forestiers par la maquet informations de terrain 7.3.2.2 Estimation des paramètres forestiers par la maquet issues du RSO 	229 inversion 231 poggraphie 231 ristiques forestières 232 cient de rétrodiffusion 234 purce forestières 235 237 tte pilotée par les 237 tte pilotée par les 237 tte pilotée par les données 239
7.4 La simulation d'un paysage forestier	242
7.5 Conclusions	242
Références bibliographiques	245

.

Chapitre 7

Approche spatialisée d'estimation des paramètres de la ressource forestière

"Une carte n'est pas le territoire" Alfred Korzybski

7.1 Introduction

La cartographie de paramètres sylvicoles et la simulation visuelle d'un paysage forestier peuvent trouver leur utilité dans plusieurs domaines. Citons par exemple en sylviculture, l'aide à l'aménagement et la gestion de la ressource, l'évaluation de l'impact visuel et environnemental des pratiques sylvicoles, le suivi de la restauration des terrains montagneux par reboisement, la prévention et la prévision des risques naturels (feux, châblis, parasites...). D'autre part, elles peuvent servir, entre autre, à des disciplines scientifiques concernant le milieu forestier comme l'écophysiologie végétale, les sciences environnementales et les études d'interaction végétation-atmosphère (flux de carbone). A ces fins, des méthodes d'estimation de paramètres forestiers utilisant des technologies récentes télédétection radar et les modèles architecturaux de croissance d'arbres sont envisagées. Ces outils prennent toute leur puissance lorsqu'ils sont intégrés dans un Système d'Information Géographique (SIG), à des fins de spatialisation de l'information forestière.

Ces techniques présentent chacune des intérêts complémentaires. D'une part, les données radar intégrées dans un SIG, incluant entre autres un modèle numérique de terrain (MNT) et le parcellaire forestier, peuvent fournir directement une information forestière géolocalisée; cependant, les données radar ne permettent d'estimer avec une précision satisfaisante qu'un nombre réduit de paramètres forestiers intégrateurs (cf chapitre 4 et 6) : âge du peuplement, volume (m³/ha) et biomasse (kg/ha) de la masse ligneuse (Beaudoin 1992). De là, on peut estimer d'autres paramètres à condition de disposer de relations allométriques valables pour l'espèce dans les conditions stationnelles abordées (Dobson et al. 1995b).

D'autre part, la maquette architecturale de croissance d'arbres validée pour le pin noir d'Autriche dans un milieu donné, peut fournir comme nous l'avons vu un ensemble beaucoup plus complet de paramètres forestiers.

En effet, lorsque les caractéristiques architecturales des éléments constituants du couvert sont modélisées, l'estimation de plusieurs paramètres peut être réalisée, au niveau d'un individu, par la simulation de son architecture sous forme d'une maquette. La spatialisation de l'information forestière passe alors par la simulation d'un certain nombre d'individus d'un peuplement ou d'une parcelle d'un âge donné. Ceci nécessite la connaissance de la localisation et de la superficie du peuplement concerné, de l'âge et de la densité de tiges à l'hectare, données disponibles dans un SIG grâce à des informations de terrain et/ou aux données de télédétection. A terme, l'intérêt d'un couplage de ces deux techniques réside donc dans l'estimation géolocalisée d'un paramètre forestier par radar, permettant le pilotage du modèle architectural, pour dresser la cartographie de plusieurs paramètres de la ressource forestière et restituer visuellement en 3D un paysage forestier (Beaudoin et al. 1996).

A cette fin, nous présentons dans le cadre de ce chapitre les résultats d'une approche méthodologique originale d'utilisation séparée ou couplée de ces outils *via* un SIG. La méthodologie sera illustrée sur la forêt domaniale de Mende.

7.2 Différents scénarios d'estimation spatialisée de la ressource forestière

La méthodologie proposée préconise l'utilisation des données RSO et celle du modèle architectural de croissance AMAP *via* un SIG selon deux scénarios (Figure 7-1) :

- 1. Un premier scénario utilise les **données RSO intégrées dans un SIG**, ayant subies au préalable un post-traitement approprié. Les données radar permettent alors une estimation de quelques paramètres forestiers au niveau de la parcelle, comme l'âge et le volume des tiges, grâce à l'inversion d'un modèle simple empirique validé par la théorie. Le résultat est une cartographie des paramètres estimés sous forme de nouvelles couvertures SIG.
- 2. Un deuxième scénario utilise le modèle architectural de croissance d'arbre couplé au SIG. Le modèle est piloté par l'âge des parcelles, obtenu soit par des informations de terrain existantes, soit par des données RSO corrigées et intégrées dans un SIG, afin de simuler une maquette pour un arbre d'âge donné. On peut spatialiser ensuite cette maquette par itération de la simulation pour réaliser A) une estimation de paramètres forestiers des parcelles, sous forme de nouvelles couvertures SIG et B) une simulation visuelle 3D du paysage forestier.



Figure 7-1 : Méthodologie d'utilisation de données RSO et d'un modèle architecturale de croissance d'arbre *via* un SIG, en vue de l'obtention d'informations forestière géolocalisées.

7.2.1 Premier scénario : estimation des paramètres forestiers à l'aide des données RSO

Outre l'impact de la topographie sur le lien entre données radar-données terrain, la structure du peuplement influence également cette liaison (cf chapitre 6). Il s'ensuit que dans une démarche de spatialisation de la ressource forestière, il conviendra tout d'abord de cartographier, dans la mesure du possible, les grandes formations structurales forestières avant d'appliquer des algorithmes d'inversion du signal en biomasse. En amont de cette approche, et dans une optique de démarche générale, une phase de classification est à envisager pour des zones où des informations précises d'occupation du sol ne sont pas disponibles. De récents travaux ont montré la capacité des données radar : polarimétriques (De grandi et al. 1994; Pierce et al. 1994), multi-dates (Ranson and Sun 1994) ou multicapteurs (Dobson et al. 1996; Dobson et al. 1995a) pour la classification des grandes formations forestières. Dans le cadre de ce travail, l'objectif premier d'estimation de la ressource forêt de pin noir d'Autriche) en utilisant *a priori* l'information disponible sur l'occupation du sol dans la zone d'étude.

Les résultats du chapitre 4 ont montré de bonnes corrélations entre σ^0 et les paramètres forestiers. La liaison de type logarithmique (7-1) observée a ensuite été interprétée par le biais de la modélisation théorique développée au chapitre 6.

$$\sigma^0 = a \ln(paramètre forestier) + b$$
 (7-1)

L'amélioration de la liaison en terrain accidenté après correction, ne doit pas faire oublier la saturation du signal radar avec le niveau de biomasse, niveau proportionnel à la longueur d'onde. En bande L, on perd la sensibilité à la biomasse au-delà de 200-250 m³/ha, ce qui est fortement contraignant dans certains milieux forestiers comme la forêt tropicale.

En synthèse des résultats présenté au cours des précédents chapitres, la configuration L-HV à incidence élevés (55°) est apparue optimale pour l'estimation des paramètres de la ressource forestière en terrain accidenté. Cette configuration n'est cependant disponible depuis l'espace qu'avec les données SIR-C acquises en 1994 et elle est prévue dans un avenir proche (2000-2002) sur la plate-forme LightSAR de la NASA/JPL. A défaut, la configuration L-HH 38° offerte par JERS-1 est également intéressante quoique moins sensible. Dans le cas présent, nous nous baserons uniquement sur les résultats présentés au chapitre 4 obtenus avec la configuration L-HV de SIR-C à 55° d'incidence pour illustrer la méthodologie d'inversion.

Le coefficient σ^0 L-HV est analysé en fonction des paramètres forestiers mesurés sur le terrain au niveau d'unités élémentaires du LCT, chacune représentative de la parcelle à laquelle elle appartient. L'intensité moyenne des pixels (proportionnelle à σ^0) est confrontée aux mesures des paramètres forestier intégrateurs (volume tiges, âge) fortement liés aux paramètres du houppier (diamètre des branches primaires) directement impliqué dans la rétrodiffusion radar (*cf* chapitre 6). Ainsi, le comportement affiche une forte augmentation de la rétrodiffusion radar entre 0 et 40 ans (Figure 7-2a), correspondant à une variation du volume de 0 et 200 -250m³/ha (Figure 7-2b), suivi d'une saturation du signal radar due à la perte de sensibilité et à l'atténuation de la bande L dans le couvert pour des volumes supérieurs à 200-250 m³/ha. Le comportement de rétrodiffusion peut être approché par l'équation (7-1) permettant d'obtenir une corrélation globale significative ($\mathbb{R}^2 \approx 0.8$). Des tendances similaires sont obtenue pour la rétrodiffusion radar en fonction de l'âge et du volume des fûts, du fait de la corrélation de nature phénologique, d'une part entre ces paramètres et, d'autre part, de ces paramètres avec la biomasse ligneuse du houppier physiquement relié au σ^0 L-HV. La nature de ces relations a été interprétée au chapitre précédent par la modélisation théorique montrant le lien physique complexe existant entre le niveau de rétrodiffusion et la combinaison des diamètres des branches primaires et de leur densité volumique.



Figure 7-2 : Rappels des relations statistiques observées entre le coefficient de rétrodiffusion σ^0 et a) l'âge de la parcelle et b) le volume des fûts.

Ce premier scénario est basé sur la mise en œuvre d'inversion des relations statistiques expérimentales validées par la théorie observées entre le signal radar et les paramètres foorestiers d'intérêts.

7.2.2 Deuxième scénario: simulation 3D et estimation des paramètres forestiers à l'aide du modèle architectural de croisssance

7.2.2.1 Simulation et visualisation de pins noirs en 3D

Les méthodes de simulation et de visualisation des arbres utilisées, sont basées sur l'approche de modélisation développée dans le cadre de l'AMAP présentées en détail au chapitre 5. Les maquettes obtenues permettent de visualiser la variabilité de l'architecture pour un âge donné ou bien l'évolution architecturale au cours du temps pour un individu donné. Il est alors possible de localiser chacune des parties de la plante virtuelle et d'en donner des caractéristiques quantitatives (hauteur, diamètre, volume) au travers de l'interface AMAP2SAR. Il est également possible via l'interface AMAP2SAR d'estimer le volume du fût, du houppier, de distinguer les parties actives des zones mortes, les volumes par ordre de ramification etc... Ainsi, en dehors de caractéristiques accessibles directement par la mesure (hauteur, diamètre, volume du tronc), il est ainsi possible d'accéder à tout un ensemble de paramètres difficilement estimables sur le terrain.

7.2.2.2 Obtention d'informations forestières géolocalisées par maquette

Couplage SIRS et maquette

En vue de l'obtention d'informations forestières géolocalisées, nous disposons désormais d'un modèle architectural de croissance du pin noir d'Autriche, permettant:

- avec le moteur de croissance *AMAP*sim, de simuler correctement un individu âgé entre 0 et 45 ans, en vue de sa restitution graphique et de l'extraction de ses paramètres forestiers;
- avec le module LandMaker d'AMAP, de simuler visuellement un paysage forestier, en plantant automatiquement des parcelles avec des arbres simulés par AMAPsim et de les positionner géographiquement sur un terrain modélisé par un MNT.

Nous disposons également du SIG comprenant :

- le parcellaire forestier et le MNT,
- les parcelles, l'âge et la densité de tiges, obtenus par mesures *in situ* et/ou par télédétection radar.

Il est donc naturel de chercher à établir un dialogue entre les données d'un SIG et *AMAP*. A l'origine, (Lecoustre et al. 1993) ont présenté une simulation de paysage forestier réalisée par le couplage des logiciels *AMAP* et TerraSoft sur la forêt de Chichibu (Université de Tokyo, Japon) dans un but visuel et paysager. Nous proposons ici un couplage beaucoup plus étroit avec un SIG (*Arc-Info*), afin de générer à la fois une cartographie des paramètres forestiers et des vues réalistes 3D de paysages forestiers.

Dans la couverture vecteur d'Arc-info figurent les polygones décrivant les parcelles ainsi qu'une table attributaire indiquant, pour chaque parcelle, l'âge moyen des arbres et la densité de tiges à l'hectare. Ainsi, le couplage passe par 1) l'accès en lecture de cette table pour en extraire les paramètres nécessaires pour *AMAPsim* et *Landmaker*, et 2) l'accès en édition et en écriture afin d'inclure les résultats d'estimation de paramètres forestiers obtenus avec *AMAPsim*, permettant la spatialisation de l'information grâce à une nouvelle colonne d'attributs.

Estimation des paramètres forestiers

Grâce à cette interface, *AMAPsim* est piloté par les attributs de la parcelle concernée. Il en résulte une maquette dont nous extrayons des informations via *AMAP2SAR* sur les arbres présents dans la parcelle :

- des histogrammes de distribution, pour un paramètre dendrométrique comme le dph ou la hauteur des arbres, ou structural comme l'angle d'insertion des branches ou plus généralement la géométrie de la branchaison ;
- des histogrammes de distribution de paramètres au sein d'une strate horizontale dans le couvert ;

• une estimation de paramètres ramenés à l'unité de surface comme le volume et la biomasse compartimentée (fûts, branches, aiguilles) à l'hectare.

Ces résultats peuvent constituer autant de nouveaux attributs des parcelles, intégrables dans une couverture SIG.

Simulation visuelle d'un paysage

A partir de simulations d'individus par *AMAPsim*, grâce à l'interface avec *Arc-Info*, on passe ensuite au module *Landmaker* d'AMAP pour réaliser alors le paysage en positionnant sur le MNT les parcelles concernées et les individus simulés pour chacune d'entre elles. Au sein de chaque parcelle, la densité de tiges est utilisée pour calculer un maillage de répartition des individus.

7.3 Résultats d'estimation spatialisée des paramètres forestiers

7.3.1 Par les données RSO seules

Ces résultats se bases sur les relations exposées à la Figure 7-2 pour l'âge et le volume des fûts à l'hectare. L'équation (7-1) est utilisée pour inverser parcelle à parcelle le σ^0 L-HV en âge et en volume des tiges conformément au schéma de la Figure 7-1. Les relations permettant d'extraire les paramètres forestiers à partir des données radar et correspondant aux paramètres du Tableau 7-1 sont présentées à la Figure 7-3.



Figure 7-3 : Relations ayant servies à l'estimation des paramètres forestiers à partir du signal radar pour a) âge, b) le volume des fûts, ajustées sur les 58 unités élémentaires homogènes.

La loi empirique ayant servit à l'inversion du signal en biomasse est basée sur l'équation (7-1) et prend la forme suivante :

$$\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{a} * \mathbf{e}^{\mathbf{b}\sigma^0} \tag{7-2}$$

avec \hat{B} est le volume des fûts ou l'âge estimé, a et b sont des coefficients ajustés empiriquement et σ^0 est le coefficient de rétrodiffusion exprimé en dB.

Les résultats de l'inversion confrontés aux mesures terrain sont présenté à la Figure 7-4.



Figure 7-4 : Comparaisons des paramètres obtenus par inversion des données radar et mesurés sur le terrain : a) l'âge et b) le volume des fûts.

L'analyse de la Figure 7-4 montre graphiquement que ces erreurs sont fortement imputable à un groupe d'observation correspondant aux parcelles à fort volume (> 500 m³/ha) en configuration topographique marquée (fort angle d'incidence local). D'autre part, l'utilisation d'une loi exponentielle entraîne des variations de l'erreur d'estimation parallèlement à l'accroissement du σ^0 induisant de plus fortes incertitudes sur les peuplements âgés. A cela, s'ajoute les effets résiduels de la topographie observés sur ces mêmes peuplements amplifiant les erreurs d'inversion.

Au Tableau 7-1 sont reprises les valeurs des coefficients a, b de la lois d'inversion ainsi que le niveau de saturation pour l'âge et le volume des fûts.

	Volume des fûts	Age
a	584113	13071
b	0,5957	0,4311
R ²	0,8	0,82
EQM $(\Delta \hat{B})$	140 (m³/ha)	17 (ans)
Niveau de saturation (dB)	200-250 (m³/ha)	50 (ans)

Tableau 7-1 : Paramètres des lois d'inversion empirique obtenues pour l'âge et le volume des fûts à partir de l'ensemble de l'échantillon et pour la configuration L-HV.

L'erreur quadratique moyenne globale (EQM) est calculée à partir de la méthode d'eustachage sur l'ensemble de l'échantillon. En effet, afin d'utiliser la totalité de l'échantillon pour estimer la qualité de l'inversion, la méthode dite d'eustachage ou encore appelée "jackknife" est appliquée (Tomassone et al. 1993). Cette méthode consiste à supprimer une observation et à calculer l'estimateur à partir de la loi empirique (7-2) calée sur les (n-1) autres. Cette opération "artificielle" peut être répétée pour les n observations. On dispose ainsi de n observations pour quantifier l'erreur commise sur le paramètre considéré au travers des n estimations notés \hat{p}_i (7-3).

$$E_n - \{i\} \to \hat{p}_i = f_{n-1}(i)$$
 (7-3)

où E_n est l'effectif total de l'échantillon et f_{n-1} est la loi d'inversion calculée sur les n-1 observations. De fortes erreurs quadratiques moyennes globales respectivement de 140 m³/ha pour le volume des fûts et de 17 ans pour l'âge des peuplements sont observées.

Ces résultats d'inversion cache des disparités en fonction de l'âge visibles sur la Figure 7-4 indiquant que l'erreur évolue avec l'âge, la structure du peuplement et sa situation topographique. L'inversion du signal radar en paramètres de la ressource forestière est donc soumise à différentes sources d'erreurs dont nous nous proposons d'examiner l'impact.

7.3.1.1 Identification des principales sources d'erreurs de l'inversion

7.3.1.1.1 Erreurs d'estimation liées aux forts volumes et à la topographie

Pour cela dans un premier temps, nous avons reconsidéré l'extraction du signal en éliminant des lois d'inversion les 12 unités de peuplements âgés (très fort volume > 500 m^3 /ha au dessus du seuil de saturation) situées dans des conditions topographiques marquées (pente > 25°). Les résultats de la nouvelle confrontation entre données mesurées-données inversées sont repris à la Figure 7-5.



Figure 7-5 : Comparaison des paramètres obtenus par inversion du signal radar et mesurés sur le terrain pour 46 des 58 unités.

Visuellement, les résultats de la Figure 7-5 montrent une amélioration de l'inversion se répercutant sur les paramètres des lois d'inversion reprises au Tableau 7-2 et par conséquent sur les EQM globales. On constate d'une part l'augmentation systématique du R^2 et d'autre part une diminution de plus de la moitié des EQM confirmant l'impact des unités à fort volume et situées en forte pente sur l'EQM globale. Ainsi, les 12 unités écartées de l'inversion, soit 20% de l'effectif, pèsent pour plus de la moitié sur l'erreur globale d'estimation. Cette dernière configuration permet d'obtenir des EQM respectivement de 8 ans pour l'âge et de 67 m³/ha pour le volume se rapprochant des précisions d'estimations admises dans le cadre d'études locales et régionales.

	Volume des fûts	Age
a	517662	14507
b	0,5938	0,4417
<u>R</u> ²	0,81	0,85
EQM $(\Delta \hat{B})$	67 (m³/ha)	8 (ans)
Niveau de saturation (dB)	200-250 (m³/ha)	50 (ans)

Tableau 7-2 : Paramètres des lois d'inversion empirique et EQM globales obtenues pour l'âge et le volume des fûts à partir de 46 des 58 unités que comporte l'échantillon et pour la configuration L-HV.

Les paramètres a et b de la relation d'inversion ne montrent pas de forte différence en fonction de la prise en compte ou non des forts volumes dans leur estimation. Cela montre que l'impact des unités à fort volume se répercute essentiellement sur l'erreur d'estimation avec un rôle moindre sur la tendance des lois d'inversions. Les effets résiduels dus à la topographie jouent donc un rôle amplificateur sur les erreurs d'estimations des peuplements âgés présentant déjà de fortes erreurs en liaison avec la nature exponentielle de la loi d'inversion.

Toutefois, les résultats de la Figure 7-5 font également émerger de plus fortes variabilité pour un certain nombre de points comparé au restant de l'échantillon. Ces points ne correspondent ni à de forts volumes ni à des situations topographiques marquées, indiquant que leur variabilité est à chercher ailleurs. Nous avons vu au chapitre 4 qu'outre la topographie, la structure de la branchaison du couvert forestier était une source supplémentaire de la variation du signal radar indépendamment de la variation de la ressource forestière. Dans le cas de peuplement forestier homogène composés par la même essence forestière, les variations de structure peuvent être en grande partie imputées à la densité de tiges du peuplements.

7.3.1.1.2 Erreurs d'estimation liées aux variations des caractéristiques forestières

En analysant le comportement des écarts entre valeurs observées et valeurs estimées sur le volume en fonction des écarts sur l'âge inféré par radar, une structuration apparaît montrant une tendance positive entre les écarts mesurés pour les deux paramètres (Figure 7-6). Les résultats permettent d'identifier un petit groupe d'unités présentant de fort écarts à la fois sur l'âge et le volume. Ces unités correspondent au groupe d'unité de la zone A pointé à la Figure 7-5. Ces unités présentent une erreur d'inversion systématiquement supérieure à celle observée sur les autres unités de la même classe d'âge et de volume. Un des paramètres les plus fluctuant observé sur les peuplements de pins noirs de la zone d'étude concerne la densité. En effet, des peuplements de même âge peuvent afficher des valeurs de densités fortement différentes. Ces variations se répercutent sur la structure du houppier avec de plus ou moins fortes densités d'éléments diffuseurs au mètre cube et sur les profils des diamètres de branches primaires se répercutant sur le niveau du signal radar et par delà sur l'inversion en paramètres forestiers.



Figure 7-6 : Evolution des écarts (entre données mesurées et données estimées via l'inversion des données RSO) de volume en fonction de ceux observés pour l'âge.

Pour ce petit groupe d'unités, l'évolution des écarts d'âge en fonction des écarts de la densité à la tendance observée sur le site est explorée. Les résultats sont présentés à la Figure 7-7.



Figure 7-7 : Evolution des écarts d'inversion obtenues sur a) l'âge et b) le volume en fonction de l'écart de la densité par rapport à la tendance moyenne observé sur le site

Une évolution croissante des écarts d'inversion sur l'âge et le volume avec les écarts sur la densité est observée. Cette tendance est légèrement plus nette pour le volume exceptée une de ces unités. Ces résultats s'ils semblent indiquer l'impact de la densité sur l'erreur d'inversion ne permettent en aucun cas d'étayer clairement l'existence d'un lien univoque de la densité sur cette erreur. En effet, il n'y a pas réciprocité de ces résultats, à savoir que de forts écarts sur la densité n'entraînent pas systématiquement de forts écarts sur les paramètres forestiers inversés. En fait, la complexité de la liaison entre les propriétés de la cible et le signal radar montré au chapitre 6 et la corrélation des paramètres forestiers (cf chapitre 3) rend difficile d'interpréter à *posteriori* les erreurs d'inversions liées aux propriétés de la cible. Cet aspect mériterait d'être abordé dans une approche directe par une étude de sensibilité à partir du modèle théorique.

Outre l'impact sur l'inversion des caractéristiques du couvert forestiers et de la topographie, des erreurs d'estimation sur les quantités radar (coefficient de rétrodiffusion) peuvent également entraîner des erreurs d'inversion.

7.3.1.1.3 Erreurs d'estimation liées à l'imprécision sur le coefficient de rétrodiffusion

Afin de prendre en compte l'impact de la précision sur le σ^0 dans l'inversion des paramètres forestiers, nous avons utilisé le modèle proposée par (Borgeaud et al. 1993) de la forme :

$$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{B}} \pm \Delta \mathbf{B}_1 \pm \Delta \mathbf{B}_2 \tag{7-4}$$

avec, B l'âge ou le volume de fût, \hat{B} l'âge ou le volume estimé par les relations empiriques d'inversions, ΔB_1 est l'erreur due à la relation empirique, et ΔB_2 est l'erreur sur le coefficient de rétrodiffusion (supposée connue ou donnée pour le système). Toutefois, ΔB_2 dépend du coefficient de rétrodiffusion et peut être dérivé de l'équation (7-2) comme suit :

$$\Delta B_2 = abe^{b\sigma^0} \Delta \sigma^0 \tag{7-5}$$

A partir de l'équation (7-5) une étude sensibilité de l'erreur d'estimation commise sur les paramètres forestiers (âge et volume des fûts) en fonction du coefficient de rétrodiffusion et pour 3 niveaux de précision ($\Delta\sigma^0$) 0,5, 1,0 et 1,5 dB est réalisée (Figure 7-8).



Figure 7-8 : Erreur commise sur l'estimation de a) l'âge et b) le volume des fûts à partir des données SIR-C L-HV pour trois niveaux de précision sur le coefficient de rétrodiffusion.

Avec une précision de 1dB sur le σ^0 , l'erreur sur l'âge reste en deçà de 20 ans ($\sigma^0 < -14$ dB), exceptée pour les peuplements âgés ($\sigma^0 > -14$ dB) où l'erreur passe à près de 60 ans pour un σ^0 de -11 dB. Dans le cas du volume des fûts, un $\Delta\sigma^0$ de 1 dB entraîne une erreur d'estimation comprise entre 50 et 100 m³/ha pour des volumes faibles à intermédiaires ($\sim 200 \text{ m}^3/\text{ha}$). Au delà, l'erreur croit très vite pour atteindre 300 m³/ha à -13 dB. De meilleures précisions sont obtenues pour un $\Delta\sigma^0$ de 0,5 quelle que soit le paramètre considéré. Néanmoins les précisions sur le σ^0 sont rarement en deçà de 1 dB.

La configuration L-HV peut être utilisée pour estimer les paramètres forestiers au niveau local et régional pour des biomasses faibles à intermédiaires ($< 200 \text{ m}^3/\text{ha}$). Au delà, la précision plus faible peut convenir à une approche globale où l'on tolère de moindres précisions. Dans le cas des données acquises en terrain accidenté, un biais supplémentaire est introduit sur l'inversion des paramètres forestiers en raison d'effets topographiques résiduels d'autant plus marqués qu'il s'agit de peuplements âgés. Il conviendra de prendre en compte ce biais dans la génération des cartes de paramètres de la ressource forestière. A la lumière de ces résultats, la spatialisation de l'âge et du volume des tiges a été entreprise sur la forêt domaniale de Mende.

7.3.1.2 Exemple de spatialisation de paramètres de la ressource forestières

La Figure 7-9 présentent les cartes d'âge et de volume des fûts obtenues par inversion à partir de l'équation (7-2) parcelle à parcelle du signal radar sur l'ensemble des parcelles de la forêt domaniale de Mende. Ces cartes permettent de retrouver les zones correspondant aux principales classes d'âge présentent sur le site. Ces cartes géoréférencées sont directement intégrable dans un SIG et sont d'un intérêt flagrant pour actualiser et compléter les bases de données géographiques existante. L'utilisation de cette information spatialisée est bien entendu assujettie aux besoins des gestionnaires forestiers accompagnée d'une mesure de la "qualité" de cette estimation.

Les résultats médiocres présentés dans un premier temps nous ont permis de pointer les limites de ce type de démarche dans le cas de peuplements forestiers situés en terrain accidenté. Toutefois, comme nous l'avons montré, l'erreur globale d'estimation n'est pas un bon estimateur de la qualité de l'inversion qui si elle est médiocre dans le cas des peuplements âgés situés en terrain fortement accidenté, s'améliore significativement pour les peuplements plus jeunes situés en terrain moins accidenté (pente < 25 °). Il conviendra donc de pondérer l'estimation en fonction ici de la classe d'âge ou du niveau de volume à laquelle elle s'adresse.

La télédétection RSO seule au travers de l'image satellitale intégrer dans un SIG est une première réponse a la cartographie de la ressource forestière. Cette première voie peut être complété voire associée à d'autres scénarios de spatialisation de la ressource utilisant le modèle architectural de croissance AMAP. Des résultats dans ce sens sont présentés au paragraphe suivant.



Figure 7-9 : Cartes a) d'âge et b) de volume des fûts à l'hectare obtenues par inversion du signal radar L-HV.
7.3.2 Par le modèle architectural de croissance AMAP

La qualité du rendu visuel des simulations 3D (figures 5-13, 5-14 chapitre 5) permet d'envisager sans difficultés les potentialités de la simulation visuelle pour recréer des peuplements réalistes. La simulation d'un paysage par réitération de ce type de simulation et une répartition spatiale sur un MNT apparaît réalisable et des plus intéressantes d'un point de vue paysagé. Mais avant tout, comme nous l'avons montré, il est possible d'accéder aux paramètres forestiers (classiques et détaillés) des maquettes d'arbres simulés à partir du moment où celles-ci sont validées pour des conditions stationnelles données.

Toutefois, deux voies existent pour piloter le modèle de croissance (Figure 7-1) à partir des informations de la table attributaire contenues dans la couverture SIG :

- i) une voie dite "directe" où l'âge des peuplements servant à piloter le modèle de croissance est donné par les informations de terrain,
- ii) une voie dite "indirecte" où l'âge est estimé par inversion des données radar.

7.3.2.1 Estimation des paramètres forestiers par la maquette pilotée par les informations de terrain

La faisabilité d'estimation de paramètres obtenus par la maquette est évaluée pour diverses unités pour lesquelles des informations de terrain sont disponibles et ont été acquises indépendamment de celles utilisées pour l'établissement de la maquette. Au chapitre 5, la validation de la maquette a montré les potentialités d'estimation des paramètres forestiers classiques par cette dernière. L'intérêt reste toutefois l'accès à des paramètres intégrateurs comme le volume des fûts à l'hectare.

La Figure 7-10 présente l'estimation du volume des tiges à l'hectare à l'aide de la maquette, pilotée par les mesures expérimentales effectuées sur l'âge et la densité de tiges à l'hectare.



Figure 7-10 : Estimation du volume des fûts par hectare à l'aide de la maquette pilotée par l'âge mesuré sur la placette.

L'estimation du volume montre de faibles écarts pour les faibles âges, se dégradant pour les âges plus élevés, mettant en évidence les limites actuelles d'extrapolation du modèle de croissance pour des parcelles âgées d'une part et avec de très forte densité d'autre part. L'erreur quadratique moyenne calculée est de 65 m³/ha pour un échantillon de 44 unités sur les 58 unités échantillonnées. L'ensemble de l'échantillon n'ayant pu être utilisé en raison de la limite supérieure de validité des maquettes obtenues ne dépassant pas 45 ans (*cf* chapitre 5).

La dispersion des données observée sur la Figure 7-10 peut également être attribuée à l'erreur d'estimation des mesures de terrain servant à caler le modèle architectural, et à l'incertitude sur les paramètres pilotant le modèle. Une autre source d'erreur provient probablement de l'impact des conditions stationnelles, des pratiques sylvicoles et de l'hétérogénéité de la structure du peuplement, non prises complètement en compte dans le modèle de croissance. Cette prise en compte dépend directement de l'échantillonnage réalisé pour paramétrer le moteur de croissance.

Ensuite, il est aisé d'envisager à partir de la maquette validée, d'extraire différents paramètres forestiers classiques plus ou moins difficilement mesurables *in situ*. Un exemple d'estimation non conventionnelle de paramètres forestiers est présentée à la Figure 7-11, avec la répartition du volume total sur pied entre les houppiers et les fûts, en fonction de l'âge.



Figure 7-11 : Estimation du volume réparti entre le houppier et le fût, en fonction de l'âge.

La variabilité augmente fortement avec l'âge, les "pics" observés sont corrélés avec les fortes variabilités des densités mesurées expérimentalement sur les peuplements forestiers du site d'étude. Ce type d'information est intéressante, ne serait ce que pour l'interprétation des données radar, mais également pour des aspects écophysiologiques voire d'hydrologie forestière. Néanmoins, aucune évaluation de l'erreur commise sur ce type de données n'a été entreprise, ce qui nécessiterait la mise en œuvre d'une importante phase de mesures de terrain pour obtenir le volume compartimenté expérimental représentatif des peuplements forestiers présent sur site. Si les simulations d'AMAP donnent de bons résultats pour la majorité des unités échantillonnées, elles n'intègrent pas l'effet des fortes densités, en particulier sur la structure des peuplements de plus de 20 ans. Ainsi, un élargissement de l'échantillonnage servant au calage d'AMAP s'avère nécessaire si l'on veut prendre en compte la variabilité inter-peuplement liée à la variation des pratiques sylvicoles et dans une moindre mesure aux conditions stationnelles. L'étude de quelques peuplements forestiers de même âge mais situés dans des conditions stationnelles distinctes (fertilité, position sur versant, traitement sylvicole...) permettra de mieux tenir compte cette variabilité rencontrée sur le site.

Cette démarche visant à utiliser AMAP seul reste dépendante de la présence d'informations forestières assez précises (âge, densité) pour permettre le pilotage d'AMAP au travers du SIG. Ces informations ne sont malheureusement pas toujours présentent et dans ce cas la télédétection RSO peut être envisagée comme un supplétif concernant l'information sur l'âge des peuplements. L'autre avantage, provient de l'information spatialisée fournit par l'image RSO pouvant être directement intégrer dans la table attributaire de la couverture SIG.

7.3.2.2 Estimation des paramètres forestiers par la maquette pilotée par les données issues du RSO

Cette troisième voie, utilise la carte d'âge (Figure 7-9) générée à partir de l'inversion des données RSO qui est associée aux valeurs de densités expérimentales pour piloter le modèle architectural AMAP et estimer les paramètres de la ressource forestière. Ce scénario s'est limité aux unités de moins de 45 ans, limite d'âge supérieure des simulations AMAP pour le site.

La Figure 7-12 présente l'estimation de a) la hauteur et b) du volume des tiges à l'hectare, à l'aide de la maquette, cette fois-ci pilotée par l'âge estimé par radar et la densité de tiges à l'hectare mesurée expérimentalement (inaccessible de façon assez précise par télédétection radar).



Figure 7-12 : Comparaison entre les paramètres mesurés et les paramètres estimés par la maquette pilotée par les données radar pour : a) le volume des fût, et b) la hauteur.

Dans les deux cas, nous remarquons une précision médiocre d'estimation pour les unités de la zone A, en particulier pour le volume des fûts avec des volumes estimés avoisinant dans un cas les 1600 m³/ha! L'estimation sur la hauteur montre une tendance identique atténuée pour ces unités avec des surestimations systématiques par rapport aux unités restantes. Les erreurs quadratiques moyennes globales calculées dans cette configuration (Tableau 7-3) prennent de fortes valeurs traduisant, en particulier, la forte variabilité observée pour les unités de la zone A.

	Hauteur (m)	Volume fûts (m³/ha)
EQM calculée sur l'ensemble de l'échantillon soit 44 unités	3,6	297
EQM calculée sur l'échantillon diminué des unités présentant les forts écarts d'âge (>12 ans)	2	76

Tableau 7-3 : Erreurs Quadratiques Moyennes calculées pour a) la hauteur, et b) le volume des fûts entre les données mesurées et les données estimées *via* AMAP piloté par les données radar.

En considérant le cumul des erreurs dû au couplage, deux sources provenant d'une part, de l'estimation de l'âge par radar, et d'autre part, de l'erreur d'estimation des paramètres par la maquette peuvent être avancées. Conformément à la démarche d'identification des sources d'erreurs menée au paragraphe 7.3.1, une analyse de l'évolution des écarts entre valeurs observées et valeurs estimées sur la hauteur et le volume des peuplement forestiers en fonction des écarts sur l'âge inféré par radar a été menée. Les résultats sont présentés à la Figure 7-13.



Figure 7-13 : Evolution des écarts entre données mesurées et données estimées *via* AMAP pour a) le volume des fûts et b) en fonction des écarts d'âge.

Ces résultats permettent de retrouver le comportement observer à la Figure 7-6 avec des écarts sur le volume près de six fois supérieur pour certaine unités. Les graphiques permettent à nouveau d'isoler un petit groupe d'unité correspondant aux unités de la zone A identifier à la Figure 7-12 et à la Figure 7-5. La principale source d'erreur est donc l'incertitude sur l'âge obtenue par inversion des données radar. Cette incertitude est ensuite plus ou moins amplifiée au travers des simulations réalisées avec AMAP. En écartant ces unités (soit 6 unités) une amélioration significative et spectaculaire des EQM est observée (Tableau 7-3) avec une diminution de 75% et de 45 % de l'erreur quadratique moyenne respectivement sur le volume des fûts et sur la hauteur. Cette amélioration est présentée à la Figure 7-14 diminué des 6 unités aux plus forts écart d'âge.



Figure 7-14 : Comparaison entre les paramètres mesurés et les paramètres estimés par la maquette pilotée par les données radar pour : a) le volume des fût, et b) la hauteur sur l'échantillon diminué des unités présentant de forts écarts d'âge.

Une part de la variabilité restante observée sur les résultats de la Figure 7-14 peut être attribuer aux erreurs d'estimation liées à AMAP n'intégrant pas encore l'ensemble des variations, conséquences des conditions stationnelles observées sur le site.

Ainsi, l'obtention de meilleurs résultats du couplage des deux méthodes passe par une amélioration des modèles utilisés. Afin de s'affranchir de cet effet, un pilotage de la maquette avec un autre paramètre que l'âge, mieux corrélé au coefficient de rétrodiffusion pourrait être envisagé.

Néanmoins, les résultats de la Figure 7-14 ouvrent de nouvelles perspectives intéressantes en plus du couplage direct présenté au chapitre 6, dans l'utilisation des données radar et du modèle de croissance architectural AMAP. En effet, une amélioration de la méthode passant entre autre par l'amélioration de l'inversion des données radar et par une validation de la maquette aux différentes conditions stationnelles permet d'ores et déjà d'entrevoir des applications intéressants; i) la foresterie (accrus forestiers, qualité du bois...), ii) l'hydrologie forestière (taux d'interception des précipitations....), iii) l'écophysiologie (évaluation de l'indice foliaire....)..... S'il est vrai que la maquette ouvre des nombreuses voies d'applications potentielles, la télédétection radar permet quant à elle d'intégrer la dimension spatio-temporelle, deux caractéristiques difficiles à appréhender par des démarches dites "classiques".

Outre la somme d'informations potentielles présentent dans les maquette d'arbres, un aspect loin d'être anecdotique concerne la qualité et le réalisme du rendu visuel en trois dimensions des arbres simulés. La présence d'une carte d'âge générée par les données RSO et les qualités visuelles de l'AMAP sont le moyen d'envisager la simulation de paysage forestier.

7.4 La simulation d'un paysage forestier

La maquette pilotée par les données radar nous a permis de réaliser une simulation visuelle 3D d'une partie de parcellaire de la forêt domaniale de Mende pour laquelle les informations sur la densité étaient disponible (Figure 7-15). Cette simulation est comparée à une photographie scannée de la zone simulée (Figure 7-16), et nous pouvons remarquer la similitude (pour les classes d'âge des pins simulés) entre la simulation et la photographie de la zone malgré des angles de prise de vue différentes. Sur la base de ce résultat, différents scénarios sylvicoles peuvent être envisagés en particulier pour l'étude d'impacts paysagés de coupes à blancs, de dépressage ou d'éclaircies. Ce type de simulation peut s'avérer très intéressante pour la gestion des zones forestières sensibles (biodiversité, protection contre l'érosion, forte fréquentation touristique...). En effet, les paysages forestiers jouent un rôle non négligeable sur l'attrait touristique d'un département comme la Lozère où par exemple des programmes de réhabilitation des paysages forestiers (forêt domaniale, châtaigneraies....) sont en cours.

Le rendu réaliste des simulations laisse penser qu'à l'avenir de telles approches auront un rôle à jouer dans une gestion raisonnée et cohérente de territoires forestiers. Les temps calculs nécessaires à ce type de simulation déjà long pour de petites zones s'avèrent exorbitants à l'heure actuelle pour des zones géographiques locales et régionales. Néanmoins, l'évolution rapide des techniques permettra probablement d'ici quelques temps de repousser ces limites par la mise en œuvre plus facile ce type d'approche en adéquation avec les exigences des gestionnaires forestiers.

7.5 Conclusions

Ces résultats présentés dans ce chapitre sur la mise en œuvre d'une méthodologie originale d'estimation spatialisée de la ressource forestière ouvrent des perspectives intéressantes quant à l'utilisation de la télédétection RSO seule, du modèle architectural seul, ou du couplage des deux. Les intérêts et les limites de la démarche ont également été aborder permettant de poser un premier cadre de mise en oeuvre.

L'originalité intégrative de la démarche au sein d'un SIG, à permis d'obtenir trois types d'informations forestières spatialisée :

• tout d'abord, des cartes de paramètres de la ressource issues de l'inversion du signal radar et qui sont directement intégrable dans un SIG. Ces cartes trouvent entre autres un intérêt dans *l'actualisation des bases de données* géographiques existants sur des massifs forestiers gérés. • d'autre part, l'obtention *d'informations forestières classiques et fines* par le pilotage d'AMAP via le SIG au travers de deux scénarios se distinguant par l'origine des données concernant l'âge des peuplements forestiers.

• enfin, la possibilité de *simuler un paysage forestier* par le pilotage d'AMAP par les cartes d'âge issues des images RSO. Ces résultats s'il sont préliminaires nous permettent d'entrevoir des applications potentielles d'un intérêt certain pour la gestion de territoire.

Ces approches originales de spatialisation de la ressource forestière développées dans le cadre de ce travail sont prometteuses et apparaissent complémentaires des approches classiques de gestion forestière et paysagère.



Figure 7-15 : Simulation d'une partie de la forêt domaniale de Mende comprenant 3 parcelles de pins noirs de 9, 16 et 100 ans.



Figure 7-16 : Photographie de la zone simulée sur la forêt domaniale de Mende pris sous un angle de vue différent de celle de la simulation.

Références bibliographiques

- Beaudoin, A. (1992). "Observation de la terre par radar imageur : estimation de la biomasse forestière,", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 172p.
- Beaudoin, A., Castel, T., Stach, N., Borne, F., Caraglio, Y., Barthelemy, D., and Durand, P. "Couplage de données radar SIR-C à un modèle de croissance des arbres : évaluation de paramètres forestiers sur la maquette et simulation 3D d'un paysage." *9ème Congrés de l'AQT en Géomatique et Télédétection*, Québec, Canada.
- Borgeaud, M., Noll, J., Bellini, A., Beaudoin, A., and Le Toan, T. (1993). "Implication of the user requirements for the calibration of SAR images over land.".
- De grandi, G. F., Lemoine, G. G., De groof, H., Lavalle, C., and Sieber, A. J. (1994). "Fully polarimetric classification of the black forest MAESTRO 1 AIRSAR data." International Journal of Remote Sensing, 15(14), 2755-2775.
- Dobson, M. C., Pierce, L. E., and Ulaby, F. T. (1996). "Knowledge-based land cover classification using ERS-1/JERS-1 SAR composites." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 34(1), 83-99.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., and Pierce, L. E. (1995a). "Land-cover classification and estimation of terrain attributes using Synthetic Aperture Radar." *Remote Sens. Environ.*, 51, 199-214.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Pierce, L. E., Sharik, T. L., Bergen, K., Kellndorfer, M., Kendra, J., R., J., Li, E., Lin, Y. C., Nashashibi, A., Sarabandi, K., and Siqueira, P. (1995b). "Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4), 877-895.
- Lecoustre, R., Saito, K., Kumagai, Y., Honjo, T., Reffye de, P., and Ishida, Y. (1993). "Photo-realistic forest landscape simulation-application of GIS and plant modeling technique." *NICOGRAPH'93*, 223-236.
- Pierce, E. L., Ulaby, F. T., Sarabandi, K., and Dobson, M. C. (1994). "Knowledge-based classification of polarimetric SAR images." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 32(5), 1081-1086.
- Ranson, K. J., and Sun, G. (1994). "Northern forest classification using temporal multifrequency and multipolarimetric SAR images." *Remote Sens. Environ.*, 47, 142-153.
- Tomassone, R., Dervin, C., and Masson, J.-P. (1993). BIOMETRIE : Modélisation de phénomènes biologiques, Masson, Paris.

Conclusions



Conclusions

"Si j'ai vu plus loin c'est en me tenant sur les épaules des géants qui m'ont précédé". Isaac Newton

Ce travail avait pour principal objectif d'estimer la ressource forestière par télédétection RSO, et plus particulièrement de contribuer à la généralisation de l'utilisation de ce type de données en intégrant l'impact de paramètres perturbateurs comme la topographie. Cet objectif était également accompagné par une volonté de compréhension conduisant à adopter une démarche ascendante conjuguant une approche de modélisation architecturale couplée à une approche fondamentale de modélisation théorique. Ainsi, un champ d'investigation embrassant plusieurs domaines de compétence a été abordé sous la forme de collaborations trans-disciplinaires exposées au *chapitre 1*. Ces collaborations rentrent dans un schéma visant à intégrer l'ensemble des connaissances de domaines connexes et intéressant les problématiques environnementales abordées d'un point de vue pragmatique et théorique intégrant explicitement la dimension spatiale. Ces collaborations ont ainsi alimenté notre réflexion et enrichi notre vision des questions abordées.

La télédétection à l'égal d'un "*opérateur relationnel*" (Charvolin 1994)¹ est apparue pouvoir faire le lien entre les différents acteurs en incorporant des savoirs multidisciplinaires. Les radars à synthèse d'ouverture font partie d'une nouvelle génération de capteurs se positionnant sur un domaine particulier du spectre électromagnétique, potentiellement utilisés entre autres pour caractériser les paramètres de la ressource forestière. Un panorama des résultats empruntés à la littérature a laissé apparaître des potentialités certaines dont il convient toutefois de poser, voire de repousser, les limites. Les résultats de ce travail se situent dans cette perspective, avec en arrière plan un souci de généralisation à des fins d'applications.

Les conclusions de l'étude peuvent se décliner suivant trois axes forts repris par la suite :

1. le premier repose sur les résultats de l'approche pragmatique, imposant une bonne connaissance du milieu forestier étudié (*chapitre 3*) au travers de descriptions adaptées mises en correspondance avec les données issues de la télédétection RSO (*chapitre 2* et 4) et ce, au travers d'un SIG,

2. le deuxième, s'emploie à démontrer la pertinence de la modélisation architecturale (*chapitre 5*) comme alternative de description forestière précise,

¹ Charvolin, F. (1994). "L'invention de la biosphère, les fondements d'une méthodes." *Nature, Sciences, Sociétés*, 2(1), 21-28.

3. finalement le troisième axe s'inscrit dans une optique de généralisation qui demande cependant à être poussé dans la compréhension fine des mécanismes sous-tendant les relations statistiques observées de façon empirique. Cela a auguré de notre capacité à articuler les données architecturales (*chapitre 5*) avec une démarche de modélisation théorique (*chapitre 6*). La finalité était d'aboutir à des méthodes (*chapitre 7*) que les acteurs d'une gestion durable des écosystèmes forestiers puissent s'approprier ou tout du moins en évaluer l'intérêt.

1) L'approche pragmatique, une première réponse à l'estimation de la ressource

L'emphase a d'abord été mise sur la caractérisation du milieu forestier. Celle-ci s'est réalisée en deux étapes, une s'attachant à estimer les paramètres forestiers "classiques", l'autre visant un niveau de détails plus élevé "botanique" en vue d'une modélisation architecturale (*chapitre 3*). Cette phase importante est souvent négligée voire absente. La confrontation (*chapitre 4*) des données montre la sensibilité des données radar (coefficient de rétrodiffusion) aux paramètres forestiers (volume tiges/ha, hauteur...) après *une phase de correction* (géométrique et radiométrique) *adéquate indispensable des images radar acquises en terrain accidenté nécessitant toutefois le recours à un MNT*. En effet, les distorsions radiométriques se sont avérées avoir une amplitude de variation du signal supérieurs à celle de la thématique.

Concernant le coefficient de rétrodiffusion corrigé du relief, la configuration radar L-HV à 55° d'incidence est apparue optimale parmi celles envisageables depuis l'espace (LightSAR) pour inférer les paramètres de la ressource, rejoignant les résultats observés en terrain plat et repris dans deux récents articles de synthèse (Kasischke et al. 1997²; Schmullius and Evans 1997³). Ce résultat est majeur car il montre la cohérence de la chaîne de traitement développé au LCT et sa capacité à restaurer le signal utile dans une bonne proportion à des fins d'inversion. Il confirme également l'efficacité du modèle de correction angulaire développé dans le cadre de ce travail. Ce dernier point est à pondérer en soulignant les moindres performances en zones topographiques limites (angle d'incidence local proche de 0° ou 90°).

En complément les indices polarimétriques incomplets (Annexe B) ont montré une sensibilité médiocre aux paramètres forestiers. Les résultats sont plus nuancés en ce qui concerne les indices interférométriques (Annexe A). Ainsi, l'interférogramme différentiel est une information très bruitée, présentant de nombreuses et importantes sources d'erreurs limitant fortement son utilisation en milieu forestier. En bande C, la cohérence s'est avérée être une information autant, sinon plus intéressante et originale, que le coefficient de rétrodiffusion. En particulier, pour la détection des changements du couvert. Aussi, une sensibilité de la cohérence aux paramètres de la ressource a également été observée, mais pause problème dans sa généralisation car elle dépend des conditions de vent.

Si l'approche pragmatique a le mérite d'être simple, elle n'est pas souvent directement généralisable à d'autres situations, nécessitant un réinvestissement expérimental lourd et coûteux, irréaliste à des fins opérationnelles. De plus, les relations observées ne donnent pas accès aux mécanismes qui les sous-tendent, alors que c'est sur la base de ces mécanismes que l'on peut envisager d'étendre les résultats obtenus. Nous nous sommes donc orientés vers une approche théorique de modélisation électromagnétique de la

² Kasischke, E. S., Melack, J. M., and Dobson, M. C. (1997). "The use of imaging radars for ecological applications-A review." *Remote Sens. Environ.*, 59, 141-156.

³ Schmullius, C. C., and Evans, D. L. (1997). "Review article : Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography : a tabular status quo after SIR-C/X-SAR." International Journal of Remote Sensing, 18(13), 2713-2722

diffusion des ondes radar par des milieux naturels, nécessitant une description architecturale du milieu forestier.

2) La modélisation architecturale, une alternative à la caractérisation précise du milieu forestier pour des besoins variés en télédétection

Frein majeur dans les approches théoriques d'interprétation des données de télédétection, la caractérisation précise du milieu forestier est souvent négligée voire absente. Un panorama de la littérature a montré les différentes voies explorées afin de contourner ces difficultés. Malgré des avantages respectifs, chacune d'elles présentent des limites nous apparaissant rédhibitoires pour certaines d'entre elles. Plusieurs facteurs nous ont ainsi amené à converger vers l'approche développée autour du modèle architectural de plantes AMAP du CIRAD.

Les bases botaniques et biologiques se traduisant au travers des données expérimentales et formalisées par des outils mathématiques puissants font de l'AMAP une voie générique de caractérisation souple et valide des plantes. Le modèle validé pour le pin noir d'Autriche (*chapitre 5*) sur le site d'étude a permis d'obtenir une description quantitative pertinente, en particulier pour la modélisation électromagnétique grâce à l'interface spécifique *AMAP2SAR* développée dans le cadre de ce travail. Ce fut du coup l'opportunité pour AMAP de poursuivre et valider le développement d'applications quantitatives des maquettes.

Outre les comportements classiques des paramètres forestiers dendrométriques en fonction de l'âge et ce pour l'ensemble des constituants élémentaires du couvert, le modèle nous a permis d'accéder à des paramètres peu accessibles par la mesure, comme par exemple les orientations. Si l'hypothèse d'isotropie azimutale est apparue être une approximation acceptable, la variabilité verticale plus ou moins prononcée est mise en évidence, en particulier pour les peuplements de plus de 20 ans. La modélisation ainsi obtenue ne se limite pas à une description qualitative mais permet d'accéder à une quantification des phénomènes, et ce pour l'ensemble des éléments constituant le couvert.

Les résultats de simulation sont également l'occasion de générer des arbres en 3D d'un réalisme surprenant, capacité qui est loin d'être anecdotique aux vues de l'engouement de la prise en compte des aspects paysagés par exemple dans l'aménagement forestier et de zones "touristiques sensibles".

La modélisation *a posteriori* du comportement des méristèmes édifiant l'architecture de la plante nécessite un échantillonnage plus ou moins lourd en fonction des caractéristiques du milieu auquel vient s'ajouter une bonne connaissance des stratégies de croissance de la plante. Ainsi, plus le milieu est hétérogène et plus serré devra être l'échantillonnage. Ce point peut apparaître comme une limite à la mise en œuvre de cette approche, il nous est plutôt apparu comme une qualité permettant de garder en trame de fond les réalités associées au milieu naturel.

3) Le couplage, une réponse au problème en vue de la généralisation

Le vocable couplage regroupe ici deux approches maîtresses utilisées à la fois dans le problème direct et dans le problème inverse. L'approche directe concerne le pilotage du modèle de diffusion électromagnétique par le modèle AMAP *via* l'interface AMAP2SAR, tandis que l'approche indirecte s'attache au problème d'inversion des données radar pouvant ou non servir à piloter le modèle AMAP *via* le SIG.

Pour l'approche directe

Sous l'impulsion du niveau de caractérisation obtenu au *chapitre 5*, le modèle du MIT/CESBIO a été utilisé pour interpréter le coefficient de rétrodiffusion pour différentes configurations radar et du milieu forestier (*chapitre 6*). Les résultats montrent l'intérêt de la démarche nous permettant de passer un nouveau "cap" dans la finesse d'interprétation des mécanismes. Ainsi, les résultats ont tout d'abord *mis en évidence les faiblesses de l'hypothèse implicite d'homogénéité verticale du couvert généralement utilisée par les modèles*. De plus, la décomposition du mécanisme dominant de diffusion de volume a *permis de clarifier la source de diffusion dans sa dimension verticale*.

Sur la base des résultats de la modélisation théorique nous avons pu expliciter le lien physique quasi-linéaire existant entre l'amplitude de diffusion et les paramètres du couvert (densité et section de tiges) via une corrélation avec ces paramètres pour la branchaison. Toutefois cette liaison est affectée par le terme d'atténuation de la couche contribuant à la rétrodiffusion qui, si elle augmente avec l'âge des peuplements, n'est pas facilement reliable aux caractéristiques du couvert. La rétrodiffusion radar apparaît donc comme un équilibre subtil et de nature antagoniste entre l'effet de la rétrodiffusion par un ensemble de branches dans le houppier, et l'atténuation par ce même ensemble. Il semble donc nécessaire de réaliser une réelle étude de sensibilité qui permettrait de déterminer si l'on peut réellement envisager le développement d'un modèle semi-empirique d'inversion.

Ces considérations théoriques nous ont également permis de valider le modèle semiempirique de correction angulaire (*chapitre 4*) en reliant explicitement l'exposant n à des paramètres physiques du couvert. On montre également que l'impact de la topographie se traduit en première approximation d'un point de vue essentiellement géométrique par une modification du trajet optique local entraînant une intégration différentielle du signal sur l'épaisseur du couvert.

Finalement, la démarche peut être également vue comme un *test des approximations physiques faites par les modèles électromagnétiques* en vue de l'amélioration de la prise en compte de caractéristiques comme la courbure des branches ce qui est possible en ayant recours aux maquettes AMAP non dégradées.

L'approche inverse (chapitre 7), réalisée selon un scénario impliquant AMAP et les données RSO souligne une autre forme de couplage où les données RSO sont utilisées comme données d'entrée pilotant le modèle AMAP via le SIG. Les résultats ont mis en évidence l'impact de la propagation d'erreurs dans ce type d'approche entraînant en sortie l'obtention de valeurs aberrantes. En cernant l'origine de ces erreurs les résultats ouvrent des perspectives intéressantes dans l'estimation d'informations forestières géolocalisées et dans la simulation de paysages forestiers, malgré qu'il s'agisse ici d'un "cas d'école".

Ce scénario de spatialisation de l'information forestière a été complété par deux autres scénarios n'impliquant pas le couplage, mais les données RSO seules, ou AMAP seul. Les résultats, dans les deux cas sont prometteurs et d'intérêt pour envisager l'actualisation de bases de données géographiques pour les problèmes forestiers.

La mise en correspondance de données de différentes disciplines est apparue comme une source de richesse et d'avancée dans la problématique de télédétection RSO appliquée aux milieux forestiers que nous nous étions posée. Ayant répondu entièrement ou partiellement à certaines questions, les résultats de ce travail n'ont pas manqué d'en faire surgir de nouvelles. L'ensemble des résultats obtenus aux cours de ce travail de recherche renvoient à quelques réflexions.

De la recherche "formelle" de laboratoire au domaine des applications concrètes il existe souvent un fossé (pour ne pas dire un gouffre dans certain cas) à franchir. Dans le cas des données radar, ce passage est conditionné par plusieurs facteurs dont le premier est directement lié à la "*jeunesse*" de ce type de données nécessitant la poursuite de travaux de recherche impliquant de multi-collaborations telles que nous venons de le présenter dans le cadre de ce travail. Le deuxième dépend des configurations envisagées pour les futurs RSO spatiaux, car, comme nous l'avons vu, si les basses fréquences (bande L) sont potentiellement intéressantes, les hautes fréquences bandes C plus utilisées sont plus limitées. Un troisième facteur est lié à la nature peu intuitive des ondes radar et à la complexité des interactions qui sont mises en jeu.

Les résultats de la démarche montrent que le couplage des modèles est une amorce de réponse à la généralisation d'utilisation des données RSO qu'il convient de poursuivre dans l'optique de générer entre autres des cartes de biomasse aérienne, un des paramètres utiles dans le calcul de la respiration et de la productivité des écosystèmes (Saugier 1996)⁴.

Perspectives

Généraliser l'utilisation des données de télédétection RSO passe donc par une meilleure compréhension des potentialités et des limites de ce type de données. Ce travail s'y est employé. Cependant il ne concerne que des formations forestières particulières peu représentatives de l'ensemble des formations rencontrées à la surface de la Terre.

Mise à part l'extension de la modélisation du pin noir d'Autriche à des âges plus importants et à d'autres conditions de site, cette approche devra être mise en œuvre sur d'autres essences forestières représentatives des grandes formations forestières. Parallèlement, l'interface *AMAP2SAR* devra être élargie à d'autres espèces et adaptée à d'autres modèles théoriques de l'optique et du thermique.

Appliquer les modèles théoriques à plusieurs cibles *via* AMAP2SAR sera peut-être l'occasion de faire émerger des invariants permettant, en partant des équations fondamentales, un certain nombre de simplifications afin de déboucher sur des modèles inversibles dérivés directement de la théorie.

En complément, les indices interférométriques, et en particulier, la cohérence a soulevé des espoirs quant à la capacité de la bande C à être utilisée en milieu forestier. Toutefois les mécanismes sous-jacents restent à étudier par l'intermédiaire, entre autres, de modèles cohérents tenant compte de la phase. L'approche utilisée dans ce travail est directement portable car l'information contenue dans les maquettes d'arbres contient suffisamment de données pour alimenter ce type de modèle tenant compte de la position de chacun des diffuseurs élémentaires. Des travaux de thèse sont actuellement poursuivis au CESBIO dans ce sens.

Un des aspects prometteurs, et qui a été abordé succinctement, concerne la possibilité au travers du couplage indirect de simuler avec AMAP des paysages forestiers tridimensionnels. A terme cette approche est des plus intéressantes, en particulier, dans des domaines touchant à la gestion sylvicole au travers de l'impact des éclaircies sur la croissance, à l'écophysiologie ou encore à l'hydrologie forestière....

⁴ Saugier, B. (1996). Végétation et atmosphère, Flammarion, Paris.

·

·

Annexe A

Apport des produits interférométriques RSO en milieu forestier

Al.1 Principes interferometriques illustres sur un couvert foresti	er2
A1.1.1 Conditions orbitales (intertrace et altitude d'ambiguïté) A1.1.2 Conditions de site	3 4
A1.2 Obtention des produits interférométriques	5
A1.2.1 Degré de cohérence A1.2.2 Phase interférométrique	6 6
A1.2.3 Précision d'estimation sur les quantités interférométriques A1.2.3.1 Cohérence	8 8
A1.2.3.2 Altitude residuelle par interférométrie différentielle	9
A1.3 Application de l'interférométrie RSO en milieu forestier	11
A1.3.1 Données interférométriques utilisées dans cette étude	11
A1.3.2 Interpretation visuelle des données interférométriques	12
A1.3.2.2 Produits interférométriques ERS-1	12
A1.3.3 Analyse quantitative de la cohérence	16
Effet de l'écart temporel	18
Effet de l'intertrace	19
A1.3.4 Sensibilité aux paramètres forestiers	19
A1.3.4.1 Résultats expérimentaux pour la phase	19
A1.3.4.2 Résultats expérimentaux pour la cohérence	21
A1.3.5 Interprétation du comportement des indices interférométriques en	
milieu forestier	24
A1.3.5.1 Interpretation des resultats obtenus avec la phase	24
Mécanismes de rétrodiffusion et modèle de décorrélation	26
Evolution temporelle	$\frac{20}{27}$
Effet de la topographie	28
A1.3.5.3 De l'interprétation phénoménologique aux applications potentielles de la cohérence en milieu forestier	32
A1.4 Conclusions	33
Concernant la cohérence :	33
Concernant l'interférogramme différentiel :	34
Références bibliographiques	35



Annexe A

Apport des produits interférométriques RSO en milieu forestier

Afin d'augmenter le potentiel des capteurs spatiaux radar existants (ERS-1/2, JERS-1) pour les applications en milieu terrestre, de nouvelles techniques de traitement utilisant les données radar ont commencé à se développer. En particulier, celles liées au concept d'interférométrie qui intègrent la **phase du signal radar**, information considérée jusqu'alors comme peu intéressante. L'obtention des produits interférométriques radar est liée aux conditions d'acquisition tant d'un point de vue temporel que spatial (Massonnet 1992):

- dans le temps, les propriétés de la cible ne doivent pas changer, de même que leur position relative à l'intérieur de la cellule de résolution. Cela revient à dire que le paysage n'a pas bougé gardant un certaine "cohérence",
- dans l'espace, les variations de prise de vue (angle de visé, intertrace) d'une date à l'autre ne doivent pas induire de décorrélation "géométrique" : dégradation de la superposition des images, réponse de la cible variant avec l'angle de visé s'il est trop différent d'une date à l'autre (Li and Goldstein 1990).

Cette technique d'interférométrie radar a trouvé ses plus importantes applications dans la génération de Modèle Numérique de Terrain (MNT) (Lin et al. 1994; Madsen et al. 1993; Massonnet and Rabaute 1993; Prati et al. 1994; Zebker and Goldstein 1986) avec des précisions acceptables (Zebker et al. 1994) ou pour dériver des plans de pentes locales du terrain pouvant, entre autres, servir à normaliser le coefficient de rétrodiffusion (Wegmüller et al. 1994; Werner et al. 1994). Elle a également montré de fortes potentialités dans l'évaluation des petits mouvements, on parle alors d'**interférométrie différentielle** (Gabriel et al. 1989; Massonnet et al. 1994; Massonnet et al. 1993), où l'on utilise la mesure de la phase résiduelle obtenue par soustraction de l'interférogramme classique à un interférogramme généré à partir d'un MNT ou à un autre interférogramme classique obtenu sur la même zone. Actuellement, cette technique trouve de nombreux champs d'investigations dans des domaines allant de la détection des changements à la mesure de la surface des océans en passant par l'étude du volcanisme (Gens and van Genderen 1996).

La précision des mesures obtenues à l'aide de cette dernière est de l'ordre du centimètre, conduit à envisager son utilisation pour l'estimation de paramètres propres aux zones forestières, notamment la hauteur du couvert. En effet, en émettant l'hypothèse que les premiers mètres verticaux du toit du couvert forestier forment une surface relativement homogène d'où provient la rétrodiffusion (bande C d'ERS), l'utilisation de l'interférométrie différentielle pourrait permettre d'estimer le résidu altimétrique que constitue cette hauteur par rapport au niveau réel du sol.

Toutefois, la nature par définition variable du couvert forestier (géométrie et statut hydrique) et l'utilisation de la bande C sur ERS-1/2, qui n'autorise qu'une faible pénétration de ce même couvert, peuvent faire évoluer de manière hétérogène l'ensemble des diffuseurs élémentaires (aiguilles/feuilles) participant à une cellule de résolution radar. On peut dans certain cas aboutir à une perte de cohérence entre les deux prises de vues nécessaires au processus interférométrique. L'obtention d'une mesure significative à l'aide de l'évolution de la phase devient peu réaliste, voire impossible. L'écart temporel entre les acquisitions est, par conséquent, un facteur important pour la conservation d'une cohérence élevée. Cette notion même de cohérence temporelle doit également faire l'objet d'une analyse approfondie. En effet, le comportement et l'évolution des zones forestières et non forestières sont sensiblement différents. La cohérence peut donc diminuer plus ou moins rapidement selon le type d'occupation du sol et devenir un moyen de réaliser une discrimination forêt/non forêt et éventuellement d'autres classes d'utilisation du sol (Askne and Hagberg 1993; Herland 1995; Wegmüller and Werner 1995).

Il est donc intéressant d'étudier l'apport des produits interférométriques (phase et cohérence) obtenus à partir des données ERS sur le plan de l'estimation de paramètres de la ressource forestière en contexte de forêt tempérée. Dernièrement des travaux ont montré la potentialité de ce type de données interférométriques classiques et différentielles pour la classification des surfaces boisées (Askne and Hagberg 1993; Strozzi and Wegmüller 1997) et pour inférer sur les paramètres forestiers (Floury et al. 1996; Hagberg et al. 1995; Ulander et al. 1995; Ulander et al. 1993). Nos travaux se situent dans ce cadre de recherche et ont pour objectif premier d'évaluer l'apport de ce type de données pour inférer sur les paramètres forestiers en terrain plat et accidenté d'autant que la nature de l'interférogramme atténue théoriquement les effets du relief.

Cela consistera en premier lieu à une analyse visuelle (i.e. qualitative) puis quantitative des produits interférométriques ERS-1 et ERS tandem sur quelques surfaces types : prairies, champs et principalement sur les peuplements forestiers en fonction des paramètres forestiers mesurés. Dans un deuxième temps une amorce d'interprétation du comportement des quantités interférométriques en milieu forestier est présentée. En conclusion, sont résumés les principaux résultats obtenus au cours de l'analyse et de l'interprétation accompagnés de quelques pistes de recherches à venir.

Mais avant tout, il convient d'introduire les concepts de l'interférométrie RSO en milieu forestier ainsi que la méthode d'obtention des quantités interférométriques (phase et cohérence).

A1.1 Principes interférométriques illustrés sur un couvert forestier

La Figure 1-1 présente la configuration d'acquisition d'un couple interférométrique sur un paysage donné, en l'occurrence un milieu forestier en terrain accidenté. Cette configuration est donnée par un couple d'images ERS acquises sur des orbites légèrement décalées (E et M), mais avec un écart temporel multiple de 35 jours (sauf en mode tandem avec 1 jour d'écart). Chaque image du couple a une configuration géométrique différente quant à la position du capteur sur l'orbite et l'angle d'incidence d'observation d'un point de la scène donnée.

La réalisation d'un traitement interférométrique nécessite de disposer d'un couple d'images radar. Toutefois, des contraintes relativement importantes restreignent le nombre de couples susceptibles de fournir un résultat intéressant. Ces contraintes sont essentiellement de deux sortes : les conditions orbitales interférométriques, et les conditions du site et de leurs évolutions temporelles.



Figure 1-1 Configuration interférométrique sur un paysage forestier en terrain accidenté.

A1.1.1 Conditions orbitales (intertrace et altitude d'ambiguïté)

La première contrainte est liée aux points de vue depuis lesquels l'instrument radar observe le même objet au sol lors des deux acquisitions, et par conséquent à la position relative des orbites correspondantes (Figure 1-1). Les angles de vue différents sont matérialisés par θ_m et θ_e , alors que la différence de position sur l'orbite est représentée par **l'intertrace** B (*baseline*), ayant une composante perpendiculaire B_n et parallèle B_p . Il en résulte des distances cible-antenne variables R_m et R_e décalées de δR . Nous verrons par la suite que l'intertrace joue un rôle déterminant dans la qualité des produits interférométriques. L'angle entre l'horizontale et l'intertrace est l'angle interférométrique α .

Selon la Figure 1-1, la phase de l'interférogramme complexe ϕ est liée à la différence de distance δR , cette dernière pouvant être assimilée à B_p :

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta R = \frac{4\pi}{\lambda} B_{p}$$
(1-1)

Il est possible de remonter à l'altitude du terrain Z donnée par interférométrie à partir de la connaissance de la phase ϕ , de la hauteur H et de l'angle interférométrique α , et à condition de pouvoir dérouler la phase (i.e. supprimer l'ambiguïté liée à la connaissance de la phase modulo 2π). Cependant, une autre approche sera utilisée ici et passe par la notion d'interférométrie différentielle décrite plus loin. Elle nécessite la connaissance de la sensibilité de la phase à l'altitude, donnée par:

$$\frac{\delta \phi}{\delta z} = \frac{2kB_n}{R\sin\theta_m}$$
 avec $B_n = B\cos(\theta_m - \alpha)$ (1-2)

On peut alors calculer l'**altitude d'ambiguïté** Z_a , c'est-à-dire l'écart altimétrique qui produit une variation de phase égale à 2π - soit une frange - dans l'interférogramme. Elle est donnée par:

$$Z_{a} = \frac{R\lambda\sin\theta_{m}}{2B_{n}}$$
(1-3)

Cette dernière, qui diminue lorsque l'intertrace B et l'angle interférométrique α augmentent, peut théoriquement s'étendre de 0 (cas de trajectoires infiniment éloignées l'une de l'autre) à l'infini (cas de trajectoires qui se croisent), et prendre un signe positif ou négatif selon la position relative des deux orbites.

On considère qu'un seuil minimal doit être atteint en valeur absolue pour que l'interférogramme soit réellement utilisable. En effet, la diminution de l'altitude d'ambiguïté, conditionnée par l'augmentation de l'intertrace, s'accompagne d'une décorrélation des réponses au signal radar obtenues pour chacune des prises de vue. Cette décorrélation est provoquée par la différence des points d'observation pour une même cellule de résolution au sol; elle induit une perte de cohérence dont l'origine est purement géométrique. Ainsi, une altitude d'ambiguïté inférieure à 10 mètres conduit généralement à un interférogramme inexploitable. L'idéal est d'obtenir un résultat très grand en valeur absolue (supérieur à 100 mètres), mais ceci ne se produit qu'avec une faible probabilité.

A1.1.2 Conditions de site

La seconde contrainte pour le traitement interférométrique est l'évolution de la zone imagée proprement dite. En particulier, le réarrangement géométrique des cibles élémentaires constituant une cellule de résolution ou la modification de leurs propriétés diélectriques peuvent modifier profondément la réponse à l'onde radar et de sa phase entre deux prises de vues, et donc induire un déphasage supplémentaire. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de tels changements:

- l'évolution naturelle saisonnière du couvert: croissance et mortalité, variation de l'indice foliaire et de la teneur en eau;
- la transformation rapide, d'origine naturelle ou anthropique, de ce même couvert: éclaircies, coupes, feux, châblis, attaques parasitaires;
- la variation des conditions météorologiques : pluie, vent, température et humidité.

Ce dernier type de contraintes est malheureusement peu maîtrisable car il est fortement lié aux caractéristiques du site et aux conditions environnementales.

A1.2 Obtention des produits interférométriques

Nous décrivons à présent la méthode d'obtention d'interférogrammes. Une des 2 images de la prise de vue interférométrique est l'image définie comme maîtresse M, tandis que l'autre est appelée esclave, notée E. Soit E_m et E_e la valeur complexe d'un pixel contenant la mesure du champ électrique rétrodiffusé E respectivement de l'image maîtresse et esclave; l'interférogramme est formé en appariant ces deux images et en appliquant le produit complexe conjugué pour obtenir l'interférogramme:

$$E_{\rm me} = E_{\rm m} E_{\rm e}^* \tag{1-4}$$

A partir de cet interférogramme, sont obtenus les deux produits interférométriques que sont la phase ϕ et le degré de cohérence γ , en plus des amplitudes de rétrodiffusion radar liées aux coefficients de rétrodiffusion σ° aux deux dates étudiées. La chaîne de traitement interférométrique du CNES (DIAPASON) permet d'obtenir différents produits interférométriques (Figure 1-2).



Figure 1-2 Organigramme de la chaîne de traitement interférométrique DIAPASON du CNES.

La réalisation d'un produit interférométrique différentiel nécessite de disposer en entrée d'un couple d'images radar - ici un couple de données brutes (Raw) d'ERS-1 ou d'un couple tandem ERS1/2 - et d'un modèle numérique de terrain (MNT). Les différentes étapes du traitement interférométrique implémentées dans la logiciel DIAPASON peuvent se résumer de la façon suivante :

- prétraitement ou synthèse des données brutes ERS-1 : génération d'images complexes (2 x 16 bits) à 2 vues et d'images réelles (8 bits) à 10 vues,
- choix d'une des deux images à titre de référence géométrique (image maîtresse M) obtention par corrélation d'une grille de déformation géométrique permettant de passer de l'image maîtresse à la deuxième image (image esclave E),
- rectification de l'image esclave dans la géométrie de référence,
- simulation d'une image des pentes à partir du MNT afin de permettre le positionnement relatif de ce MNT et de l'image maîtresse,
- combinaison des images complexes maîtresse et esclave rectifiées (produit de la première par le conjugué de la seconde),
- production d'une image d'amplitude croisée (mélange des amplitudes des deux images initiales) et d'un interférogramme différentiel (élimination directe des effets orbitaux et des effets topographiques à l'aide du MNT),
- orthorectification de ces résultats dans la géométrie du MNT et production de l'image de cohérence.

Le produit interférométrique final est constitué de l'interférogramme différentiel, de l'image de cohérence et de l'image d'amplitude croisée, tous orthorectifiés.

A1.2.1 Degré de cohérence

Comme dans le cas polarimétrique (cf *Annexe B*) le degré de cohérence interférométrique est le module de la corrélation complexe, mais cette fois pour une même configuration radar correspondant aux deux dates d'acquisition des images maîtresse et esclave. Il s'obtient alors par :

$$\gamma = \frac{|< E_{me} >|}{\sqrt{<|E_{m}|^{2} ><|E_{e}|^{2} >}}$$
(1-5)

avec
$$\sigma_m^0 = \langle |E_m|^2 \rangle, \sigma_e^0 = \langle |E_e|^2 \rangle, \sigma_{me}^0 = \langle |E_{me}|^2 \rangle$$
 (dite amplitude croisée)

où <> désigne le multi-vue spatial et/ou fréquentiel. La cohérence varie entre 0 et 1, et indique la qualité de la frange interférométrique (0 : pas de franges, 1 : franges idéales). Finalement on remonte au coefficient de rétrodiffusion à partir des amplitudes de rétrodiffusion à l'aide de la constante d'étalonnage absolu fournie par le fournisseur d'images (ESA : Agence Spatiale Européenne).

A1.2.2 Phase interférométrique

La Figure 1-1 illustre la possibilité d'estimer la hauteur du couvert forestier par interférométrie à partir de la phase donnée par :

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\mathrm{Im}(\mathrm{E}_{\mathrm{me}})}{\mathrm{Re}(\mathrm{E}_{\mathrm{me}})} \right]$$
(1-6)

Dans le cas d'un terrain forestier, la surface vue par le radar est la strate supérieure de la canopée constituant la source de rétrodiffusion (premiers mètres, selon la profondeur de pénétration). Ainsi, l'interférométrie nous renseigne sur la topographie du terrain auquel se superpose la hauteur interférométrique des arbres. Il est à noter que cette hauteur est évidemment différente de la hauteur réelle du couvert. En général, elles coïncideront d'autant mieux que le couvert sera fermé et dense, diminuant ainsi la profondeur de la couche participant à la rétrodiffusion.

Intuitivement, il serait tentant d'estimer la hauteur Z par interférométrie, et ensuite de soustraire l'altitude du terrain pouvant être donnée par un Modèle Numérique de Terrain, Z_{mnt} . Cependant, comme la phase est mesurée modulo 2π , il faut procéder au déroulement de phase afin d'estimer Z, ce qui peut se révéler problématique.

Une deuxième méthode par interférométrie différentielle a été proposée par (Ulander et al. 1995) pour son application en milieu forestier, et est implantée dans le processeur interférométrique du CNES (partie gauche de la Figure 1-2). Il s'agit de simuler la composante de phase d'origine topographique ϕ_{mnt} , grâce au MNT et à une bonne connaissance de la géométrie d'acquisition interférométrique. Cependant, cette phase ϕ_{mnt} est précise à un terme d'erreur systématique près ϕ_{orb} , dû à l'imprécision sur les paramètres interférométriques B, θm et α lors de la simulation. Par la suite, on soustrait la phase simulée à l'interférogramme réel ϕ , ce qui permet d'obtenir un **interférogramme différentiel** $\Delta\phi$, **appelé aussi résidu de phase**. Puisque qu'il s'agit d'une variation de phase en un point donné du terrain, elle est liée à l'**altitude résiduelle Z**_r causée par le couvert par rapport à la topographie:

$$\Delta \phi = \phi - (\phi_{mnt} + \phi_{orb}) = \frac{Z_r}{Z_2} 2\pi$$
(1-7)

On peut donc estimer la hauteur moyenne relative d'une zone de forêt Z_{rf} , à l'aide de l'équation (1-7); cependant, c'est une hauteur résiduelle relative puisque subsiste le terme d'erreur ϕ_{orb} . De plus, l'utilisation du concept d'interférométrie différentielle justifie le choix d'une altitude d'ambiguïté élevée Z_a par rapport à la hauteur résiduelle du couvert Z_r , afin que le résidu de phase soit inclus dans une seule frange, ce qui évite d'avoir à dérouler la phase. En pratique, il est donc souhaitable que l'altitude d'ambiguïté soit supérieure à 50 mètres, afin ne pas introduire d'ambiguïté lors de l'estimation du résidu, puisque celui-ci est l'ordre de 0 à 25 m en forêt tempérée. Cependant, l'altitude d'ambiguïté ne devrait pas être trop élevée car ce serait au détriment de la finesse d'estimation de la hauteur résiduelle. Il y a donc un compromis à trouver au niveau de l'intertrace, par exemple (Hagberg et al. 1995) préconisent une gamme de 100 à 300 m comme intertrace.

On peut s'affranchir du terme de phase inconnu ϕ_{orb} , de l'équation (1-7) si celui-ci est constant dans l'image ou du moins localement, par la **différenciation du résidu de phase moyen** $\Delta \phi$ entre la zone de forêt d'intérêt et une zone de sol découvert à proximité, afin de retrouver en absolu la **hauteur moyenne de la forêt Z**_r:

$$\overline{Z}_{f} = \overline{Z}_{r_{\text{forêt}}} - \overline{Z}_{r_{\text{sol}}} = \frac{Z_{a}}{2\pi} (\overline{\Delta \phi}_{f_{\text{forêt}}} - \overline{\Delta \phi}_{sol})$$
(1-8)

A1.2.3 Précision d'estimation sur les quantités interférométriques

En vue des applications, l'erreur faite sur l'estimation de la cohérence et de l'altitude résiduelle de la forêt par interférométrie différentielle est recherchée. Il est évident qu'au vu de l'équation (1-8), plusieurs erreurs s'additionnent. Nous verrons que l'erreur dépend essentiellement de la qualité du MNT, du degré de cohérence des surfaces, et du nombre d'échantillons indépendants utilisés pour l'estimation.

A1.2.3.1 Cohérence

L'erreur d'estimation de la cohérence relative à une surface donnée s'exprime par la formule (1-9) (Hagberg et al. 1995) :

$$\sigma_{\gamma} = \frac{\sqrt{1 - \gamma^2}}{\sqrt{2N}} \tag{1-9}$$

ceci en posant l'hypothèse d'un processus de bruit blanc gaussien de moyenne nulle. Il est à noter qu'il faut utiliser un grand nombre d'échantillons (pixels) indépendants N afin d'avoir une précision acceptable, surtout dans les zones à faible cohérence (Figure 1-3).



Figure 1-3 : Variation de l'erreur d'estimation sur la cohérence en fonction du nombre d'échantillons et de la valeur de la cohérence.

Par exemple, un nombre d'échantillon de taille minimale de N=50 est nécessaire pour avoir une erreur inférieure à 0,1.

A1.2.3.2 Altitude résiduelle par interférométrie différentielle

L'erreur d'estimation de la hauteur moyenne relative de la forêt \overline{Z}_{rf} (éq. (1-7)) ou de la hauteur moyenne de la forêt \overline{Z}_{f} (équation (1-8)), dépend essentiellement 1) de l'erreur altitudinale du MNT utilisé, et 2) de la cohérence de l'interférogramme, donnant une phase plus ou moins bruitée. Les erreurs d'estimation de la hauteur résiduelle relative σ_{Zrf} et absolue σ_{Zf} pour la forêt sont alors données par:

$$\sigma_{Z_{\rm rf}} = \frac{Z_{\rm a}}{2\pi} \sigma_{\Delta\phi \,\rm for\hat{e}t} \tag{1-10}$$

$$\sigma_{Z_{\rm f}} = \sqrt{\sigma_{Zr_{\rm for\hat{e}t}}^2 + \sigma_{Zr_{\rm sol}}^2} = \frac{Z_{\rm a}}{2\pi} \sqrt{\sigma^2 \Delta \phi_{\rm for\hat{e}t} + \sigma^2 \Delta \phi_{\rm sol}}$$
(1-11)

avec
$$\sigma_{\Delta \phi} = \sqrt{\sigma^2 \phi + \sigma^2 \phi_{mnt}}$$
, forêt ou sol (1-12)

L'erreur d'estimation σ_{ϕ} de la phase interférométrique ϕ vient d'une part, du **bruit de phase** dû au niveau de cohérence de la cible σ_{ϕ^b} , et d'autre part, des variations de phase σ_{ϕ^z} venant de la **variation de la hauteur** σ_z de la surface imagée Z (forêt ou sol), donnée par:

$$\sigma\phi_{b} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^{2}}}{\gamma} \qquad \qquad \sigma\phi_{z} = \frac{2\pi}{Z_{a}} \sigma_{z} \qquad (1-13)$$

Dans le cas du bruit sur la phase dû au niveau de la cohérence, il apparaît un comportement similaire à l'erreur calculée sur la cohérence, et un nombre d'échantillon minimal de 50 entraîne une erreur de l'ordre de 1° au maximum (Figure 1-4).



Figure 1-4 : Variation de l'erreur d'estimation sur la phase en fonction du nombre d'échantillons et de la valeur de la cohérence.

L'erreur d'estimation $\sigma_{\phi^{mnt}}$, sous couvert forestier ou en zone ouverte (sol), dépend de l'erreur altitudinale du MNT σ_{Zmnt} , induisant une erreur sur la phase simulée ϕ_{mnt} :

$$\sigma_{\phi_{\text{mnt}}} = \frac{2\pi}{Z_a} \sigma_{Z_{\text{mnt}}}$$
(1-14)

En combinant les équations (1-10) à (1-14), on arrive à une expression globale pour l'erreur d'estimation de la hauteur relative et absolue du couvert forestier tenant compte des principales sources d'erreurs :

$$\sigma_{Zrf} = \sqrt{\left[\sigma^2 Z_{mnt, \text{for}\hat{e}t} + \sigma^2 Z_{\text{for}\hat{e}t}\right] + \frac{Z_a^2}{8\pi^2} \left(\frac{1 - \gamma^2}{N\gamma^2}\right)_{\text{for}\hat{e}t}}$$
(1-15)

et

$$\sigma_{Zf} = \sqrt{\left[\sigma^2 Z_{mnt, \text{for}\hat{e}t} + \sigma^2 Z_{mnt, \text{sol}} + \sigma^2 Z_{\text{for}\hat{e}t} + \sigma^2 Z_{\text{sol}}\right] + \frac{Z_a^2}{8\pi^2} \left[\left(\frac{1-\gamma^2}{N\gamma^2}\right)_{\text{for}\hat{e}t} + \left(\frac{1-\gamma^2}{N\gamma^2}\right)_{\text{sol}} \right]}$$
(1-16)

Dans les équations (1-15) et (1-16) le premier groupe de termes entre crochets représente respectivement les variations altitudinales du MNT et du terrain, alors que le deuxième groupe tient compte du bruit de phase lié à la cohérence du terrain. Il est clair que l'erreur d'estimation pour la hauteur relative sera plus faible que pour la hauteur absolue, étant donné que la différenciation nécessaire dans le deuxième cas additionne une deuxième source d'erreurs due au sol servant d'altitude de référence.

Ces expressions seront utilisées connaissant *a priori* les termes σ_z et en estimant les cohérences γ sur le sol et la forêt, et ce en fonction du stade de croissance. L'estimation obtenue pourra être alors confrontée à la mesure de l'erreur résiduelle obtenue à partir de l'image à l'aide des équations (1-10) à (1-12).

A1.3 Application de l'interférométrie RSO en milieu forestier

A1.3.1 Données interférométriques utilisées dans cette étude

La recherche des données disponibles sur le site de Mende a conduit à retenir un premier jeu d'images acquises pendant la phase C (cycle à 35 jours) du satellite ERS-1. Aucune donnée n'a en effet été enregistrée pendant les phases précédentes, ce qui exclut donc de pouvoir travailler sur des couples d'images séparées par un écart temporel inférieur à 35 jours.

Cependant, la phase tandem ERS-1/2 a permis à l'été 95 d'acquérir deux couples d'images ERS-1 et ERS-2 à 1 jour d'intervalle. Le Tableau 1-1 contient les données interférométriques retenues potentiellement intéressantes.

Scène	Date d'acquisition	Orbite	Frame	Origine			
1	23/04/92	4032	2709	ERS-1 phase C			
2	25/08/92	4533	2709	ERS-1 phase C			
3	28/01/93	8040	2709	ERS-1 phase C			
4	08/04/93	9042	2709	ERS-1 phase C			
5	17/06/93	10044	2709	ERS-1 phase C			
6	26/08/93	11046	2709	ERS-1 phase C			
7	04/11/93	12048	2709	ERS-1 phase C			
8	15/07/95	20909	2709	ERS-1 phase G			
9	16/07/95	1236	2709	ERS-2			
10	19/08/95	21410	2709	ERS-1 phase G			
11	20/08/95	1737	2709	ERS-2			

Tableau 1-1 : Scènes ERS-1 et ERS-2 (format RAW) disponibles à des fins interférométriques

Toutes les combinaisons ont ensuite été réalisées pour le calcul de l'intertrace et de l'altitude d'ambiguïté (Tableau 1-2). Les mesures se font en considérant un point du sol inclus dans la zone imagée par le radar et les positions du satellite sur les deux orbites lorsqu'il passe au plus près de ce point. Le résultat est purement local puisque d'une part l'intertrace peut varier pendant la durée de la prise de vue et que d'autre part l'altitude d'ambiguïté évolue dans la fauchée en fonction de l'angle d'incidence de l'onde radar. Cependant, ces variations restent faibles à l'échelle d'une scène ERS-1 standard (100 km x 100 km) et les valeurs obtenues suffisent à donner une idée correcte de la qualité de l'interférogramme final avant tout traitement. L'évaluation a été menée en prenant comme point de référence la ville de Mende (coordonnées géographiques : 3°30'E - 44°35'N). Elle conduit aux résultats suivants:

Couples	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7
Intertrace (m)	506	392	690	385	758	557	122	1194	125	257	1062
Altitude	17	23	-13	22	11	-15	-78	- 7	- 90	33	- 8
d'ambiguïté (m)											

Couples	3-4	3-5	3-6	3-7	4-5	4-6	4-7	5-6	5-7	6-7	8-9	10-11
Intertrace (m)	1077	61	373	944	1072	1440	133	375	940	1308	26	98
Altitude	- 8	590	22	- 9	8	6	82	23	- 9	- 6	-382	109
d'ambiguïté (m)												

Tableau 1-2 : Caractéristiques des couples interférométriques possibles acquis sur la zone d'étude. Les couples présentant les plus fortes altitudes d'ambiguïté et utilisés dans le cadre de l'étude sont soulignés en gris.

Pour les scènes ERS-1 seules, les altitudes d'ambiguïté les plus élevées en valeur absolue sont obtenues pour les couples intégrant les scènes 2, 3 et 5 d'une part et les scènes 4 et 7 d'autre part. Ces données correspondent à des périodes de l'année très différentes et donc à des états du couvert forestier variables bien qu'il s'agisse pour l'essentiel de zones plantées en résineux. Ces images doivent *a priori* conduire aux interférogrammes les plus propices à l'interprétation. Cependant, l'ajout à l'étude d'un couple tandem ERS-1/2 (couple 10-11) devrait permettre d'obtenir le meilleur interférogramme, étant donné l'écart d'un jour.

Il convient de préciser que cette évaluation préliminaire, qui se base sur des considérations purement géométriques, ne tient pas compte de la perte de cohérence naturelle qui peut survenir entre deux prises de vues. La qualité des interférogrammes obtenus et le degré de cohérence associé ne seront donc visibles qu'après la réalisation des traitements interférométriques proprement dits, réalisés sur les 4 meilleurs couples ERS-1 + un couple tandem (plages en grisé, Tableau 1-2).

A1.3.2 Interprétation visuelle des données interférométriques

A1.3.2.1 Produits interférométriques tandem

Le composé coloré des trois produits interférométriques tandem est représenté à la Figure 1-5a, avec un codage RVB (Rouge, Vert, Bleu) pour respectivement l'interférogramme différentiel, la cohérence et l'amplitude croisée. Le contour des forêts étudiées est aussi représenté. L'image couvre une région de 23 x 36 km.

Hormis son esthétisme visuel, on note au premier abord la complexité d'un tel document. La teinte dominante vert-jaune indique une bonne cohérence (vert clair) couplée à un résidu de phase plus ou moins important (rouge variable), correspondant à des zones de prairies et de cultures, ainsi qu'à de jeunes reboisements. Les zones vertes nettement découpées (haut à droite et coin gauche inférieur) sont dues à un saut de frange et non pas au contour d'un type de surface donné. On remarque deux types de zones bruitées: 1) des zones rougeâtres correspondant essentiellement à des forêts peu cohérentes (peu de vert) donc bruitées en phase (rouge) et à faible rétrodiffusion (bleu inexistant), et 2) des zones violacées correspondant aux fortes pentes faisant face au radar (orientation des pentes E et SE), indiquant une forte rétrodiffusion (bleu) due à l'effet de la pente sur l'aire de rétrodiffusion et une faible cohérence radar (peu de vert) créant une phase bruitée (rouge).

A-13



a) Composé coloré INSAR Rouge: interférogramme differentiel Vert: cohérence Bleu: amplitude



b) Image de cohérence

Contour général du parcellaire forestier



En terme de peuplements forestiers de pins noirs, il n'y a pas de relation directe évidente entre la teinte, le stade de croissance et la topographie.

L'image de cohérence seule (Figure 1-5b) est tout à fait intéressante à plusieurs points de vue. Globalement, la cohérence est élevée mais présente des contrastes spatiaux importants. Des zones de forte cohérence sont visibles au niveau des causses Méjean et Sauveterre ainsi que sur le Mont Lozère, zones dominées par des prairies naturelles. On remarque localement une forte cohérence sur la ville de Mende. A noter également un bruit élevé dans la cohérence sur les flancs de Causses exposés face au RSO (Est-Sud-Est), qui vient en grande partie du fait qu'il peut y avoir des cases MNT vides lorsque l'on projette les produits interférométriques dans la projection cartographique. On distingue sur les Causses des degrés de cohérence différents liés essentiellement à la présence des peuplements forestiers, par exemple les jeunes reboisements (20-40 ans) de pins noirs sur le Causse Méjean. La cohérence est plus élevée à cet endroit que sur le Causse de Mende où l'on retrouve des peuplements âgés (> 60 ans). Il semble donc y avoir un gradient décroissant de la cohérence en fonction de l'âge des peuplements. Cependant, on note des variations importantes de cohérence sur le Causse de Mende qui semblent liées à la topographie. D'ores et déjà, une possibilité de discrimination semble exister réellement à partir de ce type d'information quant à l'utilisation du sol et le stade de croissance de la forêt, avec probablement des effets perturbateurs dus à la topographie.

L'interférogramme différentiel (Figure 1-5c) montre une bonne qualité (peu de bruit) sur les zones de Causses (essentiellement le causse Méjean et le causse de Sauveterre). On notera la présence de zones bruitées correspondant bien aux zones faiblement cohérentes dans la Figure 1-5b, ce qui est consistant avec l'équation (1-11). Il s'agit des gorges où apparaît des zones de rétrécissement radar (*foreshortening*) ayant pour conséquence d'amalgamer du point de vue de l'instrument des cibles n'étant pas localisées au même endroit, ce qui est défavorable au traitement interférométrique. D'autres zones bruitées plus diffuses correspondent à des zones de forêts. On note également un saut de frange dans le coin droit supérieur et gauche inférieur, pouvant se produire comme expliqué au paragraphe A1.2.2.

A première vue, il n'est pas évident d'affirmer que le niveau de gris de cet interférogramme différentiel soit proportionnel au résidu d'altitude entre la topographie et le toit du couvert forestier, comme expliqué auparavant. Sur le Causse Méjean par exemple, on n'observe pas de zones globalement plus brillantes sur les peuplements forestiers. De plus, le résidu d'altitude devrait être à peu près constant en dehors de la zone boisée, étant donné qu'il n'y a pas de couverts végétaux hauts. On remarque des taches noires qui semblent liées à la géomorphologie du Causse: vallées, zones d'effondrements et dolines. On peut donc déjà s'interroger sur les sources d'erreurs comme celles dues au MNT utilisé dans l'interférogramme différentiel, rendant le produit difficilement interprétable à première vue.

L'image d'amplitude (non représentée) présente des contrastes liées essentiellement à l'effet du relief sur la rétrodiffusion radar (taille du pixel et angle d'incidence local). On remarque cependant une radiométrie plus faible pour les forêts de. pins noirs que pour les autres thèmes (champs et prés). Figure 1-6 : Produits interférométriques ERS-1 sur le site de Lozère du 08/04/93 et 04/11/93.



a) Composé coloré ERS-1 Rouge: interférogramme differentiel Vert: cohérence Bleu: amplitude



b) Image de cohérence

Contour général du parcellaire forestier



A-15
A1.3.2.2 Produits interférométriques ERS-1

Le composé coloré des trois produits interférométriques pour un couple ERS-1 est représenté à la Figure 1-6a, avec également un codage RVB pour respectivement l'interférogramme différentiel, la cohérence et l'amplitude croisée. On note de suite un aspect plus bruité comparé à la Figure 1-5a. Ceci est dû au fait que le processeur interférométrique du CNES a été amélioré récemment, ce dont a pu bénéficier le couple tandem. Auparavant, l'élaboration de l'image de cohérence s'effectuait dans la géométrie de l'image SAR sur des fenêtres 3x3, induisant un artefact se traduisant visuellement par un aspect de blocs.

L'élaboration de l'image de cohérence s'effectue dorénavant directement dans la géométrie de la projection cartographique, étant donné qu'une case MNT contient plusieurs pixels radar sur lesquels peut être calculée la cohérence.

La teinte dominante vert-jaune indique toujours une bonne cohérence (vert clair) couplée à un résidu de phase plus ou moins important (rouge variable), correspondant à des zones de prairies et de cultures, ainsi qu'à de jeunes reboisements. Ces zones sont ici plus limitées géographiquement, indiquant une perte de cohérence plus forte avec l'augmentation de l'écart temporel. Les zones bruitées rougeâtres sont généralisées en dehors des Causses, avec toujours ces zones violacées correspondant aux fortes pentes faisant face au radar. On note donc rapidement un contenu informatif plus limité comparé au couple tandem.

L'image de cohérence seule (Figure 1-6b) ne permet de distinguer que les zones de prairies sur les causses. La cohérence des peuplements forestiers est globalement la même sur les causses de Mende et de Méjean, le gradient observé à la Figure 1-5b a donc disparu. De plus, la cohérence des zones agricoles est similaire à celle de la forêt. Les possibilités de discrimination sont donc plus réduites.

L'interférogramme différentiel (Figure 1-6c) est beaucoup plus bruité que celui du couple tandem, en particulier sur les peuplements forestiers. Il n'y a pas de relation évidente entre le niveau de gris et l'altitude résiduelle des peuplements, avec toujours cette forte variabilité sur le Causse (taches noires). Cet interférogramme différentiel n'est donc pas aussi lisible que le premier, concernant en particulier la présence de peuplements forestiers.

A1.3.3 Analyse quantitative de la cohérence

Nous rappelons que les facteurs affectant ou pouvant affecter la cohérence sont:

- les conditions de prise de vue interférométrique:
 - distance intertrace,
 - écart temporel (en liaison avec la stabilité temporelle de la cible);
- le nature de la cible et sa stabilité temporelle:
 - utilisation du sol et niveau d'anthropisation,
 - variation de la géométrie (croissance, indice foliaire, déplacements dus au vent),
 - variation de la permittivité (teneur en eau, gel/dégel, pluie),
 - topographie (pente locale).

Le Tableau 1-3 et la Figure 1-7 contiennent quelques valeurs moyennes de cohérence sur 3 types d'occupation du sol : prés, champs et forêt de pins noirs, et ce pour les 5 couples interférométriques disponibles (les écart-types vont de 0,15 à 0,20).

	Conditions prise de vue		Surfaces types			
Couple	Intervalle (jours)	Distance intertrace (m)	Prés	Champs	Forêt Méjean	Forêt Mende
2-3	210	126	0,94	0,35	0,41	0,34
2-5	296	124	0,94	0,35	0,44	0,36
3-5	140	65	0,96	0,37	0,60	0,45
4-7	156	133	0,88	0,33	0,36	0,35
10-11	1	98	0,86	0,76	0,69	0,42

Tableau 1-3 : Valeurs moyennes de cohérence sur des surfaces types de la région.



Figure 1-7 : Evolution des valeurs moyennes de cohérence sur des surfaces types de la région en fonction de a) l'intervalle de temps entre 2 acquisitions et b) la distance intertrace.

Une première analyse de la Figure 1-7 fournit les informations suivantes :

- Une forte cohérence est obtenue pour les prairies (prés), et ce quelle que soit la combinaison de dates. Ces prairies naturelles, composées d'herbes rases sur sol pauvre, ne subissent peu ou pas de modification de leur géométrie, ce qui peut expliquer leur grande cohérence. Cependant, l'humidité du sol peut être très variable selon la saison et les conditions météorologiques. Néanmoins, (Wegmüller and Werner 1995) ont observé une conservation de la cohérence sous des changements de permittivité du milieu liés aux conditions de l'eau (humidité, gel/dégel).

- Les champs cultivés ont les plus faibles valeurs de cohérence (effets du travail cultural et du stade de croissance des cultures), sauf pour le couple tandem avec 1 jour d'écart. Ils présentent également la plus forte variabilité dans le temps et/ou avec l'intertrace. Quant à la forêt, on remarque une plus grande cohérence sur la forêt de Méjean comparée à la forêt de Mende, cette dernière étant plus âgée et plus dense que la première. Cette dépendance de la cohérence à la densité du couvert a été notée entre autres par (Hagberg et al. 1995). Nous analyserons maintenant de façon plus précise l'effet de l'écart temporel et de l'intertrace.

Effet de l'écart temporel

De façon générale, pour une cible donnée, la cohérence décroît avec l'intervalle temporel (Figure 1-7a), sauf pour le couple à 300 jours d'écart. Hormis le couple tandem, il est remarquable de noter que pour le couple avec 140 jours d'écart on obtient une cohérence élevée de 0,6 sur la forêt de Méjean, cohérence habituellement obtenue sur la forêt avec des intervalles beaucoup plus courts, comme ici avec le couple tandem, ou bien au vu de résultats obtenus par d'autres investigateurs (Hagberg et al. 1995). Ceci pourrait être dû à une très faible croissance des arbres à cet endroit ainsi qu'à la structure assez compacte de ces résineux, susceptible d'être moins affectée géométriquement par divers facteurs comme le vent. Cette hypothèse sera retenue pour la suite de l'étude. Dans notre cas, après un certain écart temporel, celui-ci ne semble pas avoir d'effet très important sur la cohérence. L'utilisation d'un écart temporel faible (quelques jours) permet d'obtenir des cohérences assez variables entre types d'utilisation du sol, comme en témoigne la courbe de la Figure 1-7a et la comparaison entre les images de cohérence dans les Figure 1-5b et Figure 1-6b (avec de meilleurs contrastes dans la première).

L'effet de l'écart temporel sur la cohérence doit être appréhendé en tenant compte de la nature et de l'évolution de la cible, affectées par les conditions météorologiques et le degré d'intervention humaine (culture, sylviculture, aménagement...). Le Tableau 1-4 contient les saisons liées à l'acquisition des couples interférométriques ainsi que les valeurs de vitesse du vent et de température (relevés horaires) les plus proches de l'heure d'acquisition. Il n'y a pas eu de précipitations pluvieuses lors des acquisitions. Les valeurs de cohérence de la forêt de Méjean sont reportées pour mémoire.

			VITESSE VENT			TEMPERATURE AIR		
Couple	Saison	Cohérence	Date1	Date2	ΔV	Date 1	Date 2	ΔT
		forêt	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(C°)	(C°)	(C°)
2-3	été-hiver	0,41	3,5	8	4,5	26,4	2,9	23,5
2-5	été-été	0,44	3,5	5	1,5	26,4	18,3	8,1
3-5	hiver-été	0,60	8	5	3	2,9	18,3	15,4
4-7	printaut.	0,36	4	5	1	13,1	11,3	1,8
10-11	été-été	0,69	4	3	1	ND	ND	ND

Tableau 1-4 : Conditions météorologiques pour les différents couples interférométriques étudiés. ΔV et ΔT sont respectivement les différences maximales de vitesse de vent et de température entre les deux dates d'acquisitions.

Malgré des conditions météorologiques très contrastées, l'effet des paramètres météorologiques sur la cohérence n'est pas très net. En effet, hormis le couple tandem 10-11, la meilleure cohérence est obtenue pour le couple 3-5, soit pour les saisons les plus contrastées quant au vent et aux conditions de gel pour l'acquisition d'hiver, suggérant un fort écart de géométrie et de permittivité des végétaux. Par opposition, la moins bonne cohérence (couple 4-7) est obtenue pour les conditions météorologiques apparemment les moins perturbantes. Il est difficile de conclure avec ces seuls résultats d'autant plus que l'analyse est complexe rendant difficile l'identification des principales causes de ce comportement.

Effet de l'intertrace

Comme expliqué auparavant, l'intertrace est aussi un facteur important; si l'on excepte le couple tandem avec une intertrace de 98 m, où la cohérence présente un pic du fait du faible écart temporel d'un jour, on observe une décroissance (Figure 1-7b) de la cohérence en fonction de la distance intertrace, sauf pour la forêt âgée. Ce résultat est cohérent avec celui de (Hagberg et al. 1995) et cette perte de cohérence est due à une différence de géométrie de visée accentuée aux plus fortes intertraces.

Ainsi, l'obtention d'une bonne cohérence, nécessaire à l'obtention de franges interférométriques utilisables, est tributaire d'un écart temporel le plus court possible, et d'une intertrace pas trop élevée pour éviter la décorrélation spatiale, mais pas trop faible non plus pour avoir une altitude d'ambiguité correcte.

A1.3.4 Sensibilité aux paramètres forestiers

Outre l'analyse visant à caractériser l'apport de la cohérence dans la discrimination de l'occupation du sol susceptible de s'insérer dans une démarche générale de cartographie de paramètre de la ressource, il est intéressant d'étudier la sensibilité des données interférométriques aux paramètres de la ressource forestière (volume tiges / ha, hauteur..). Ce revient à mettre en correspondance les quantités interférométriques avec unités forestières élémentaires issues au travers du SIG (unités ENGREF, LCT). Cette démarche méthodologique est identique à celle mise en œuvre dans le cadre du chapitre 4 concernant, dans ce cas, le coefficient de rétrodiffusion radar. Nous nous intéresserons tout d'abord au résultats obtenus avec la phase avant de s'attarder sur les résultats avec la cohérence.

A1.3.4.1 Résultats expérimentaux pour la phase

Il s'agit en d'étudier la sensibilité de la phase interférométrique à la hauteur du couvert forestier. Nous rappelons que l'estimation de la hauteur moyenne relative Z_r pour sol nu ou forêt, et la hauteur moyenne absolue Z_f de la forêt sont données par les équations (1-7) et (1-8) du chapitre 2 soit :

$$\overline{Z}_{r} = \frac{Z_{a}}{2\pi} \overline{\Delta \phi} = \frac{Z_{a}}{2\pi} \left[\overline{\phi - (\phi_{mnt} - \phi_{orb})} \right], \text{ sol ou forêt}$$
(1-17)

$$\overline{Z}_{f} = \overline{Z}_{rfor\hat{e}t} - \overline{Z}_{rsol} = \frac{Z_{a}}{2\pi} (\overline{\Delta\phi}_{for\hat{e}t} - \overline{\Delta\phi}_{sol})$$
(1-18)

Nous rappelons que nous estimons la hauteur moyenne relative des zones de sol Z_{rsol} servant d'altitude de référence par l'équation (1-18). Les estimations sont confrontées aux mesures de hauteur de forêt réalisées sur le terrain. Ces mesures de terrain ont été

réalisées sur des unités forestières élémentaires (superficie de plus de 2,5 ha). Les estimations de hauteur par interférométrie sont extraites des pavés de pixels de l'interférogramme différentiel $\Delta \phi$, correspondant spatialement aux unités élémentaires, et comprenant un nombre d'échantillons indépendants N entre 100 et 300.

La Figure 1-8 et la Figure 1-9 comparent les hauteurs résiduelles relatives et absolues estimées par interférométrie différentielle, avec les hauteurs mesurées sur le terrain des peuplements forestiers. A la Figure 1-8, on note une forte dispersion des estimations. Observons qu'une altitude d'ambiguïté négative donne une variation négative du résidu d'altitude relatif (cf tableau altitude d'ambiguïté en annexe). Ainsi, une augmentation ou une diminution des estimations en fonction des mesures sur le terrain est obtenue. Dans tous les cas, les résultats sont très médiocres, au vu de la dispersion et du peu de concordance entre la tendance et la droite relative 1:1 de laquelle elle devrait théoriquement être proche.



Figure 1-8 : Estimation de la hauteur relative de la forêt à l'aide de l'interférogramme différentiel, comparée à la hauteur mesurée sur le terrain, pour divers couples par ordre croissant d'écart temporel.



A la Figure 1-9, les résultats d'estimation de la hauteur résiduelle moyenne absolue de la forêt sont moins bon. On note une dispersion encore plus forte et une sous-estimation de la hauteur très marquée, donnant des valeurs négatives de hauteur d'arbre!

Figure 1-9 : Estimation de la hauteur absolue de la forêt à l'aide de l'interférogramme différentiel, comparée à la hauteur mesurée sur le terrain, pour divers couples par ordre croissant d'écart temporel.

Donc, si nous voulons utiliser, dans une phase d'interprétation ultérieure ces résultats expérimentaux, il conviendra d'expliciter et de quantifier les différentes sources d'erreurs affectant la hauteur interférométrique.

A1.3.4.2 Résultats expérimentaux pour la cohérence

L'analyse visuelle de l'image de cohérence de la Figure 1-5b a révélé un contraste de la cohérence entre les peuplements forestiers. La cohérence a été estimée statistiquement sur chacune des unités forestières homogènes (placettes LCT et ENGREF), et confrontée aux principaux paramètres forestiers: âge, hauteur et volume sur pied (troncs). Il est à noter que le nombre de pixels indépendants est inférieur sur les placettes LCT (en moyenne 120) que sur celles de l'ENGREF (en moyenne 320), ces dernières ayant été enquêtées à d'autres fins que pour cette étude. Nous rappelons que l'erreur d'estimation de la cohérence dépend à la fois du nombre d'échantillons indépendants et du niveau de cohérence (équation (1-9).

La Figure 1-10 contient les courbes de la cohérence estimée en fonction du volume des fûts. Chaque courbe contient une droite de régression linéaire. A partir de cette droite donnant la tendance générale de la cohérence en fonction du paramètre forestier, et connaissant le nombre moyen d'échantillons sur chacun des deux échantillonnages (placettes LCT: âges faibles jusqu'à 60 ans; placettes ENGREF: 60 ans et plus), on injecte ceux-ci dans l'équation (1-9) permettant de calculer l'erreur d'estimation de la cohérence. On remarque tout d'abord, une décroissance de la cohérence avec le volume des fûts. Cette décroissance est plus ou moins marquée selon les couples et la tendance linéaire est plus ou moins nette. En général, l'amplitude du gradient de cohérence décroît avec l'intervalle temporel. Ensuite, pour un couple interférométrique donné, le comportement de la cohérence est similaire selon les 3 paramètres forestiers (cf Tableau 1-3). Ceci est dû comme nous l'avons montré au chapitre 3 au fait que les paramètres forestiers sont fortement corrélés entre eux sur le site.

Quant à la dispersion des données, elle dépasse celle prédite par la théorie, indiquant qu'il y a sans doute une source de dispersion qui n'a pas été prise en compte. De plus, la dispersion décroît avec l'intervalle temporel. Il est à noter que pour un couple donné, cette dispersion est différente selon le paramètre forestier abordé.

Dans certaines conditions comme celles du couple tandem, le comportement de la cohérence semble donc être affecté en partie par les paramètres forestiers, liés au stade de croissance des peuplements, mais aussi à d'autres facteurs comme la topographie et les paramètres météorologiques (vitesse et direction du vent). Toutefois, si la dispersion apparaît plus importante pour ce couple, il affiche les meilleurs coefficients de détermination (Tableau 1-5). Il conviendra de faire une tentative d'interprétation des résultats par la suite, afin de comprendre comment la cohérence est partiellement liée aux paramètres forestiers.

Ces résultats montrent dans tous les cas, de meilleures liaisons entre les paramètres forestiers et la cohérence issue du couple interférométrique tandem. Un lien existe entre les paramètres forestiers et la cohérence, mais ce lien peut être perturbé par des phénomènes abiotiques (topographie, vent....etc) qu'il conviendra d'expliciter dans une phase d'interprétation ultérieure.

Coefficients de détermination R ² des régressions linéaires entre la cohérence et les paramètres forestiers					
Couples interférométriques	Age	Volume fûts	Hauteur		
Tandem	0,51	0,46	0,37		
ERS-1 3-5	0,31	0,31	0,35		
ERS-1 4-7	0,07	0,074	0,07		
ERS-1 2-3	0,18	0,16	0,2		
ERS-1 2-5	0,18	0,18	0,19		

Tableau 1-5 : Synthèse des R² obtenus entre la cohérence interférométrique et quelques uns des paramètres forestiers mesurés sur les unités élémentaires homogènes (LCT) et les parcelles ENGREF situées sur le causse de Mende (peuplements âgés exclusivement).



Figure 1-10 : Estimation de la cohérence des parcelles forestières en fonction du volume des fûts, pour un écart interférométrique croissant de gauche à droite et de haut en bas. La droite en gras correspond à une tendance issue de la régression linéaire. Les droites en pointillées de part et d'autre correspondent à plus ou moins 3 écarts types, selon l'équation (1-9). Le saut dans ces droites correspond à des nombres d'échantillons différents pour les deux groupes de points de part et d'autres de 350 m³/ha (soit ≈70 ans).

Annexe A

A1.3.5 Interprétation du comportement des indices interférométriques en milieu forestier

A1.3.5.1 Interprétation des résultats obtenus avec la phase

Rappelons que les erreurs d'estimation prédites pour la hauteur moyenne relative Z_r (sol ou forêt) et la hauteur moyenne absolue de la forêt Z_f sont données par:

$$\sigma_{Zrf} = \sqrt{\left[\sigma^2 Zmnt, \text{for}\hat{e}t \text{ ou sol} + \sigma^2 Z \text{ for}\hat{e}t \text{ ou sol}\right] + \frac{Z_a^2}{8\pi^2} \left(\frac{1-\gamma^2}{N\gamma^2}\right)_{\text{for}\hat{e}t \text{ ou sol}}}$$
(1-19)

$$\sigma_{Zf} = \sqrt{\left[\sigma^2 Z_{mnt, \text{for}\hat{e}t} + \sigma^2 Z_{mnt, \text{sol}} + \sigma^2 Z_{\text{for}\hat{e}t} + \sigma^2 Z_{\text{sol}}\right] + \frac{Z_a^2}{8\pi^2} \left[\left(\frac{1-\gamma^2}{N\gamma^2}\right)_{\text{for}\hat{e}t} + \left(\frac{1-\gamma^2}{N\gamma^2}\right)_{\text{sol}} \right] (1-20)$$

A partir de là, une compilation des différentes sources d'erreurs injectées dans ces équations est faite au Tableau 1-6 pour permettre une confrontation entre les erreurs prédites par les équations (1-19), (1-20) et les écarts types mesurés dans les interférogrammes différentiels. Pour certaines erreurs, les valeurs d'écarts types sont inconnues et des valeurs jugées représentatives sont utilisées.

Source d'erreur altitudinale	Variable	Ecart-type (m)	Origine
Imprécision du MNT, sol nu	Z _{mnt, sol}	2.5	IGN
Imprécision du MNT, sous forêt	Z _{mnt, forêt}	5	inconnue; supposée supérieure à celle du sol
Variation d'altitude du sol nu	Z _{sol}	1	estimée
Variation hauteur de la forêt intra-peuplement	Z _{forêtt}	2 à 3	mesurée in situ
Bruit de phase, sol nu	$\phi_{b sol}$	1	mesure cohérence + équation 2-37 (<i>cf</i> chapitre 2 § 2.4.3.2.2)
Bruit de phase, forêt	Ф _{b forêt}	1 à 2, pour 0 à 25m	mesure cohérence + équation 2-37 (cf chapitre 2 § 2.4.3.2.2)

Tableau 1-6 : Sources d'erreurs affectant l'estimation de la hauteur du couvert forestier par la phase différentielle interférométrique.

A partir de ces données, un calcul d'erreurs théoriques est réalisé afin de permettre une confrontation avec les erreurs résiduelles relatives et absolues obtenues *via* les interférogrammes différentiels. Il est à noter que les données du couple 3-5 ont été exclues en raison de la trop forte altitude d'ambiguïté (590 m) entraînant un biais systématique dans les résultats.

	Erreurs, Hauteur résiduelle relative (m)		Erreurs, Hauteur résiduelle absolue (m)	
Couple	Sol Forêt		Forêt	
2-5	2,2	7,1	13,3	
2-3	2,4	6,2	12,6	
4-7	2,6	7,9	11,8	
10-11	2,7	11,5	13,7	
Erreurs prédites	2,7	6,1 (7,8)	6,7 (8,3)	

Tableau 1-7 : Erreurs moyennes sur les hauteurs mesurées et prédites, pour le sol et la forêt âgée (hauteur > 20 m). Les valeurs prédites entre parenthèses sont calculées avec un Z_{mnt,forêt} égal à 7 m.

Le Tableau 1-7 contient les erreurs observées sur les hauteurs, pour les différents couples interférométriques. Examinons tout d'abord le résidu d'altitude sur sol nu. Nous devrions obtenir un résidu nul avec une faible variation si le MNT était très précis. Or, l'écart-type mesuré de la hauteur résiduelle varie entre 2,2 et 2,7 m, alors que celui prédit est en moyenne de 2,7 m. On retrouve une bonne concordance et dans ce cas, la principale source d'erreur vient de l'inprécision altitudinale du MNT valant environ 2,5 m.

Examinons maintenant le résidu d'altitude relatif sur des forêts âgées avec une hauteur comprise entre 20 et 23 m. L'écart-type observé est très élevé par rapport à l'écarttype de la hauteur de la forêt mesurée qui est de l'ordre de 3 m (tenant compte de l'écarttype intra- et inter-peuplements). L'écart-type prédit, incluant la variabilité de la hauteur du couvert mais aussi celle due à l'imprécision du MNT, est inférieure mais toutefois assez proche de celui mesuré. Il est à noter que nous avons estimé que la précision du MNT construit par photogrammétrie est plus faible sous couvert forestier, étant donné que l'opérateur se cale sur du sol nu pour l'établissement d'une courbe de niveau donnée et donc il y a interpolation en présence de forêt (selon IGN). Nous avons fixé ici arbitrairement à 5 m l'erreur altitudinale du MNT sous couvert. Ce point devra être éclairci ultérieurement. Si l'on prend 7 m pour l'erreur altitudinale du MNT sous couvert, l'erreur relative prédite est de 7,8 m et est en bonne concordance avec les erreurs observées. Dans ce cas, la principale source d'erreur est la variation du MNT sous couvert.

Finalement, si on observe l'écart-type des hauteurs résiduelles absolues, on cumule à la fois les sources d'erreurs sur le MNT en zones de sol et de forêt. Des erreurs très importantes sont donc observées, de l'ordre de la moitié de la hauteur du couvert. Cependant, l'erreur prédite est largement inférieure à la réalité même si l'on prend 7 m comme erreur du MNT sous couvert, en partie à cause de la méconnaissance de cette erreur et d'autres sources d'erreurs. En particulier, il existe une erreur systématique d'estimation due au fait que la hauteur interférométrique est le centre de la couche de diffusion dans les premiers mètres de la canopée (Figure 1-1), ne correspondant pas à la réalité du couvert forestier; il en résulte donc une sous-estimation systématique de la hauteur résiduelle du couvert, pouvant atteindre 2 mètres (Hagberg et al. 1995) s'ajoutant aux autres erreurs.

De toutes façons, à la vue des erreurs estimées, il apparaît qu'elles sont beaucoup trop élevées pour envisager l'utilisation de l'interférométrie différentielle sur des couverts forestiers relativement bas (<25 m) en terrain accidenté. Il serait intéressant de comparer nos résultats avec ceux d'autres investigateurs travaillant sur des sites forestiers en terrain plat, afin de voir s'ils ont effectivement des erreurs inférieures compatibles avec les applications.

Il serait également intéressant d'examiner directement l'interférogramme de départ non-différentiel, et de voir si l'on observe des sauts de phase locaux dus à la présence de peuplements. Ces interférogrammes n'ont pu être obtenus étant donné que l'option d'interférométrie différentielle du processeur du CNES ne permet pas d'obtenir l'interférogramme habituel à cause de l'injection directe du MNT dans le processus.

A1.3.5.2 Interprétation des résultats obtenus avec la cohérence

La pente négative observée sur les résultats expérimentaux (Figure 1-10) entre la cohérence et le stade de croissance des peuplements peut dépendre 1) de la combinaison des types de mécanismes de rétrodiffusion mis en jeu dans la réponse radar couplée au différentes sources de décorrélation, 2) de l'évolution temporelle des mécanismes et de la décorrélation dus aux changements de géométrie et de permittivité diélectrique des éléments diffuseurs, 3) de l'effet de la topographie.

Mécanismes de rétrodiffusion et modèle de décorrélation

Concernant les mécanismes de rétrodiffusion d'un couvert forestier en bande C, le coefficient de rétrodiffusion provient essentiellement de la diffusion volume $\sigma^{0}_{\text{forêt}}$ originaire de l'interaction avec les aiguilles et des branches, à laquelle vient s'ajouter la rétrodiffusion directe du sol σ^{0}_{sol} . L'importance du terme σ^{0}_{sol} est pondérée d'une part par l'humidité et la rugosité du sol, et d'autre part par des termes de transmission T et fraction f liés au stade de développement du couvert forestier. La rétrodiffusion totale peut ainsi s'approximer par un mélange linéaire des rétrodiffusions du sol et du couvert sous la forme :

$$\sigma^{0} = f(\sigma_{\text{for}\hat{e}t}^{0} + T^{2}\sigma_{\text{sol}}^{0}) + (1 - f)\sigma_{\text{sol}}^{0}$$
(1-21)

Il s'en déduit que dans le cas d'un sol peu végétalisé (f \ll 1), le $\sigma^{0}_{forêt}$ est faible et permet de récupérer un écho de sol présentant ici de fortes valeurs de cohérence. Cependant, la fréquence des trouées sur nos peuplements bien couvrant est faible. D'autre part, un fort facteur de transmission (T proche de 1) dans les jeunes peuplements permet également de récupérer un écho de sol important. Cependant, sur nos peuplements, la profondeur de pénétration de la bande C ne dépasse pas quelques mètres. L'écho de sol devient alors très vite négligeable avec l'âge. Ainsi, on peut expliquer une forte cohérence sur de très jeunes peuplements et une plus faible sur les plus âgés. Par contre cela ne nous permet pas d'expliquer les fortes variations de cohérence observées autour de la tendance générale (Figure 1-10) en particulier pour le couple tandem qui paradoxalement présente la plus forte variabilité alors que l'intervalle de temps est le plus court. Ainsi, la principale source de décorrélation en fonction de l'âge est à chercher ailleurs (Beaudoin et al. 1995).

En considérant que la principale source de décorrélation spatiale due à la pente du terrain est éliminée par l'injection du MNT dans la génération de l'interférogramme différentiel (Figure 1-2) la décorrélation ρ peut être décomposée en trois sources différentes (Askne et al. 1997; Zebker and Villasenor 1992) :

$$\rho_{\text{total}} = \rho_{\text{bruit}} \cdot \rho_{\text{spatial}} \cdot \rho_{\text{temporel}} \tag{1-22}$$

où ρ_{bruit} est le terme de décorrélation lié au bruit du système et est généralement négligeable (0.97< ρ_{bruit} <1), ρ_{spatial} intègre la décorrélation due aux changements de la géométrie d'acquisition entre les deux passes (i.e. les diffuseurs ne sont pas vus sous le même angle). Si le satellite passait exactement au même endroit ce terme serait égal à 1. Dans notre cas cette source de décorrélation est négligeable. Il reste le terme de décorrélation temporelle qui est un indicateur de l'instabilité géométrique et diélectrique de la cible, et donc de son évolution temporelle.

Evolution temporelle

Examinons donc les sources possibles de décorrélation temporelle. A intertrace identique, la décorrélation temporelle devrait être due essentiellement à un déplacement aléatoire des diffuseurs entre les deux acquisitions, ce qui donne un diagramme de speckle différent et donc décorrèle les signaux temporellement. La covariance entre les deux signaux s₁ et s₂ est donnée par (Zebker and Villasenor 1992) :

$$< s_{1}s_{2}^{*} >= \sigma_{\text{total}}^{0} \iint \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}(\delta_{y}\sin\theta + \delta_{z}\cos\theta)\right\} p_{y}(\delta_{y})p_{z}(\delta_{z})d\delta_{y}d\delta_{z}$$
(1-23)

avec * dénotant le conjugué complexe, σ^0_{total} le coefficient de rétrodiffusion et λ la longueur d'onde. Le terme exponentiel représente le déphasage introduit par les déplacements en δ_y et δ_z selon les directions y (radiale) et z (verticale) alors que les déplacements en x (azimut) sont considérés comme négligeables. Sous hypothèse de mouvements des diffuseurs indépendants de leur position initiale et d'indépendance des distributions de probabilité $p(\delta_y)$ et $p(\delta_z)$ supposées gaussiennes et centrées sur zéro, et après normalisation par (<s1s1*><s2s2*>)^{1/2} = σ^0_{total} on obtient :

$$\rho_{\text{temporel}} = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2\left(\operatorname{sd}_{\delta y}^2\sin^2\theta + \operatorname{sd}_{\delta z}^2\cos^2\theta\right)\right\}$$
(1-24)

où sd₅z et sd₅y sont les écarts types des déplacements en z et en y des diffuseurs entre les deux dates. Cela suppose implicitement que la décorrélation dans une cellule de résolution est liée à l'indépendance des diffuseurs répartis uniformément dans un plan horizontal. Les résultats de simulations de l'impact des mouvements désordonnés des diffuseurs à l'intérieur d'une cellule à partir de l'équation (1-24) sont présentés à la Figure 1-11.

Il apparaît dans le cas de la géométrie de visée d'ERS une prépondérance de l'influence des mouvements désordonnés dans la dimension verticale avec une décorrélation quasi totale pour des mouvements de l'ordre du centimètre. Alors que dans la dimension radiale celle-ci intervient vers 2,5 cm. Il ressort que ces déplacements aléatoires ont une forte influence sur la cohérence pour des amplitudes de mouvements très inférieures à la longueur d'onde (ici, 5,66 cm). Il est entendu que pour des incidences rasantes ces résultats seraient inversés. Par contre, dans le cas de mouvements de tous les diffuseurs dans la même direction, le module de la cohérence n'est pas affecté. Ceci permet la détection des mouvements d'ensemble, comme par exemple les mouvements de la croûte terrestre dans le cas de séismes (Massonnet et al. 1994).



Figure 1-11 : Simulation de la cohérence à partir de l'équation (1-24) en fonction des mouvements désordonnés des diffuseurs de la cellule de résolution dans les dimensions radiale (y) et verticale (z), et pour les configurations radar d'ERS.

En se basant sur ces résultats, on peut raisonnablement supposer que la masse foliaire (aiguilles), principale source de diffusion en bande C, soit susceptible de subir de tels déplacements sous l'effet du vent. Sous cette hypothèse, la décroissance de la cohérence avec l'âge du peuplement indiquerait que la masse foliaire subirait des déplacements plus importants dans les peuplements âgés que dans les jeunes. On peut supposer que le déplacement des aiguilles dépend de la rigidité des éléments ligneux les supportant. Cette rigidité peut être raisonnablement considérée proportionnelle au diamètre de la branche et inversement proportionnel à sa longueur. Or, dans des arbres âgés, les aiguilles sont essentiellement regroupées au bout de branches fines (branches d'ordres élevés par rapport à la branche principale), alors que sur les jeunes arbres elles s'insèrent sur des branches plus grosses (branches d'ordre faible par rapport à la branche primaire). De plus, on peut supposer que la taille d'un arbre (hauteur et diamètre) conditionne l'emprise au vent.

Une autre source de décorrélation temporelle peut être un changement de teneur en eau. Cependant, le pin noir est une essence qui régule très bien sa teneur en eau (cf chapitre 3 § 3.3.2.3); de plus pour ce qui est du couple tandem, il est certain que cette teneur ne peut pas varier significativement en une journée.

Donc, l'hypothèse d'un effet variable du vent sur le déplacement des diffuseurs en fonction de l'âge des peuplements est retenue comme principale source de décorrélation temporelle, expliquant 1) le gradient négatif de cohérence avec l'âge et 2) la forte variabilité des résultats pour un même âge (cas des résultats obtenus avec le couple tandem).

Effet de la topographie

Si on observe l'image de cohérence tandem à la Figure 1-5b sur le Causse de Mende, des variations significatives de cohérence semblent être liées à la topographie sur ce Causse, constitué de deux vallées parallèles orientées SO-NE. La cohérence est la plus élevée sur les flancs exposés SE, et la plus faible sur les flancs exposés NO. Or, le vent était de direction NO et O lors des acquisitions. Nous posons donc comme hypothèse que selon la pente et l'exposition, les arbres sont plus ou moins exposés au vent et donc la masse foliaire subit plus ou moins de déplacement.

Le critère d'exposition au vent sera décrit géométriquement par l'angle θ_v entre le vecteur normal au terrain et le vecteur vent, comme décrit à la Figure 1-12 : un angle de 180° indique une exposition maximale au vent (pente faisant perpendiculairement face au vent) et un angle de 0° une exposition minimale au vent (pente complètement à l'abri du vent). Cet angle est donné par:

$$\theta_{v} = \cos^{-1} \left[\sin \alpha \, \cos(\beta_{v} - \beta) \right] \tag{1-25}$$

où β_v et β sont les azimuts du vent et du terrain et α la pente du terrain.



Figure 1-12 : Représentation schématique de l'angle d'incidence au vent θ_v entre le vecteur normal au terrain (\overline{n}) et le vecteur vent (\overline{v}) .

Afin de vérifier l'hypothèse émise plus haut, l'évolution de la cohérence en fonction de l'angle d'incidence au vent a été observée pour de faibles (Figure 1-13a) et de forts volumes (Figure 1-13b). Si aucune tendance nette n'est observée pour les faibles volumes, une décroissance de la cohérence en fonction du θ_{vent} apparaît chez les forts volumes (300-500 m³/ha) localisés sur le Causse de Mende. Ce résultat indique une décorrélation plus forte pour des expositions plus élevées au vent.



Figure 1-13 : Cohérence normalisée en fonction du critère d'exposition au vent (θ_{vent}) pour les volumes de a) 0-200 m³/ha et b) 300-500 m³/ha, ajustée par le modèle théorique, équation (1-24) modifiée.

Cette décroissance a une amplitude équivalente à celle observée en fonction du stade de croissance en situation de terrain plat. Elle permet d'expliquer la forte dispersion observée à la Figure 1-10 en particulier pour le couple tandem. De plus, si l'on pose que l'écart type de l'amplitude de déplacement des diffuseurs pour les forts volumes (> 300 m³/ha) varie linéairement en fonction du θ_{vent} sous la forme :

$$\mathrm{sd}_{\delta \mathrm{y}\,\mathrm{ou}\,\delta \mathrm{z}} = \mathrm{k}_{\delta \mathrm{y}\,\mathrm{ou}\,\delta \mathrm{z}}.\theta_{\mathrm{vent}} \tag{1-26}$$

où $k_{\delta y \text{ ou} \delta z}$ est un paramètre relié par une fonction inconnue de la vitesse locale du vent (v_{loc}) dans les directions radiale (y) et verticale (z).

En combinant les équations (1-24) et (1-26), vient une nouvelle formulation de la décorrélation temporelle utilisée pour ajuster les données expérimentales. Le résultat (Figure 1-13b) montre un bon ajustement entre expérimentation et théorie. A partir des valeurs de k ainsi obtenues nous pouvons inférer sur les déplacements relatifs des diffuseurs en y et en z en fonction de l'exposition au vent, et donc implicitement de la vitesse locale du vent (Figure 1-14).



Figure 1-14 : Ecart type des amplitudes de déplacements dans les dimensions radiales (y) et verticales (z) des diffuseurs obtenues *via* le modèle théorique modifié de décorrélation temporelle.

Néanmoins, nous n'avons aucune possibilité de valider ou de rejeter ces résultats, ils nous permettent seulement de pointer du doigt l'importance que peut avoir l'impact d'un facteur abiotique, tel que le vent, sur le résultat et l'interprétation des données de cohérence. A l'issue de cette analyse trois principaux points ressortent, du moins pour le couple tandem :

- la sensibilité de la cohérence à l'âge des peuplements est due à un déplacement croissant avec l'âge de la masse foliaire sous l'effet du vent, et induit une chute de cohérence d'environ 0,3-0,4;
- 2. pour un âge donné de peuplement, la topographie affecte l'exposition au vent, ce qui modifie la vitesse locale du vent sur le relief, et donc induit un déplacement variable de la masse foliaire, se traduisant aussi par une chute de cohérence de l'ordre de 0,3-0,4.
- 3. pour les faibles volumes (jeunes peuplements), aucune liaison n'est observée avec le θ_{vent} car la corrélation est directement reliée à la variation de la contribution du sol (1-21). Quant à la dispersion observée, elle peut être expliquée d'une part, par la plus ou moins grande stabilité au vent local des peuplements jeunes et d'autre part, par la variabilité de la transmittivité et de la fraction du couvert couplés à la variation de la rugosité et de l'humidité du sol.

La Figure 1-15 résume de façon schématique l'impact du vent sur le mouvement relatif des arbres jeunes et âgés en fonction de la topographie.





A la lumière de ces résultats et compte tenu de la complexité d'interprétation de ce type de données nous proposons une synthèse en vue de potentielles applications.

A1.3.5.3 De l'interprétation phénoménologique aux applications potentielles de la cohérence en milieu forestier

Une certaine vitesse du vent s'avère nécessaire pour observer une décroissance marquée de la cohérence avec l'âge du peuplement. S'il n'y a pas de vent, les peuplements sont plus cohérents (pratiquement aucun déplacement), avec des écarts plus faibles de cohérence pour différents âges; s'il y a trop de vent, même les jeunes peuplements subiront des déplacements importants de masse foliaire et il y aura peu ou pas de gradient de cohérence (Figure 1-16a). Pour un terrain accidenté (pente et azimut) en relation avec la direction et la vitesse du vent, des variations perturbatrices de cohérence par rapport à la sensibilité de la cohérence à l'âge des peuplements sont observées (Figure 1-16b).





On peut donc entrevoir qu'il sera difficile d'utiliser la cohérence en terrain accidenté pour estimer les paramètres classiques des peuplements forestiers, ce qui devrait par contre être possible en terrain plat, étant donné qu'il est très rare qu'il n'y ait pas de vent et que, dans notre cas, un vent de 10-15 km/h a suffit à créer un gradient de cohérence marqué.

Par contre, l'étude de la cohérence a permis de mettre en relation la sensibilité de cette information à une caractéristique originale des peuplements forestiers, à savoir le **déplacement de la masse foliaire en fonction de la vitesse locale du vent**. Il serait intéressant de tenter de valoriser ce nouveau type d'information dans des applications nonconventionnelles: propriétés de propagation des feux de forêts avec le vent, microclimatologie, rugosité aérodynamique...

Des travaux poursuivis dans ce sens (Martinez 1997) confirment que la cohérence est affectée de façon complexe par de nombreux paramètres dont certains comme le LAI sont des plus intéressants pour les problématiques forestières (productivité, écophysiologie..) ou climatologiques (rugosité aérodynamique, transferts atmosphère-biosphère...). Toutefois, et dans un objectif de généralisation, ces travaux devront être appuyés par une démarche théorique *via* les modèles cohérents basés sur les équations de Maxwell.

A1.4 Conclusions

De façon générale, il s'est avéré que l'interprétation des données interférométriques est assez difficile, en particulier la phase de l'interférogramme différentiel, de par sa nouveauté et la prise en compte nécessaire de nombreux paramètres (forestiers, météorologiques, topographiques, atmosphériques...). Toutefois, l'analyse des produits interférométriques a permis de confirmer des tendances récemment obtenues par d'autres auteurs, ou d'en dégager de nouvelles. En particulier sur la sensibilité des produits interférométriques aux paramètres forestiers et aux phénomènes perturbateurs.

Concernant la cohérence

- la cohérence détecte des changements temporels du couvert que l'amplitude ne détecte pas forcément;
- la cohérence permet de séparer certains thèmes comme les prairies, les champs et les forêts, difficilement séparables à l'aide des images amplitudes seules;
- le pouvoir discriminant est plus élevé avec un écart temporel très court et une intertrace moyenne (100 à 300m);
- pour un écart temporel court, la cohérence varie en milieu forestier en fonction du déplacement de la masse foliaire, lui-même en relation avec l'âge du peuplement, la vitesse et la direction du vent ainsi que la situation topographique;
- on peut dans certaines conditions, restant à définir, obtenir une relation intéressante entre la cohérence et les paramètres forestiers classiques corrélés à l'âge des peuplements;
- l'information de déplacement de la masse foliaire dans les dimensions radiales et verticales est un nouveau type d'information pouvant être utile dans diverses applications (modélisation de la propagation des feux, micro-climatologie, échanges végétation-atmosphère ? ...)

La cohérence (bande C) est donc une information autant sinon plus intéressante et originale que l'amplitude de rétrodiffusion sur les milieux forestiers, et son potentiel mérite donc d'être étudié plus en profondeur en fonction de la variabilité des caractéristiques des peuplements forestiers, des conditions topographiques et météorologiques.

Concernant l'interférogramme différentiel

- l'utilisation d'un interférogramme différentiel, dans lequel l'effet topographique est éliminé à l'aide d'un MNT, permet de s'affranchir largement du problème de déroulement de frange lorsque l'on utilise une altitude d'ambiguïté suffisante;
- l'interférogramme différentiel est cependant une information de complexité supérieure à celle de la cohérence;
- sur les sols à végétation basse, l'interférogramme différentiel est assez variable, alors qu'il devrait être relativement constant. Il semble faire apparaître des phénomènes topographiques liés la géomorphologie, mal pris en compte par le MNT à cause de son imprécision altitudinale;
- sur les forêts, l'interférogramme différentiel est très variable, au regard des variations de la hauteur de la forêt mesurée sur le terrain; cette erreur provient probablement aussi de la précision dégradée du MNT sous couvert forestier par rapport aux sols dégagés. Du coup, la différence de résidu d'altitude entre forêt et sol, qui pourrait permettre de retrouver la hauteur du couvert forestier, est extrêmement bruitée, à cause de l'addition de plusieurs sources d'erreurs. Ces erreurs provenant en grande partie du MNT, mais aussi du niveau de cohérence, des variations d'altitude de la surface étudiée et de la hauteur interférométrique des couverts inférieure à la hauteur réelle.

L'interférogramme différentiel est donc une information très bruitée thématiquement et est difficilement exploitable à cause des nombreuses sources d'erreurs. Ceci nous porte à croire qu'il serait peut-être plus avantageux d'utiliser un interférogramme habituel, sans élimination de la topographie et éventuellement avec déroulement de la phase, afin de détecter des variations topographiques locales dues à la présence de forêts.

Pousser plus loin l'interprétation des données interférométriques passe par l'utilisation de modèle théorique cohérent nécessitant une description précise du milieu forestier incluant la position de l'ensemble des diffuseurs. Un couplage de ces modèles théoriques avec le modèle architectural AMAP s'avère ici aussi dès plus prometteur. Des travaux sont actuellement poursuivis dans ce sens.

Références bibliographiques

- Askne, J., and Hagberg, J. O. "Potential of interferometric SAR for classification of land surfaces." Proceedings of IGARSS'93 Symposium, Tokyo Japan, 985-987.
- Askne, J. I. H., Dammert, P. G. B., Ulander, L. M. H., and Smith, G. (1997). "C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35(1), 25-35.
- Beaudoin, A., Castel, T., and Rabaute, T. (1995). "Apport des produits interférométriques ERS à des fins d'inventaire forestier." *Convention CNES #94/CNES/0239*, CNES, Toulouse.
- Beaudoin, A., Castel, T., and Rabaute, T. "Forest monitoring over hilly terrain using ERS INSAR data." *Fringe '96 Workshop*, Zurich, Suisse.
- Floury, N., Le Toan, T., and Souyris, J. C. "Relating forest parameters to interferometric data." Proceedings of IGARSS'96 Symposium, Lincoln Nebraska USA.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., and Zebker, H. A. (1989). "Mapping small elevation changes over large areas; differential radar interferometry." Journal of Geophysical Research, 94(B7), 9183-9191.
- Gens, R., and van Genderen, J. L. (1996). "Review article : SAR interferometry--issues, techniques, applications." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 17(10), 1803-1835.
- Hagberg, J. O., Ulander, L. M. H., and Askne, J. (1995). "Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(2), 331-340.
- Herland, E. A. "SAR interferometry with ERS-1 in forested areas." *Proceedings of IGARSS'95* Symposium, Florence Italy, 202-204.
- Li, F. K., and Goldstein, R. M. (1990). "Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 28, 88-97.
- Lin, Q., Vesecky, J. F., and Zebker, H. A. (1994). "Comparison of elevation derived from INSAR data with DEM over large relief terrain." *International Journal of Remote Sensing*, 15(9), 1775-1790.
- Madsen, S. N., Zebker, H. A., and Martin, J. (1993). "Topography mapping using radar interferometry : processing techniques." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 31(1), 246-256.
- Martinez, J. M. (1997). "Estimation de paramètres forestiers à l'aide de données SAR interférométriques (ERS)," DEA, Université de Paris VII, Paris.
- Massonnet, D. (1992). "Perspectives de l'interférométrie par radar." Bul. S.F.P.T., 127, 3-15.
- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., and Adragna, F. (1994). "Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake." *Nature*, 369, 227-230.
- Massonnet, D., and Rabaute, T. (1993). "Radar interferometry : limits and potential." *IEEE Trans.* Geosci. Remote Sensing, 31(2), 455-464.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute, T. (1993). "The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry." *Nature*, 364, 138-142.
- Prati, C., Rocca, F., and Monti Guarnieri, A. "SAR interferometry experiments with ERS-1." Proceedings of the first ERS-1 Symposium, Cannes France, 211-217.
- Strozzi, T., and Wegmüller, U. (1997). "Forest mapping with ERS SAR interferometry." .
- Ulander, L., Dammert, P. B. G., and Hagberg, J. O. "Measuring tree height with ERS-1 SAR interferometry." *Proceedings of IGARSS'95 Symposium*, Florence Italy, 2189-2191.
- Ulander, L., Hagberg, J. O., and Askne, J. "ERS-1 SAR interferometry over forested terrain." Second ERS-1 Symposium, Hamburg Germany, 475-480.
- Wegmüller, U., and Werner, C. (1995). "SAR interferometric signatures of forest." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(5), 1153-1161.
- Wegmüller, U., Werner, C. L., and Rosen, P. A. "Derivation of terrain slope from SAR interferometric phase gradient." Second ERS-1 Symposium, Hamburg Germany, 711-715.
- Werner, C. L., Wegmüller, U., and Small, D. L. "Applications of interferometrically derived terrain slopes: normalization of SAR backscatter and the interferometric correlation coefficient." Second ERS-1 Symposium, Hamburg RFA, 723-726.
- Zebker, H. A., and Goldstein, R. M. (1986). "Topographic mapping from interferometric SAR observations." Journal of Geophysical Research, 91, 4993-4999.
- Zebker, H. A., and Villasenor, J. (1992). "Decorrelation in interferometric radar echoes." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(5), 950-959.
- Zebker, H. A., Werner, C., Rosen, P. A., and Hensley, S. (1994). "Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 32(4), 823-836.

Annexe B Liste des publications réalisées dans le cadre de la thèse



Annexe B Liste des publications réalisées dans le cadre de la thèse

Publications Scientifiques dans des revues à comité de lecture

Beaudoin A., T. Castel, M. Deshayes, N. Stussi, N. Stach, Le Toan, T. and P. Durand (1997), Sensitivity of spaceborne SAR data to forest parameters over sloping terrain, pour soumission à *IJRS*.

Castel, T., A. Beaudoin, N. Floury and T. Le Toan, J.F. Barczi, Y. Caraglio, (1997), Coupling of backscatter models with a generic tree growth model: 1) A realistic description of the canopy using the AMAP model, en préparation pour soumission à *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*.

Floury, N., G. Picard, T. Le Toan, J.A. Kong, T. Castel, A. Beaudoin and J.F. Barczi, Coupling of backscatter models with a generic architectural tree growth model: 2) RT modelling of forest backscatter, en préparation pour soumission à *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*.

Communications orales dans des symposium internationaux avec actes

Castel, T., A. Beaudoin, J.F. Barczi, Y. Caraglio, N. Floury and T. Le Toan (1997), On the coupling of backscatter models with tree growth models :1) A realistic description of the canopy using the AMAP Tree Growth Model, *IGARSS'97 Proceedings*, Singapour, Août 4-8, p 784-786.

Floury, N., G. Picard, T. Le Toan, J.A. Kong, T. Castel, A. Beaudoin and J.F. Barczi (1997), On the coupling of backscatter models with tree growth models: 2) RT modelling of forest backscatter, *IGARSS'97 Proceedings*, Singapour, Août 4-8, p 787-789.

Beaudoin, A., T. Castel, M. Deshayes, N. Stussi, N. Stach and T. Le Toan (1995), Biomass retrieval over hilly terrain from spaceborne SAR data, *CNES/IEEE international symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications*, Toulouse, France, 10-13 Octobre 1995, p 131-140.

Stussi N., A. Beaudoin, T. Castel and P. Gigord (1995), Radiometric correction of multi-configuration spaceborne SAR data over hilly terrain, *CNES/IEEE international symposium on the Retrieval of bio and geophysical parameters from SAR data for land applications*, Toulouse, France, 10-13 Octobre 1995, p 457-466.

Beaudoin, A, T. Castel, N. Stach, F. Borne, Y. Caraglio, D. Barthelemy et P. Durand (1996), Couplage de données radar SIR-C à un modèle de croissance des arbres : évaluation de paramètres forestiers sur la maquette et simulation 3D d'un paysage, *9^{ème} Congrés de l'AQT en Géomatique et Télédétection*, Québec, Canada, Mai 1996, 17 p.

Beaudoin, A., T. Castel and T. Rabaute (1996), Forest monitoring over hilly terrain using ERS INSAR data, *Fringe '96 Workshop Zurich*, Suisse, Octobre 1996.

Castagnas L., N. Stussi, A. Beaudoin, T. Castel, S. Sylvander et P. Gigord (1997), Une méthode unifiée de correction des images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) acquises en terrain accidenté, soumise pour le *7ième Symposium International en Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, Courchevel, France, 6-11 Avril 1997.

<u>Communications orales dans des symposium internationaux sans actes</u>

Beaudoin, A., M. Hallikaïnen, J. M. Martinez, M. Makynen, T. Castel, J. Uustalo and N. Floury, 1998, Preliminary analysis of HUTSCAT data over Autrian pine plantations in relation with tree parameters and architecture, *PIERS 1998*, Nantes, France.

Beaudoin, A., T. Castel, N. Stach, F. Borne, Y. Caraglio, D. Barthélémy and P. Durand (1997), Estimation of a vegetation coveragewith a vegetal growth model (AMAP), driven with GIS/Remote Sensing datas, Indo-French *Workshop on "Symbolic Data Analysis and its applications*", Université Paris IX - Dauphine, LISE - CEREMADE, 23-25 Septembre 1997.

Castel, T., A. Beaudoin, N. Stach, J. C. Souyris and T. Le Toan (1996), Sensitivity of polarimetric SIR-C SAR data to forest parameters over hilly terrain : a case study on Austrian pine, *PIERS 1996*, Innsbruck, Autriche, 8-12 Juillet 1996.

Beaudoin, A, F. Borne, T. Castel, Y. Caraglio, D. Barthélémy, J. F. Barczi, N. Stach and P. Durand (1996), A methodology for GIS-Based 3D simulation of forested hilly landscape, using SIR-C SAR data coupled to the AMAP tree growth model, *PIERS 1996*, Innsbruck, Autriche, 8-12 Juillet 1996.

Beaudoin, A., T. Castel and T. Rabaute (1996), Potential of ERS1/2 Insar Data for forest monitoring over hilly terrain : case study on Austrian pine plantations, *PIERS 1996*, Innsbruck, Austriche, 8-12 Juillet 1996.

<u>Séminaires et ateliers internationaux</u>

Beaudoin, A., T., Castel, Le Toan, T., Floury, N., and Y., Caraglio (1998), Estimation de la biomasse par télédétection radar : apport du couplage d'un modèle théorique de rétrodiffusion à un modèle architectural de croissance d'arbres, *Atelier International "changement d'échelle et modélisation en foresterie : apport de la télédétection et des SIG*, 19-21 Mars 1998, Université de Montréal, Québec Canada.

Castel, T., Floury, N., Picard, G., Beaudoin, A., Le Toan, T., Barczi, J. F. et Y. Caraglio (1998), Modélisation radar des milieux forestiers : couplage d'un modèle architectural de plantes avec un modèle de diffusion électromagnétique, *Séminaire CESBIO*, Toulouse, 13 Mars 1998.

Beaudoin, A., Le Toan, T., Castel, T., Floury, N., and Y., Caraglio (1997), Towards retrieval of forest parameters over hilly terrain using SAR data, *CCRS Seminar*, Ottawa Canada, 19 december 1997.

Beaudoin, A., T., Castel, Y., Caraglio, F. Borne and T. Le Toan (1997), Estimating forest parameters on sloping terrain using L-band SIR-C SAR data and the AMAP tree growth model, *SIR-C/X-SAR Final Meeting*, 11-14 March 1997, Forence Italy.

Castel T., A. Beaudoin, N. Stach, Y. Caraglio, F. Borne, D. Barthélémy, J. F. Barczi et P. Durand (1996), Apport de l'imagerie satellitaire radar et du modèle architectural de croissance d'arbres AMAP pour le suivi de la biomasse forestière, *Séminaire télédétection et végétation*, ENGREF, Montpellier, 26 Novembre.

Contrats et autres rapports

Castel T., J. F. Barczi, Y. Caraglio, A. Beaudoin, H. Rey, S. Chetaille et L. Castagnas (1997), User Manual, AMAP2SAR AMAP sorter V1.0, *ESA contract No. 163014/96/NL*, Mai, 68p.

Beaudoin, A. et T. Castel (1996), Apport des données SIR-C/X-SAR pour le suivi de la ressource forestière (Phase 2), Rapport final, *convention CNES#96/CNES/0440*, 53p.

Beaudoin, A., T. Castel, et T. Rabaute (1995), Apport des produits interférométriques ERS à des fins d'inventaire forestier, *Rapport final, convention CNES #94/CNES/0239*, 40p.

Beaudoin, A., T. Castel, et M. Deshayes (1994), Apport des données SAR multi-fréquence polarimétrique (SIR-C/XSAR) pour le suivi de la ressource forestière, *Rapport final, convention CNES#94/CNES/0268*, 35p.

Beaudoin A., L. Castagnas, N. Stussi, T. Castel, S. Sylvander et P. Gigord (1997), Généralisation et validation d'une méthode de correction radiométrique des images radar satellitales acquises en terrain accidenté, Rapport final, *convention CNES*#95/CNES/0440, 120p.

Castel T., Rapports biannuels et annuels d'avancement des travaux pour l'Ademe et l'ENGREF, d'octobre 1994 à octobre 1997.

Annexe du chapitre 2



Annexe du chapitre 2

A2.1 Antenne synthétique, effet Doppler et résolution azim	utale2-1
A2.1.1 Antenne synthétique A2.1.2 Calcul de la fréquence Doppler et de la résolution azimutale.	
A2.2 Correction géométrique et radiométrique des images l	RSO2-4
A2.2.1 Introduction	
A2.2.2 Methodology	
A2.2.2.1 SAR post-processing chain	2-5
A2.2.2.2 SAR simulations	2-6
A2.2.2.3 Radiometric corrections	2-7
A2.2.2.3.1 Relief calibration	2-7
A2.2.2.3.2 Backscatter angular correction	
A2.2.3 Experimental data and results	
A2.2.3.1 Test-site and ground truth	
A2.2.4 SAR data	
A2.2.4.1 Results	
A2.2.4.1.2 Relief calibration	2-12
A2.2.4.1.3 Backscatter angular correction	
A2.2.5 Discussion	
A2.2.5.1 Simulation process	2-14
A2.2.5.2 Radiometric corrections	2-14
A2.2.6 Conclusion and future works	2-15
A2.2.7 Bibliography	2-15
A2.2.7 Dibilography	

Annexe du chapitre 2

A2.1 Antenne synthétique, effet Doppler et résolution azimutale

Un des aspects les plus complexes concernant les images RSO se situe au niveau de la formation de l'image radar après "*processing*" du signal reçu. La résolution azimutale lié au processus de synthèse d'ouverture peut être éclairée sous plusieurs point de vue (antenne synthétique, fréquence Doppler, filtrage adapté...). Nous présentons ici l'aspect fréquence Doppler car il constitue une différence essentielle entre les ROR et les RSO. En effet, chez ce dernier contrairement au ROR, l'information de phase est exploité (*cf* chapitre 2) on parle alors de radar cohérent. L'utilisation de la fréquence Doppler (f_D) conduit ainsi à des traitements de données plus important chez les RSO comparé aux ROR.

De la façon dont l'information de phase est récupérée (acquise et préservée) par le système radar dépend la qualité de l'image générée. Il convient donc, d'une part, d'accéder à la meilleure connaissance possible de l'orbitographie du porteur, et d'autre part, d'avoir une méthode de synthèse d'image ("*processing*") susceptible de prendre en compte les perturbations de la trajectoire par rapport à sa trace nominale.

Dans une première partie nous reposerons brièvement le concept d'antenne synthétique, suivie par un développement de l'utilisation de la fréquence Doppler dans le calcul de la résolution azimutale.

A2.1.1 Antenne synthétique

Comme il est mentionné au chapitre 2, l'utilisation du déplacement du satellite permet de mesurer et d'enregistrer l'amplitude et la phase du signal réfléchis par une même cible. Le résultat est équivalent à une antenne réseau linéaire pouvant être focalisée sur un point P donné si pour chacune des mesures réalisées, une correction de phase adéquate (pour que toute les mesures soient en phase) est réalisée permettant une intégration cohérente.

On montre dans le cas d'une antenne synthétique L d'un RSO, que la résolution angulaire synthétique dans le plan horizontal est donnée par :

$$\beta_{hs} \approx \frac{\lambda}{2L}$$
 (A 2-1)

où λ est la longueur d'onde.

La longueur maximale de l'antenne synthétique L_{max} est donnée par le déplacement maximal de la plate-forme pour lequel un même point P est éclairé. Cette longueur est donnée par :

$$L_{\max} \approx \beta_{hr} \cdot Rp \tag{A 2-2}$$

Il s'agit donc du produit de la distance cible-antenne (Rp) avec l'ouverture angulaire de l'antenne réelle de longueur $l(\beta_{hr})$ prenant la forme :

$$\beta_{hr} \approx \frac{\lambda}{l}$$
 (A 2-3)

A2.1.2 Calcul de la fréquence Doppler et de la résolution azimutale

La vitesse relative de déplacement entre la cible et le capteur entraîne une variation de la fréquence encore appelé effet Doppler. L'onde reçu présente donc une phase instantané du signal prenant pour valeur :

$$\varphi(t) = \omega t - \omega T = 2\pi f_0 t - 2k_0 Rp \tag{A 2-4}$$

avec ω la pulsation, T = 2Rp/c le temps mis par l'onde pour faire le trajet aller-retour entre le capteur et la cible (c étant la célérité de la lumière), f_0 est la fréquence porteuse et k_0 le nombre d'onde. A partir de l'équation (A 2-4), la fréquence instantanée prend alors la forme :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} = f_0 - \frac{k_0}{\pi} \frac{\partial Rp}{\partial t}$$

$$= f_0 - \frac{2}{\lambda} \frac{\partial Rp}{\partial t} = f_0 - f_D$$
(A 2-5)

où f_D est appelée la fréquence Doppler. La fréquence de l'onde reçue diffère de celle incidente, c'est l'effet Doppler. La plate-forme éclaire un point P durant un temps t à la vitesse v sur une distance vt. La distance radiale Rp entre la cible et le capteur varie sensiblement avec le temps selon :

$$Rp = \sqrt{R_0^2 + v^2 t^2} \approx R_0 \left(1 + \frac{v^2 t^2}{2R_0^2} \right) \approx R_0 + \frac{v^2 t^2}{2R_0} \quad car \ vt << R_0$$
(A 2-6)

 R_0 correspond à la distance radiale minimale à l'aplomd de la cible où t = 0. Par conséquent, en combinant les équations (A 2-5) et (A 2-6) la fréquence Doppler vaut :

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{\partial Rp}{\partial t} \approx -\left(\frac{2v^2}{\lambda R_0}\right) \cdot t \tag{A 2-7}$$

L'effet Doppler apparaît également comme une fonction linéaire du temps. Cette effet peut donc être utilisé pour une même cible selon un temps fonction de sa durée d'illumination par l'antenne. Cette durée utilisable T_u prend comme forme :

$$T_{\prime\prime} = \frac{\beta_{hr} \cdot R_0}{\nu} \approx \frac{\lambda \cdot R_0}{l \cdot \nu}$$
(A 2-8)

La largeur de la bande Doppler utilisable B_D est donc la combinaison des équations (A 2-7) et (A 2-8) donnant :

$$B_D \approx \left(\frac{2\nu^2}{\lambda \cdot R_0}\right) \cdot T_u \approx \frac{2\nu}{l} \tag{A 2-9}$$

La nouvelle résolution temporelle est donc, d'après ce qui précède :

$$\Delta \tau = \frac{1}{B_D} \approx \frac{l}{2\nu} \tag{A 2-10}$$

Il vient donc pour la résolution spatiale azimutale $v \Delta \tau$:

$$\delta_{ras} \approx \frac{l}{2}$$
 (A 2-11)

On retrouve le résultat donné au chapitre 2 §2.1.2 avec l'indépendance de la résolution spatiale azimutale d'une part à l'altitude ou la vitesse du capteur, et d'autre part, à la longueur d'onde. Paradoxalement, cette résolution est d'autant meilleure que la taille physique de l'antenne diminue, approchant des résolutions de l'ordre du mètre pour les RSO actuels. De plus, une analogie avec la compression d'impulsion utilisée en distance radiale fournie le même résultats à la constante 0,885 près.

A2.2 Correction géométrique et radiométrique des images RSO

Symposium international *CNES-IEEE* "Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les application terrestres", 10-13 Oct. 1995, Toulouse France, p 457-468.

RADIOMETRIC CORRECTION OF MULTI-CONFIGURATION SPACEBORNE SAR DATA OVER HILLY TERRAIN

Nicolas STUSSI*, André BEAUDOIN*, Thierry CASTEL*, Patrick GIGORD**

*Laboratoire Commun de Télédétection LCT Cemagref-ENGREF 500, rue J.F. Breton, 34093 Montpellier cedex 5, France Tel: (33) 67 54 87 54 / Fax: (33) 67 54 87 00 E-mail: stussi@teledetection.fr, beaudoin@teledetection.fr

**Institut Géographique National (IGN-Espace) Parc Technologique du Canal, 24 rue Hermès, 31527 Ramonville Saint Agne cedex Tél.: (33) 62 19 18 18 Fax: (33) 61 75 03 17

ABSTRACT - Use of SAR data with different frequencies, polarisations and acquisition geometries become more and more important for various SAR applications. But retrieval of bio- and geo-physical parameters requires radiometric and geometric corrections on SAR images acquired over montainous areas. Indeed, specific distorsions on such areas, due to SAR viewing geometry, affect backscatter response of radar signal, masking mostly useful information.

In order to remove these distorsions, a SAR post-processing chain has been developped, including radiometric and geometric corrections for SAR images acquired over hilly terrain. Firstly developed for ERS-1 images, this method has been extended to various spaceborne SAR sensors such as JERS-1, SIR-C and X-SAR. First results on radiometric corrections are presented for different spaceborne SAR sensors, for which visual and quantitative improvements are investigated.

A2.2.1 Introduction

Specific radiometric and geometric distorsions appear on SAR images acquired over mountainous terrain, which can highly affect backscatter radar signal. These topographic effects on SAR images have been already investigated [3]-[6], and many authors have pointed out the necessity of taking into account relief effects on SAR data, before any thematic applications. In order to remove these distorsions, different methods have been developed [3], [6]. We present below a SAR post-processing chain developed at LCT, allowing radiometric and geometric corrections on SAR data. Firstly developed for ERS-1 images [10], this method is extended to various spaceborne SAR sensors such as JERS-1, SIR-C and X-SAR. In the present study, we will focus investigations on radiometric corrections. For specific description of geometric corrections, refer to [9] for orthorectification process, and [12] and [14] for combination of ascending and descending passes. Visual and quantitative improvements are presented below for three sensors (ERS-1, JERS-1 and SIR-C) having specific and completely different acquisition parameters (pass, incidence angle, frequency, polarisation). Firstly, the simulation step for each sensor is exposed before pointing out on radiometric corrections for which two examples are presented. On the one hand, effect of radiometric corrections is presented for a given SAR sensor (SIR-C data). On the other hand, results obtained from combinaison of ERS-1, JERS-1 and SIR-C are exposed, that show the possibility to process multi-configuration spaceborne SAR data using this SAR post-processing chain.

A2.2.2 Methodology

A2.2.2.1 SAR post-processing chain

In order to remove radiometric and geometric distorsions affecting SAR images acquired over hilly terrain, a SAR post-processing chain has been developed (Fig. 1). This SAR postprocessing chain is devised in two parts.

On the one hand, **radiometric** corrections are performed on original SAR images to remove topographic effects using a simple image radiometric model derived from the integral form of the radar equation (for details, refer to [10]):

$$\bar{I} = K \ \beta^0 = K \ \sigma^0 \left(\theta_{loc}\right) \frac{A_{slope}}{A_{flat}} \tag{1}$$

where β° is the radar cross-section over hilly terrain and σ° is the backscattering coefficient to be restored. This equation points out the two topography-related quantities affecting backscattering coefficient on mountainous terrain, that is the variable ground scattering area A_{slope} and local incidence angle θ_{loc} . A first step of **simulations** is required to estimate these two quantities A_{slope} and θ_{loc} used for corrections. For that, the overall geometry of a SAR observing hilly terrain is reconstructed based on Digital Elevation Model (DEM) coupled to the SAR viewing geometry and orbit. Then, image simulations of ground area and local incidence angle are obtained in the original SAR image geometry using a raytracing technique. Finally, the radiometric corrections are applied using eq. 1: relief calibration is performed by normalizing the pixel image intensity by ground area A_{slope} , and an **angular correction** is applied using a semi-empirical model useful for vegetation covers, considering volume scattering.Filtering is realised as a final step for radiometric corrections using appropriate SAR filters in relation with desired thematic applications (temporal and spatial filters).



Figure 1: SAR post-processing chain

On the other hand, geometric corrections are performed before obtained the expected SAR backscatter map used for thematic application. These corrections include orthorectification process, which projects radiometrically-corrected images in map
projection such as Lambert III or UTM, and an optional combination processing using ascending and descending passes [12].

A2.2.2.2 SAR simulations

Simulations, based on Digital Elevation Model (DEM) and taking into account SAR acquisition parameters, are required to estimate ground scattering area A_{slope} and local incidence angle θ_{loc} for each SAR pixel.



Figure 2: SAR simulation geometry

SAR sensor orbit is synthesised using orbit parameters and sensor state-vectors (position, velocity and acceleration). Knowledge of SAR acquisition parameters allows the recreation of SAR acquisition geometry, in order to perform simulation in the same condition as those existing during SAR acquisition.

Simulation method is based on a ray-tracing method (Fig. 2). Each SAR pixel is synthetised as a 3D-section. Therefore, ground scattering area A_{slope} corresponds to the surface included in each SAR pixel, which is delimited by intersection between the 3D-section and DEM.

This surface is decomposed of a number of facet A_i depending on DEM grid size and terrain slope. Area of each facet A_i is computed and affected by a coefficient F_i corresponding to the portion of the facet included in SAR pixel, equal to one if entire facet is considered. Total area A_{slope} is obtained by discret summation of all facets included in SAR pixel (Fig. 2).

Local incidence angle θ_i is estimated for each facet, and affected by a coefficient F_i . For a SAR pixel, θ_{loc} is defined as the mean local incidence angle, considering all facets included in this SAR pixel.

$$A = \sum_{i=1,n} F_i A_i \qquad \text{with} \quad A_i = \frac{\Delta_r}{\cos(\theta_{r_i})} \frac{\Delta_a}{\cos(\theta_{a_i})}$$
(4)

$$\theta_{\text{loc}} = \frac{1}{\sum_{i=1,n} F_i} \sum_{i=1,n} F_i \theta_{\text{loc}_i} \quad \text{with} \quad \theta_{\text{loc}_i} = a \cos\left(\frac{tg\theta_{r_i} \sin\alpha + \cos\alpha}{\sqrt{tg^2\theta_{r_i} + tg^2\theta_{a_i} + 1}}\right)$$
(5)

where Δ_a , θ_{ai} and Δ_r , θ_{ri} are respectively DEM grid size and slopes for the *i*th facet in azimuth and range direction, α the SAR incidence angle.

This computation is repeated for each SAR pixels, to finally obtain simulations of ground scattering area and local incidence angle. Initially obtained in slant range projection, simulations are projected in ground range projection in relation with the corresponding SAR level product. Depending on SAR viewing geometry and range of terrain slope, simulation of shadow areas is also taken into account and is removed from ground scattering area simulation. Several added-product are generated in the same time given information on layover and ground range resolution.

These simulations, realised in SAR geometry (ground range projection in this case), can now be superimposed to the corresponding SAR image. This process could be realised using ground control points, for which exact positions on map and its correspondence on SAR image is known. In order to improve the matching accuracy from both images, other points can be manually selected. Finally, polynomial model of first order is computed, and transformation is applied on simulation which generally gives an accurate superimposition with rms. about 0.1-0.6 pixels.

A2.2.2.3 Radiometric corrections

A2.2.2.3.1 Relief calibration

Corresponding to the first step of radiometric correction, relief calibration is realised by normalising radar cross section (eq. 3) by the realistic ground scattering area A_{slope} obtained from simulation process.

$$\sigma^{o}(\theta_{\text{loc}}) = \frac{I}{K} \frac{A_{\text{flat}}}{A_{\text{slope}}}$$
(6)

To preserve radiometric properties for each SAR pixel, any process is performed before this correction. Then, a pixel per pixel correction is applied on intensity of each pixel.

Radiometric corrections are already realised on SAR data performing antenna gain pattern and ground scattering removal using flat earth [1]. Depending on SAR sensor, ground scattering correction for flat terrain is applied either using a reference SAR incidence angle at scene center (ERS-1 with α_{ref}), or with a variable SAR incidence angle along range direction (JERS-1, SIR-C/X-SAR). Considering the specific process already applied, it is then necessary to remove this term (via specific computation of A_{flat}), in order to perform correct relief calibration.

Image of backscattering coefficient $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ is finally obtained, inducing several dB of correction in relation with SAR incidence angle and terrain slope.

A2.2.2.3.2 Backscatter angular correction

Backscattering coefficient $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ still depends on local incidence angle. To remove **angular** effect on SAR image acquired over mountainous areas, backscatter angular correction can be applied on previous corrected image.

A simple semi-empiral model (eq. 6) is derived from the radiative transfer theory, for which some hypothesis are assumed: crown volume scattering consideration, azimuthal isotropy and vertical trees that assumes a constant radar incidence angle relative to tree structure [11]. This correction is realised using a **cosine law** as a function of local incidence angle, affected by a coefficient n:

$$\sigma^{\circ}(\theta_{loc}) = \sigma^{\circ}(0^{\circ}) \cos^{n}(\theta_{loc})$$
⁽⁷⁾

The term n should depend on SAR acquisition parameters (frequency, polarisation and incidence), and also on biophysical properties such as forest type, growth stage and height. Angular correction is performed relative to flat terrain. Then backscattering coefficient, corrected to angular effect, named σ°_{f} , is computed as presented below:

$$\sigma_{f}^{\circ} = \sigma_{0}^{\circ} \left(\theta_{loc}\right) \left(\frac{\cos\theta_{ref}}{\cos\theta_{loc}}\right)^{n}$$
(8)

where θ_{ref} is the local incidence angle for flat terrain. Value of n is determined empirically from $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ behaviour.

[11] describes in detail this semi-empirical model and shows that n value can be linked to bio-physical parameters as crown extinction coefficient K_e and path length L.

As presented before, specific corrections for each sensor are required to perform topographic effect removal. In the following, we will present results of these corrections on SAR images acquired over a forest test-site from various SAR sensors.

A2.2.3 Experimental data and results

A2.2.3.1 Test-site and ground truth

The test-site is situated in *Lozere departement*, in southern of Massif Central, France. Present studies are conducted on state forests and focused on biomass retrieval and forest type classification. Test-site is composed of large limestone plateaus cut by deep gorges named *Causses*, providing various topographic situations. Altitudes range from 600 to 1200 m with slopes up to 45°.

A DEM, with 50 m grid size generated from contour lines of 5m apart in mountainous terrain and 10m apart on valleys, is used in Lambert III projection. Grasslands are located on plateaus, crops and pasture in valleys. Forest covers are mainly composed of coniferous trees (spruce, Austrian and Scot pines), with Mende forest (fig. 6 and fig. 7) covering 5000 ha of Austrian pine plantations (from 0 to 140 year-old) with various topographic situations.

A2.2.4 SAR data

A set of SAR data from different spaceborne SAR sensors is available on this test-site (Table 1), providing a large field of investigations.

sensor	level	polarisation	inc. angle	pass,	nb. look	resolution/ pixel
	product		center	viewing dir.		spacing
ERS-1	PRI	C-VV	23°	descending,	3	25 m / 12.5 m
				right		
JERS-1	2.1	L-HH	39°	descending,	3	18 m / 12.5 m
				right		
SIR-C	MLC dual	L/C HH HV	55°	ascending,	7.8	25 m / 12.5 m
	pol	L/C VV HV		right		
X-SAR	MLD	X-VV	52°	ascending,	7	25 m / 12.5 m
				right		

Table 1: Available spaceborne SAR data on Lozere test-site

Each SAR sensor has it own SAR acquisition geometry offering a complete different results on each SAR image from the same area. All original SAR data used are originally in ground range projection.

A2.2.4.1 Results

As specified before, all radiometric corrections are performed before orthorectification process. Nevertheless, in order to superimpose and compare here visually the benefits of radiometric corrections, orthorectified SAR images are presented for each step of radiometric processing.

Figure (6a) and (7a) represent images without any radiometric corrections. A colorcomposition of three SIR-C channels (L-HV, L-HH, C-HV) shows clearly topographic effect (fig. 6a), providing bright patches on facing slopes, compared to opposed slopes. Limit of image (upper-left, S/O-N/E direction) corresponds to the near range of SIR-C image. Town of *Mende* is clearly visible at the north. Close to the near range, hilly forested area are composed of old pine stands, for which large range of backscatter responses is visible due to various topographic situations. Large plateau is located in the south, composed by young pine forests and old pine stands. A gorge in north-south direction (lower-right), with same stand forests on opposite slopes, offers unfortunately complete different backscatter response.

Figure (7a) represents color-composition obtained from three different sensors (ERS-1, JERS-1, SIR-C), that clearly points out the completely different distorsions affecting each SAR images due to their specific configuration. Red patches correspond to shadow areas for SIR-C and facing slopes for JERS-1, while bright green patches correspond to slopes facing SIR-C.

A2.2.4.1.1 Simulation

As presented before, simulations of ground scattering area (Fig.: 3a, 4a, 5a) and local incidence angle (Fig.: 3b, 4b, 5b) are performed from DEM and taking into account SAR acquisition parameters for each sensor. These images are projected in the specific ground range projection corresponding to each original SAR image. Due to the pass mode of SIR-C, facing slopes correspond to opposed slopes for ERS-1 and JERS-1, and conversely, providing **complete different simulation aspect**. Fine bright features correspond to slopes facing the radar offering high foreshortening and poor ground range resolution which can increase up to 200 m for ERS-1.



Figure 9: Histogram of local incidence angle





Histogram of ground scattering area (Fig. 8) clearly shows the difference on distribution of values for different sensors. Ground scattering area is ranged from 160 to 7900 m² for ERS-1 23°, from 160 to 4250 m² for JERS-1 39°, whereas A_{slope} is only ranged from 160 to 1450 m² for SIR-C 55°. Referring to simulation method used, minimal possible estimated value for ground scattering area is 12.5x12.5 m² corresponding to SAR pixel size. Layover affect ERS-1 23° image about few per cent whereas completely desappears for SIR-C 55°. On the contrary, shadows is clearly visible on SIR-C 55° simulation ($A_{slope}=0$, see fig. (3.a) at center), and obviously is taken into account on simulation, but almost inexistant for ERS-1. Local incidence angle (Fig. 9) is distributed between 0° and 90°, with a specific mean value for each sensor close to the corresponding SAR incidence angle.

A2.2.4.1.2 Relief calibration

Relief calibration factor mainly depends on SAR acquisition parameters and range of terrain slopes. Then, on the same test-site as presented here, many different ranges of relief calibration factor are found for SAR sensors used. Notice that ERS-1 SAR geometry provides highest distorsions clearly visible on facing slopes as bright and fine features due to important foreshortening. On the contrary, the high SAR incidence angle of SIR-C involves lower distorsions which points out a lower range of relief calibration factor.

Table 2 presents results of relief calibration extracted from ground scattering area simulations for each configuration. Extrema values are listed below, corresponding to calibration factors applied on steepest opposed and facing slopes.

On facing slopes, radiometry of pixels is decreased due to bad ground resolution (fig. 8a and 9b). On the contrary, radiometry is increased on opposed slopes. Relief induces up to 12.6 dB of variation for ERS-1, with a correction of -8.5 dB on steepest facing slopes, compared to SIR-C data for which relief induces only 5dB of variation.

SAR sensor	Inc. angle at scene center	Relief calibration factor (dB)			
	(deg.)	opposed slopes, up to	facing slopes, up to		
ERS-1	23	+ 4.1	- 8.5		
JERS-1	39	+ 2.0	- 6.7		
SIR-C	55	+ 0.9	- 4.1		

Table 2: range of relief calibration factor for various spaceborne SAR data on Lozere test-site.

A2.2.4.1.3 Backscatter angular correction

A simple semi-empirical model is derived from radiative transfer theory, which takes into account volume scattering. Forest stand limits at 1:10000 scale, acquired from ONF (Office National des Forêts), has been used, providing information on forest type and growth age on Mende test-site.

Forests are composed on 95 % of coniferous, mainly composed on Austrian (*Pinus nigra*) and Scot pine, and 5 % of deciduous. Seven age classes provide forest classification from 0 to 140 year-old.

For a given SAR configuration, σ° behaviour is analysed as a function of local incidence angle θ_{loc} (figure 10) for each age class. Notice that same behaviour is found for age classes and a given SAR configuration.

Coefficient n is determined using backscatter angular model (eq. 7) which provides the best fitting with the experimental data. Results shows that n value can be considered independent on forest age.

[11] describes in detail this semi-empirical model and shows that n value can be linked to bio-physical parameters as crown extinction coefficient K_e and path length L.



Figure 10: σ° behaviour for old pine forest, as a function of θ_{loc} , for various SAR configurations on Mende forest.

Thus, specific backscatter angular correction is applied for a given SAR configuration (Table 3).

SAR sensor	Polarisation -	n value	Angular correction factor (dB)		
	inc. angle		opposed slopes, up to	facing slopes, up to	
ERS-1	C - VV 23°	1.00	+ 2.05	- 0.34	
JERS-1	L-HH 39°	0.35	+ 0.92	- 0.38	
SIR-C	C - HV 55°	0.70	+ 3.63	- 1.58	
	C - HH 55°	0.85	+ 4.41	- 1.92	
	L - HV 55°	0.75	+ 3.89	- 1.70	
	L - HH 55°	idem	idem	idem	

Table 3: range of angular calibration factor for various spacerborne SAR data on Lozere test-site.

Figure 11 summarises improvement of radiometric corrections for each step process for a given age-class of old pine forests (130 year-old). Large range of β° (up to 15 dB for ERS-1, see fig. 11.a) is highly reduced to finally obtain backscatter response σ°_{f} mostly indepedent of local incidence angle.

Little variation of σ°_{f} for low θ_{loc} (for ERS-1 23°) is due to specular effect which cannot be corrected with angular model intended for volume scattering.



Figure 11: Backscattering behaviour as a function of local incidence angle for three different SAR sensors: ERS-1 (11a), JERS-1 (11b), SIR-C (11c). Improvement of radiometric correction for age class of 130 yearold of Austrian pine on *Mende* test-site. β° uncorrected backscatterring coefficient, $\sigma^{\circ}(\theta_{loc})$ backscattering coefficient with relief calibration, σ°_{f} backscatter coefficient with angular correction.

A2.2.5 Discussion

It is now possible to process various spaceborne SAR data (ERS-1/2, JERS-1, SIR-C/X-SAR), with their specific configuration, using the SAR post-processing chain developed at LCT.

A2.2.5.1 Simulation process

Results have shown that good performance of radiometric corrections can be obtained using this method. Nevertheless, benefits of such corrections highly depend on simulation accuracy, assumed by the DEM used and precision of SAR acquisition parameters. Therefore, DEM had to be chosen in relation with SAR pixel spacing and resolution, in order to determine the optimal DEM grid size.

To investigate performance of corrections, radiometric process has been tested from a 100m DEM. However, bad corrections have been obtained due to the large grid size of the DEM, providing under- or over-estimation of relief calibration coefficient for steep slopes.

On the whole, good results are obtained using DEM with grid size ranging from 20 to 50m for spaceborne SAR data with 12.5m of pixel spacing and resolution of about 25m. Nevertheless, DEM with very fine grid, ranging from 10m-20m, can be required for very steep mountainous terrain, but computation cost so increases dramatically.

As specified before, accurate parameters are required and highly depend on SAR sensor. However, notice that different qualities of orbit parameters are available in relation with the date of process (i.e.: ERS-1). Moreover, the availability of required parameters is not guaranty, and can also depend on processing center (PAF) for a given sensor, providing sometimes added-parameters to compute and estimate the expected values.

Concerning the processing of a set of SAR data, for a given frame/track, little variations of SAR viewing geometry always occur between two acquisitions, which involves nonnegligible changes on simulation. In order to avoid sub-optimal radiometric corrections, specific simulation had to be performed for each SAR image (frame, track, orbit), that is highly recommended for multi-temporal analysis. On the contrary, significant advantages is assumed for a SAR sensor using different bands and polarisations, for which only one set of simulations is required to process the different SAR channels (SIR-C dual/quad pol), providing reduction of computation time and cost.

Concerning the precision of matching between SAR image and simulation, rms. error of 0.1-0.6 pixels are assumed with this method depending on SAR sensor used. The best matching is performed using ground control points (cross-road, bridge, point targets). Nevertheless, it can be difficult to retrieve its, and sometimes are unfortunately not always available.

Comparaison of this simulation process with an other existing method [3] and [6] shows an improvement of ground scattering area estimation for slopes facing the radar, which increases with the precision of the DEM.

A2.2.5.2 Radiometric corrections

Relief calibration highly depends on SAR incidence angle and range of terrain slopes, providing important corrections (up to 10 dB) for low incidence angle (ERS-1 23°). Results of this study underline that an optimal SAR configuration is obtained with SAR incidence angle around 40°, providing a compromise between radiometric distorsions due to topographic effects and lost of SAR information in shadow areas.

Angular correction process assumes some hypothesis on scattering mechanisms, and is only performed, for the moment, taking into account volume scattering. Thus, it requires some knowledge about surface caracteristics, that is not always available. Nevertheless, impact is less important (1-4 dB) compared to relief calibration.

Radiometric improvement is now effective using this method. Nevertheless, orthorectification process applied on previous images induces stretching effect on slopes

facing the radar, which becomes important for low SAR incidence angle. An optional step of geometric correction, consisting on a combination between images acquired during ascending and descending passes, can be applied providing improvement of resolution. For more details, see [12].

Therefore, as a final step, classical filtering can be performed in relation with the expected result required for thematic application.

A2.2.6 Conclusion and future works

This actual post-processing chain provides radiometric et geometric corrections for mainly spaceborne SAR sensor such as ERS-1/2, JERS-1, SIR-C/X-SAR. Moreover, it could easily be extended to Radarsat images.

Furthermore, this method could be adapted to airborne SAR data (E-SAR, AIRSAR). Nevertheless, flightpath of the aircraft had to be synthesised with a good precision, taking into account possible variations of flight during SAR acquisition. Thus, it will require accurate flight parameters, and obviously a DEM with a good precision in regards with SAR resolution.

A quantitative assessment for backscatter angular correction had to be investigated furthermore to link the semi-empirical model to bio-physical parameters using theoretical modelling [11]. In order to assume an angular correction over heterogeneous site, it would be necessary to provide angular correction for other scattering mechanisms (trunk-ground, ground).

Assessment for various spaceborne SAR application are now under investigation. Thus, SAR classification will be investigated soon. Nevertheless, first results are already obtained on biomass estimation with different spaceborne SAR data, providing good relationship between σ° and biomass over mountainous areas [11].

Finally, the extension of the post-processing methodology to various spaceborne SAR data now provides a large field of investigation, with the possibility to retrieve, combine and compare SAR backscatter information with different incidences, frequencies and polarisations, taking into account specificities and advantages of the different SAR sensors.

A2.2.7 Bibliography

[1] Freeman, A. 1992, "SAR calibration: An overview", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No.6, pp. 1107-1121.

[2] Laur, H., P. Meadows, J.J. Sanchez and E. Dwyer 1993, "ERS-1 SAR radiometric calibration", CEOS Calibration Workshop, ESA/ESTEC, October 93.

[3] Holecz,F., E. Meier and D. Nüesh,1993, "Post-processing of relief induced radiometric distorted spaceborne SAR imagery", Ch.14 in *SAR Geocoding: data and systems*, Gunter Shreier Editor, pp. 298-352, 1993.

[4] Holecz, F., Meier, E., Piersbergen, J., and Nüesch, D., "Topographic effects on radar cross section", 23-28.

[5] Van Zyl, J. J., 1993, "The effect of topography on radar scattering from vegetated areas", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 31, No. 1, 153-160.

[6] Van Zyl, J.J., B.D. Chapman, P. Dubois and J. Shi, 1993, The effect of topography on SAR calibration, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No.5, Sept. 1993, pp.1036-1043.

[7] Rignot, E. and J.J Van Zyl 1993, "Change detection techniques for ERS-1 SAR data", *IEEE Trans.* on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No.4, July 1993, pp. 896-906.

[8] Guindon, B., 1990, "Development of a shape-from-shading technique for the extraction of topographic models from individual spaceborne SAR images", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, 654-661.

[9] Guindon, B., and Adair, M., 1992, "Analytic formulation of spaceborne SAR image geocoding and value-added product generation procedures using digital elevation data", *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 1, 2-12.

[10] Beaudoin A., M. Deshayes, L. Piet, N. Stussi and T. Le Toan, 1994, "Retrieval and analysis of temperate forest backscatter signatures from multitemporal ERS-1 data acquired over hilly terrain", *1st Symposium on ERS-1 Pilot Projects*, Toledo, Spain, 23-25 June 1994, pp.283-289.

[11] Beaudoin A., T. Castel, M. Deshayes, N. Stussi, N. Stach and T. Le Toan, "Biomass retrieval over hilly terrain from spaceborne SAR data", *CNES / IEEE international symposium, Retrieval of bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications, Toulouse, France, 10-13 october 1995.*

[12] Stussi N., Beaudoin A., "Combining ascending / descending ERS-1 SAR data towards quantitative use of backscatter information over hilly terrain", *CNES / IEEE international symposium, Retrieval of bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications,* Toulouse, France, 10-13 october 1995.

[13] Luckman, A.J. and J.R. Baker, 1994, "The effect of topography on radar scattering mechanisms from coniferous forest and upland pasture", *Proceedings of the MAC-Europe Final results workshop*, Lenggris, Germany, 4-6 Oct.; pp. 179-186.

[14] Small D., F. Holecz and D. Nüesch, "Combination of ascending / descending ERS-1 INSAR data for calibration and validation", *Proceedings of IGARSS'95*, Florence, Italy, July 10-14 1995, pp. 553-555.



A3.1 Synthèse des expérimentations de terrain	3-1
A3.2 Résultats botaniques expérimentaux complémentaires	3-2
A3.2.1 Exemple de codage type-graphe utilisé	3-2
A3.2.2 Résultats obtenus sur les fûts d'arbres de 20 ans	3-3
A3.2.3 Synthèse des résultats pour les pins noirs de 20 ans	3-3
A3.3 Fiches de relevés terrain	3-5
A3.3.1 Fiche des mesures dendrométriques pour jeunes peuplements	3-5
A3.3.2 Fiche des mesures de biomasse	3-5
A3.4 Erreurs relatives pour les différentes unités échantillonn	ées3-6

A3.1 Synthèse des expérimentations de terrain

Le tableau suivant résume l'ensemble des campagnes réalisées dans le cadre de ce travail de thèse sur notre site d'étude, récapitulant les campagnes de terrain réalisées entre 1994 et 1996

		Mesures	Mesures de	Mosuros
Dates	Personnes	dendrométriques	hiomosso	hotoniques
Dates		dendrometriques	Diomasse	botamques pour
	Impliquees	classiques	compartimentee et	AMAP
			de teneur en eau	
	T. Castel*,		Teneur en eau :	
	A. Beaudoin*,			-
6/10/94 au	M. Deshayes*,		fûts,	
10/10/94	L. Albrech*		branches,	
	P. Truong*		aiguilles	
	+ 2 stagiaires**			
	T. Castel*	hauteur (m),		
	N. Stach*	dbh (m),		
7/08/95 au	M. Lamic**	épaisseur houppier,		
31/08/95	Mr Alex**	densité/ha,		
		volume fûts /ha		
		(48 parcelles)		
	T. Castel*			longueur des UC,
	N. Stach*			diamètre des UC,
14/11/95 au	Y. Caraglio***			mesures
16/11/95	D. Barthélémy***			architecturales,
				branchaison,
				ramification
				(parcelle 10 ans)
	T. Castel*	hauteur ,		longueur, diamètre
	N. Stach*	dbh,		des UC,
06/05/96 au	E. Munshinzimana*	épaisseur houppier,		mesures
13/05/96	E. Pagezi**	volume/ha,		architecturales
		densité/ha		branchaison,
		(10 parcelles)		ramification
				(parcelle 10 ans)
	T. Castel*		biomasse (kg) et teneur	longueur, diamètre,
	N. Stach*		en eau :	des UC
14/10/96 au	E. Munshinzimana*		fûts,	mesures
30/10/96	Y. Caraglio***		branches,	architecturales
	D. Barthélémy***		aiguilles	branchaison,
	A. Demers***		mesures de LAI	ramification
	N. Marcassus**		(parcelles de 10, 20, 40	
			ans)	(parcelles de
				20 et 40 ans)
Totaux	≈180 jours/ homme	58 parcelles	3 parcelles :	3 parcelles
		≈ 15000 arbres	23 arbres	$\approx 130 \text{ arbres}$

* LCT, ** ONF, *** CIRAD-AMIS

A3.2 Résultats botaniques expérimentaux complémentaires

A3.2.1 Exemple de codage type-graphe utilisé



Figure 3-1 : Exemple d'un codage type-graphe mis en œuvre dans le cadre de l'approche botanique.

Grâce à ce codage, il est plus aisé de replacer n'importe qu'elle unité de croissance dans la structure topologique de l'arbre. De plus, ce codage est lu automatiquement part le logiciel AMAPmod, permettant d'alléger, entre autre, l'analyse des résultats servant au paramétrage du moteur de croissance.



A3.2.2 Résultats obtenus sur les fûts d'arbres de 20 ans

Figure 3-2 : Histogrammes d'élongation (colonne A) et de ramification (colonne B) obtenus pour lesUC du tronc des pins de 20 ans calculés sur une échantillons de 30 arbres.

La compilation de ces résultats est très utile d'une part dans l'analyse qualitative en particulier des phénomènes de bases et de dérives s'exprimant le long du gradient morphogénétique de la vie de l'arbre. D'autre part d'un point de vue quantitatif au travers des distributions et de leurs caractéristiques ajustables par des lois de probabilités.

Ce même type de graphe peut également être obtenu pour les différents ordres de branches échantillonnés. Au total, l'ensemble des résultats peuvent être repris dans des graphe synthétisant les résultats récoltés pour les pins de 20 ans. Un exemple est donné au paragraphe suivant.

A3.2.3 Synthèse des résultats pour les pins noirs de 20 ans

La Figure 3-3 récapitule le comportement général des pins noir de 20 ans présent sur le site d'étude.



Figure 3-3 : Schéma synthétisant la longueur des unités de croissance, le pourcentage de ramification et l'effectif en fonction de la position topologique. La longueur associée à chaque bâtonnet est proportionnelle à la longueur moyenne des UC. En A, le niveau de gris est associé au pourcentage de ramification des unités appartenant au même niveau topologique. La partir B représente le pourcentage de croissance des UC en fonction de leur position topologique.

A3.3 Fiches de relevés terrain

A3.3.1 Fiche des mesures dendrométriques pour jeunes peuplements

Forêt	1 🕞
JUICE	
Série	
Parcelle	
Unité	
Placette	

	Mine Dian
Rayon	
Orientation	
Pente	
Heure	
Date	

ESSENCE	CIRCONF BASE	CIRCONF MIL	HAUTEUR	AGE
	·······			
······				

Homogénéité	
Rugosité	
Affleurements	
Observations	

A3.3.2 Fiche des mesures de biomasse

Arbre	n°	longueur	n° parc	elle
	d base		orientat	tion
	dhp		pente	e
	d mi-ha	uteur		

Tronc A1	nbr br1/		Br1		Br2	Br3	Br3 Br4	Aiguilles
	verticille	d base	longueur	poids				
							·	

	Unités de la forêt domaniale de Mende								
Unités	Age (ans)	Densité	Surface terrière (g) m ² /ha	Hauteur (m)	Houppier(m)				
2	6	11,2	27,85	11,03	9,8				
19	8	60	27,26	12,6	12,6				
18	10	29	27,76	12,2	12,1				
8	14	18,5	18,12	5,8	5,9				
9	15	16,6	14,17	8,4	8,5				
16	15	19	21,11	6,2	6,2				
7	16	7,7	6,27	5,8	5,9				
71	16	11	18,4	14	14				
10	17	6	18,9	7,6	8,2				
15	17	9,3	8,2	6,4	5,2				
81	17	16,3	21,2	18,2	16				
52	30	11	10,6	3,1	7,1				
1	31	11	8,8	5,3	13,7				
4	34	11,3	12,2	5,3	7,3				
13	35	13,5	12,1	6,5	9,8				
3	36	14,9	15,2	7	10,2				
11	39	20	17,4	5,3	8,9				
12	45	13	16,1	4,5	6,6				
64	70	20,3	17,5	7,6	13,7				
65	70	8,9	7,5	11,2	18				
67	70	18,9	21,2	11	14,7				
69	75	27	18,7	11	14				
80	75	8	13,5	7,65	13,4				
63	80	12,4	10,8	7,4	18				
60	85	16	14	9,7	13,9				
61	85	16,2	11,3	8,4	16				
62	85	17,5	11,2	12,9	18,2				
78	85	23,3	15,7	8	20				
53	90	17,7	16,2	3,8	8,6				
51	100	15,5	11,1	3,85	11,7				
			Unités du Causse Méjean						
3	17	7,9	14,5	9,2	8				
6	22	16,7	12,1	4,1	9,7				
12	22	11	20,9	8,64	6,4				
19	22	15,1	19,8	8,83	10,8				
5	23	9,3	15,9	7,8	11,2				
1	24	17,5	15,5	6,9	9,1				
7	24	10,8	11,6	3,8	7,9				
9	24	12,4	13,2	7,6	9,2				
4	25	11,9	14	6	11,3				
11	25	13	16,6	7	9,4				
20	25	13,3	13,5	5,4	11,2				
24	25	11,4	16,6	6,9	14				
25	25	15,3	21,1	8,3	10,9				
26	25	16,9	18	7,5	9,5				
2	26	10	10,4	5	8,7				
8	26	17,7	15	5,8	14,5				
18	27	9,9	15,5	9,1	10,8				
22	27	11,5	13,7	6,4	7				
13	28	13,2	17	8,2	12,5				
14	28	14,5	22,9	7,3	16,1				
17	28	11,6	12,9	5,7	7,1				
21	28	15,6	17,3	5	6,7				
23	28	10,5	15,3	5,4	5,4				
27	28	15	9,9	6,6	7,6				
28	29	10,5	13,1	4,1	10				
10	30	1515,6	10	4,0	12,4				
10	52	29,3	23,9	0,4	13,8				
10	50	20	20,4	3,8	/,9				

A3.4 Erreurs relatives pour les différentes unités échantillonnées

A5.1 Détails sur le calcul des caractéristiques des cylindres équivalents de branches 5-1 A5.1.1 Longueur 5-2 A5.1.2 Diamètre 5-2 A5.1.3 Angle d'insertion absolu 5-2 A5.1.4 Angle d'insertion relatif 5-2 A5.1.5 Indice de courbure 5-2

A5.1 Détails sur le calcul des caractéristiques des cylindres équivalents de branches



Schématisation du calcul des cylindres équivalents de branches

Chaque cylindre élémentaire d'une branche simulée est repéré dans l'espace par ses 6 coordonnées cartésiennes $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ de sa base et $(x_{max}, y_{max}, z_{max})$ de son sommet.

A5.1.1 Longueur

$$l = \sum_{i=1}^{n} l_i$$

A5.1.2 Diamètre

$$d=\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{n}l_{i}d_{i}$$

où n est le nombre total de cylindres servant à modéliser la branche.

A5.1.3 Angle d'insertion absolu

$$\beta_{a} = A\cos(\beta_{a}) \quad avec \quad \cos\beta_{a} = \frac{(y_{i=n}^{\max} - y_{i=1}^{\min})}{\sqrt{(x_{i=n}^{\max} - x_{i=1}^{\min})^{2} + (y_{i=n}^{\max} - y_{i=1}^{\min})^{2} + (z_{i=n}^{\max} - z_{i=1}^{\min})}}$$

A5.1.4 Angle d'insertion relatif

$$\beta_{r} = A\cos\beta_{r}$$

$$avec$$

$$\cos\beta_{r} = \frac{\vec{V}_{porteur} \cdot \vec{V}_{port\acute{e}}}{\left|\vec{V}_{port\acute{e}ur}\right| \left|\vec{V}_{port\acute{e}}\right|}$$

$$\cos\beta_{r} = \frac{(x_{i=n}^{\max} - x_{i=1}^{\min})_{porteur} \times (x_{i=n}^{\max} - x_{i=1}^{\min})_{porti} + (y_{i=n}^{\max} - y_{i=1}^{\min})_{porteur} \times (y_{i=n}^{\max} - y_{i=1}^{\min})_{porti} + (z_{i=n}^{\max} - z_{i=1}^{\min})_{porteur} \times (z_{i=n}^{\max} - z_{i=1}^{\min})_{porteur}}{\sqrt{[(x_{i=n}^{\max} - x_{i=1}^{\min})^{2} + (y_{i=n}^{\max} - y_{i=1}^{\min})^{2} + (z_{i=n}^{\max} - z_{i=1}^{\min})]_{porteur}}} \times \sqrt{[(x_{i=n}^{\max} - x_{i=1}^{\min})^{2} + (y_{i=n}^{\max} - z_{i=1}^{\min})]_{porteur}}}$$

où | | désigne la norme du vecteur

A5.1.5 Indice de courbure

$$I_{c} = \frac{l_{k} - \left| \vec{V}_{k} \right|}{l_{k}}$$

 \boldsymbol{k} est l'indice de la branche sur laquelle est effectué le calcul.



A6.1 Description détaillée du modèle VRT du MIT/CESBIO	6-1
A6.1.1 Introduction	6-1
A6.1.2 Radiative transfer model of forest	6-2
A6.1.2.1 First order iterative solution	6-4
A6.1.2.2 Second order solution with long cylinder approximation	6-12
A6.1.2.3 Scattering by circular cylinder	6-14
A6.1.2.4 Kirchhoff's approximation	6-16
A6.2 Calcul de la constante diélectrique	6-18
A6.2.1 Expression de la constante diélectrique de la végétation (Ulaby	and El-
Rayes 1987)	6-18
A6.2.2 Expression de la constante diélectrique du sol (Hallikainen et a	1. 1985)6-18
A6.3 Angle d'incidence local théorique	6-20

A6.1 Description détaillée du modèle VRT du MIT/CESBIO

A6.1.1 Introduction

Cette partie vise à présenter le formalisme du modèle de transfert radiatif développé par le MIT et modifié par le CESBIO. L'ensemble du texte provient du deuxième chapitre de la thèse de doctorat du Dr. C.-C. Hsu (Hsu 1996).

Dans un premier temps sont présentées l'équation générale vectorielle du transfert radiatif accompagnée ensuite par l'explicitation des conditions aux limites dans le cas d'un milieu à n couches (forêt) disposé sur une surface rugueuse (sol). Ces aspects sont repris dans le corps de thèse au chapitre 6. Sont également introduites dans cette partie, les matrices d'extinction et de phase.

Dans un deuxième temps, La solution itérative du premier ordre est détaillé, par la description du vecteur de Stokes descendant et ascendant dans chaque couche pour aboutir finalement à la description du vecteur de Stokes rétrodiffusé. Celui ci est décomposé en la somme des différents mécanismes de rétrodiffusion pris en compte soit un total de 4 : la diffusion de volume suivi d'un deuxième et troisième terme correspondant à l'interaction sol-volume, alors que le dernier terme décrit le mécanisme surface-volume-surface. La solution pour le deuxième ordre est ensuite succinctement présentée dans le cas de l'approximation de cylindre de longueur infini.

Enfin, les deux dernières parties appelées respectivement Appendix A et C dans le texte, présentent le calcul de la diffusion électromagnétique par un cylindre et l'approximation de Kirchhoff utilisée dans le cas du sol.

La version multicouche du modèle modifiée par le CESBIO, et appliquée sur la forêt de notre site d'étude est quant à elle présentée dans l'article de (Floury et al. 1998).

Hsu, C. C. (1996). "Theoretical models for microwave remote sensing of forests and vegetation," Doctor of philosophy, MIT, Boston., 191p.

Floury, N., Le Toan, T., Kong, J. A., Castel, T., Beaudoin, A., and Barczi, J. F. (1998). "Coupling backscatter models with a generic architectural tree growth model. II: VRT modelling of forest backscatter." soumis à IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.

A6.1.2 Radiative transfer model of forest

A forest canopy is modeled as a multi-layered random medium depicted in Figure 1(a). The scattering regions n are layers of thickness h_n , n=1,2,3, within each region the discrete scatterers are embedded in a homogeneous background. The interface between region 4 and region t can be either a planar surface or a random rough surface with or without slope. The random rough surface is described by a Gaussian random process in height and correlation.

The vector radiative transfer equation for the specific intensity in each scattering region is of the form

$$\cos\theta \frac{dI(\theta,\phi,z)}{dz} = -\overline{\kappa}_{e}(\theta,\phi,z) \cdot \overline{I}(\theta,\phi,z) + \int_{4\pi} d\Omega' \overline{\overline{P}}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{I}(\theta',\phi',z)$$
(1)

where the Stokes vector \overline{I} contains information regarding the field intensity and the phase relation of the two orthogonal polarizations and is defined as

$$\overline{I} = \begin{pmatrix} I_h \\ I_v \\ U \\ V \end{pmatrix} = \frac{1}{\eta} \begin{pmatrix} \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle |E_v|^2 \rangle \\ 2 \operatorname{Re} \langle E_v E_h^* \rangle \\ 2 \operatorname{Im} \langle E_v E_h^* \rangle \end{pmatrix}$$
(2)

In (2), the subscripts h and v represent the horizontal and vertical polarizations, respectively. The bracket $\langle \rangle$ denotes ensemble average over the size and orientation distributions of scatterers and $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ is the free-space impedance.

The extinction matrix $\overline{\overline{\kappa}}_e$ represents the attenuation caused by both the scattering and absorption, and can be obtained through the optical theorem in terms of

forward scattering functions [Tsang et al., 1985]. It is given as

$$\overline{\overline{\kappa}}_{e}(\theta,\phi) = \frac{2\pi n_{0}}{k} \begin{pmatrix} 2Im\langle f_{hh} \rangle & 0 & Im\langle f_{hv} \rangle & Re\langle f_{hv} \rangle \\ 0 & 2Im\langle f_{vv} \rangle & Im\langle f_{vh} \rangle & -Re\langle f_{vh} \rangle \\ 2Im\langle f_{vh} \rangle & 2Im\langle f_{hv} \rangle & Im\langle f_{vv}+f_{hh} \rangle & Re\langle f_{vv}-f_{hh} \rangle \\ -2Re\langle f_{vh} \rangle & 2Re\langle f_{hv} \rangle & Re\langle f_{vv}-f_{hh} \rangle & Im\langle f_{vv}+f_{hh} \rangle \end{pmatrix}$$
(3)

The phase matrix $\overline{P}(\theta, \phi; \theta', \phi')$ characterizes the scattering of the Stokes vector from the (θ', ϕ') direction into the (θ, ϕ) direction. The phase matrix can be formulated in terms of scattering functions of the randomly distributed discrete scatterers, and it has the following form

$$\overline{P}(\theta, \phi, \theta', \phi') = n_{0}
\begin{pmatrix} \langle |f_{hh}|^{2} \rangle & \langle |f_{hv}|^{2} \rangle & Re\langle f_{hv}f_{hh}^{*} \rangle & -Im\langle f_{hv}f_{hh}^{*} \rangle \\ \langle |f_{vh}|^{2} \rangle & \langle |f_{vv}|^{2} \rangle & Re\langle f_{vv}f_{vh}^{*} \rangle & -Im\langle f_{vv}f_{vh}^{*} \rangle \\ 2Re\langle f_{vh}f_{hh}^{*} \rangle & 2Re\langle f_{vv}f_{hv}^{*} \rangle & Re\langle f_{vv}f_{hh}^{*} + f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle & -Im\langle f_{vv}f_{vh}^{*} - f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle \\ 2Im\langle f_{vh}f_{hh}^{*} \rangle & 2Im\langle f_{vv}f_{hv}^{*} \rangle & Im\langle f_{vv}f_{hh}^{*} + f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle & Re\langle f_{vv}f_{hh}^{*} - f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle \end{pmatrix}$$

$$(4)$$

In equations (3) and (4), n_0 is number density of scatterers, f_{ab} is the scattering function for the incident field with polarization b and the scattered field with polarization a, a, b can be horizontal or vertical polarization.

Considering a plane wave incident on a particle, scattering matrix associated with scatterer is defined as

$$\begin{pmatrix} E_{hs} \\ E_{vs} \end{pmatrix} = \frac{e^{ikr}}{r} \begin{pmatrix} f_{hh} & f_{hv} \\ f_{vh} & f_{vv} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{hi} \\ E_{vi} \end{pmatrix}$$
(5)

which relates the incident electric field to the scattered electric field for horizontal and vertical polarizations. The scattering matrices obtained from the finite cylinder approximation for circular cylinder and from the physical optics approximation for elliptical disk, are given in the Appendix A and B, respectively.

Since the effective permittivity of each vegetation layer is very close to that of free space, reflection between different vegetation layers is neglected except the reflection at the ground boundary. The radiative transfer equations with the boundary

conditions can be solved using the iterative method to calculate the polarimetric backscattering coefficients [Tsang et al., 1985]. First, we let the specific intensity of the downgoing wave to be the same as the incident wave and ignore the reflections at the interface between regions n and n-1. This is a good approximation for a vegetation layer where the effective permittivity is very close to that of the air and there is no coupling between upgoing and downgoing intensities at interface between layers. At the bottom boundary ($z = -d_N$), the coupling matrix is evaluated using the Fresnel reflection coefficients for flat ground or the Kirchhoff diffraction integral for the random rough surface. Hence the boundary conditions can be written as

$$\overline{I}_{1}(\pi - \theta, \phi, z = 0) = \overline{I}_{0}\delta(\cos\theta - \cos\theta_{0})\delta(\phi - \phi_{0})$$

$$\overline{I}_{N}(\theta, \phi, z = -d) = \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin\theta' \overline{\overline{R}}_{N}(\theta, \phi; \theta', \phi') \cdot \overline{I}_{N}(\pi - \theta', \phi', z = -d_{N})$$

$$\overline{I}_{n}(\theta, \phi, z = -d_{n}) = \overline{I}_{n+1}(\theta, \phi, z = -d_{n})$$

$$\overline{I}_{n}(\pi - \theta, \phi, z = -d_{n-1}) = \overline{I}_{n-1}(\pi - \theta, \phi, z = -d_{n-1})$$
(6)

where n = 2, 3, 4, ..., N - 1 and the coupling matrix \overline{R}_N which includes incoherent and coherent rough surface scattering using Kirchhoff's approximation is described in Appendix C.

The iterative solution to the RT equation is obtained by assuming that the scattering effect is smaller than the extinction, i.e., for a layered medium with small albedo or small optical thickness, we can solve the radiative transfer equations iteratively. As the first term on the right-hand side of (1) is the dominant term, the zeroth-order solution is obtained by ignoring the second term on the right hand side which is the scattering contribution from other directions. By substituting the zerothorder solution of the specific intensity into the integral part of the RT equation, we obtain the first-order solution. Hence, higher order solutions can be readily obtained by following this scheme.

A6.1.2.1 First order iterative solution

Let the upgoing and downgoing waves be separated by restricting $0 < \theta < \pi/2$, this leads to the following two coupled equations

$$\cos\theta \frac{d}{dz} \overline{I}_n(\theta,\phi,z) = -\overline{\overline{K}}_e(\theta,\phi) \cdot \overline{I}_n(\theta,\phi,z) + \overline{S}_n(\theta,\phi,z)$$
(7a)

$$-\cos\theta \frac{d}{dz}\overline{I}_n(\pi-\theta,\phi,z) = -\overline{\overline{K}}_e(\pi-\theta,\phi)\cdot\overline{I}_n(\pi-\theta,\phi,z) + \overline{W}_n(\pi-\theta,\phi,z) \quad (7b)$$

where $\overline{I}_n(\theta, \phi, z)$ and $\overline{I}_n(\pi - \theta, \phi, z)$ are the upgoing and the downgoing specific intensities in the *n*-th layer. The two source terms $\overline{S}_n(\theta, \phi, z)$ and $\overline{W}_n(\pi - \theta, \phi, z)$ account for the scattering effects and hence include the coupling of specific intensities between the upgoing and the downgoing waves.

$$\overline{S}_{n}(\theta,\phi,z) = \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin\theta' [\overline{\overline{P}}_{n}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{I}_{n}(\theta',\phi',z) + \overline{\overline{P}}_{n}(\theta,\phi;\pi-\theta',\phi') \cdot \overline{I}_{n}(\pi-\theta',\phi',z)]$$

$$\overline{W}_{n}(\pi-\theta,\phi,z) = \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin\theta' [\overline{\overline{P}}_{n}(\pi-\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{I}_{n}(\theta',\phi',z) + \overline{\overline{P}}_{n}(\pi-\theta,\phi;\pi-\theta',\phi') \cdot \overline{I}_{n}(\pi-\theta',\phi',z)]$$

$$(8a)$$

$$\overline{W}_{n}(\pi-\theta,\phi,z) = \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin\theta' [\overline{\overline{P}}_{n}(\pi-\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{I}_{n}(\theta',\phi',z)]$$

$$(8b)$$

The zeroth-order equations as obtained by neglecting the source terms in equation (7),

$$\cos\theta \frac{d}{dz} \overline{I}_n^{(0)}(\theta,\phi,z) = -\overline{\overline{K}}_e(\theta,\phi) \cdot \overline{I}_n^{(0)}(\theta,\phi,z)$$
(9a)

$$-\cos\theta \frac{d}{dz}\overline{I}_{n}^{(0)}(\pi-\theta,\phi,z) = -\overline{\overline{K}}_{e}(\pi-\theta,\phi)\cdot\overline{I}_{n}^{(0)}(\pi-\theta,\phi,z)$$
(9b)

Equations (9) are in the form of typical eigenvalue problems. Assuming the solution is of the form $\exp(-\beta \sec \theta z)$, the four eigenvalues can be obtained as

$$\beta_{1} = 2Im(K_{1})$$

$$\beta_{2} = 2Im(K_{2})$$

$$\beta_{3} = i(K_{2}^{*} - K_{1})$$

$$\beta_{4} = i(K_{1}^{*} - K_{2})$$
(10)

where K_1 and K_2 are the two effective propagation constants

$$K_{1} = k + \frac{n_{0}\pi}{k} [\langle f_{vv}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle + \langle f_{hh}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle - R]$$

$$K_{2} = k + \frac{n_{0}\pi}{k} [\langle f_{vv}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle + \langle f_{hh}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle + R]$$
(11)

and

$$R = \sqrt{[\langle f_{vv}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle - \langle f_{hh}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle]^2 + 4 \langle f_{hv}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle \langle f_{vh}(\theta,\phi;\theta,\phi) \rangle}$$
(12)

under the condition

$$sgnRe(R) = sgn[< f_{vv} - f_{hh} >]$$
⁽¹³⁾

such that K_1 and K_2 will approach the effective propagation constants for the horizontally and vertically polarized waves, respectively, in the limit of small cross-polarization coupling.
We define a 4×4 "eigenmatrix" $\overline{\overline{E}}_n$ with its columns being the four eigenvectors corresponding to the four eigenvalues given in (11). Then this eigenmatrix satisfies

$$\overline{\overline{E}}_n \cdot \overline{\overline{\beta}}_n = \overline{\overline{K}}_e \cdot \overline{\overline{E}}_n \tag{14}$$

where $\overline{\overline{\beta}}_n$ is a 4 × 4 diagonal matrix with the eigenvalues β_i as its *i*-th diagonal element. The eigenmatrix can be expressed as follows

$$\overline{\overline{E}}(\theta,\phi) = \begin{pmatrix} 1 & |b_2|^2 & b_2 & b_2^* \\ |b_1|^2 & 1 & b_1^* & b_1 \\ 2Reb_1 & 2Reb_2 & 1+b_1^*b_2 & 1+b_1b_2^* \\ -2Imb_1 & 2Imb_2 & i(1-b_1^*b_2) & -i(1-b_1b_2^*) \end{pmatrix}$$
(15)

where

$$b_{1} = \frac{2n_{0} < f_{hv}(\theta, \phi; \theta, \phi) >}{n_{0} < f_{vv}(\theta, \phi; \theta, \phi) > -n_{0} < f_{hh}(\theta, \phi; \theta, \phi) > +R}$$

$$b_{2} = \frac{2n_{0} < f_{vh}(\theta, \phi; \theta, \phi) >}{n_{0} < f_{hh}(\theta, \phi; \theta, \phi) > -n_{0} < f_{vv}(\theta, \phi; \theta, \phi) > -R}$$
(16)

To solve the coupled equation (7), the specific intensity is decomposed into its characteristic components, i.e., the eigenvectors, by defining $\overline{I}_n = \overline{\overline{E}}_n \cdot \overline{J}_n$. Then the radiative transfer equation for the upgoing wave (7) becomes

$$\cos\theta \frac{d}{dz} \overline{J}_n(\theta, \phi, z) = -\overline{\overline{E}}_n^{-1}(\theta, \phi) \overline{\overline{K}}_e(\theta, \phi) \overline{\overline{E}}_n(\theta, \phi) \cdot \overline{J}_n(\theta, \phi, z) + \overline{\overline{E}}_n^{-1} \cdot \overline{S}_n(\theta, \phi, z)$$
$$= -\overline{\overline{\beta}}_n(\theta, \phi) \cdot \overline{J}_n(\theta, \phi, z) + \overline{\overline{E}}_n^{-1}(\theta, \phi) \cdot \overline{S}_n(\theta, \phi, z)$$
(17)

where (14) has been used. To incorporate the boundary conditions, we multiply both sides of the above equation by $\int_{-d_n}^{z} \overline{\overline{D}}_n(\beta_n(\theta,\phi) \sec \theta z') dz'$ and obtain

$$\cos\theta \int_{\neg d_n}^{z} \overline{\overline{D}}_n(\beta_n(\theta,\phi)\sec\theta z') \cdot \frac{d}{dz'} \overline{J}(\theta,\phi,z') dz'$$

$$= -\int_{-d_n}^{z} \overline{\overline{D}}_n(\beta_n(\theta,\phi)\sec\theta z') \overline{\overline{\beta}}_n(\theta,\phi) \cdot \overline{J}_n(\theta,\phi,z') dz'$$

$$+ \int_{-d_n}^{z} \overline{\overline{D}}_n(\beta_n(\theta,\phi)\sec\theta z') \overline{\overline{E}}_n^{-1}(\theta,\phi) \cdot \overline{S}_n(\theta,\phi,z') dz'$$
(18)

where $\overline{D}_n(\beta_n(\theta,\phi) \sec \theta z')$ is the 4 × 4 diagonal matrix with $e^{(\beta_{n_i}(\theta,\phi) \sec \theta z')}$ as its *i*-th diagonal elements. Here β_{n_i} is the *i*-th eigenvalue of $\overline{\overline{K}}_e$ in layer *n*. Integrating

by parts the left-hand side of the above equation yields

$$\cos\theta \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta z)\cdot\overline{J}_{n}(\theta,\phi,z)$$

$$=\cos\theta \overline{\overline{D}}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta d_{n})\cdot\overline{J}(\theta,\phi,-d_{n})$$

$$+\int_{-d_{n}}^{z}\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta z')\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\theta,\phi)\cdot\overline{S}_{n}(\theta,\phi,z')dz'$$
(19)

After recovering the original notation of $\overline{I}(\theta, \phi, z)$, we have

$$\overline{I}_{n}(\theta,\phi,z) = \overline{\overline{E}}_{n}(\theta,\phi)\overline{\overline{D}}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta(z+d_{n}))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\theta,\phi)\cdot\overline{I}_{n}(\theta,\phi,-d_{n}) + \sec\theta\overline{\overline{E}}_{n}(\theta,\phi)\int_{-d_{n}}^{z}\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta(z'-z))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\theta,\phi)\cdot\overline{S}_{n}(\theta,\phi,z')dz'$$
(20)

It is instructive to view $\overline{E}_n \overline{D}_n \overline{E}_n^{-1}$ in the above equation as a propagation operator which decomposes a specific intensity vector \overline{I}_n into its characteristic components, and propagates each component with its own attenuation rate (e.g., $\beta_n \sec \theta$) in the z-direction, then recombines the characteristic components back into \overline{I}_n at a new point in space. Thus we can interpret the first term on the right-hand side of (20) as the contribution from the upgoing \overline{I}_n propagating from the boundary at $z = -d_n$ to z, and the second term as the contribution from the upgoing \overline{I}_n created by scattering taking place at z' propagating to z.

Similarly, for the downgoing wave, we have

$$\overline{I}_{n}(\pi-\theta,\phi,z) = \overline{\overline{E}}_{n}(\pi-\theta,\phi)\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta(z+d_{n-1}))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\pi-\theta,\phi)\cdot\overline{I}_{n}(\pi-\theta,\phi,-d_{n-1}) + \sec\theta\overline{\overline{E}}_{n}(\pi-\theta,\phi)\int_{z}^{-d_{n-1}}\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta(z-z'))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\pi-\theta,\phi)\cdot\overline{W}_{n}(\pi-\theta,\phi,z')dz'$$
(21)

The first term on the right-hand side of (21) can be interpreted as the contribution from the downgoing \overline{I}_n propagating from the boundary at $z = -d_{n-1}$ to z, and the second term as the contribution from the downgoing \overline{I}_n created by scattering taking place at z' propagating to z.

Making use of the boundary conditions (6) to replace $\overline{I}_n(\theta, \phi, -d_n)$ and $\overline{I}_n(\pi - \theta, \phi, -d_{n-1})$ in the above two equations and ignoring the coupling between upgoing and downgoing intensities at other layers, we have

$$\overline{I}_{n}(\pi-\theta,\phi,z) = \overline{\overline{E}}_{n}(\pi-\theta,\phi)\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta(z+d_{n-1}))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\pi-\theta,\phi)$$

$$\cdot \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{\overline{E}}_{i} \cdot \overline{\overline{D}}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta_{i}) \cdot \overline{\overline{E}}_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0}\delta(\cos\theta-\cos\theta_{0})\delta(\phi-\phi_{0})$$

$$+ \sec\theta\overline{\overline{E}}_{n} \int_{z}^{-d_{n-1}} \overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta(z-z'))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}(\pi-\theta,\phi) \cdot \overline{W}_{n}(\pi-\theta,\phi,z')dz'$$
(22)

for the downgoing wave, and

$$\overline{I}_{n}(\theta,\phi,z) = \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi) \sec \theta(z+d_{n}))\overline{E}_{n}^{-1}} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi) \sec \theta h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin \theta' \overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \prod_{i=N}^{1} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta' h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\cdot \overline{I}_{0}\delta(\cos\theta'-\cos\theta_{0})\delta(\phi'-\phi_{0}) \\
+ \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi) \sec \theta(z+d_{n}))\overline{E}_{n}^{-1} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi) \sec \theta h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin \theta' \overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \prod_{i=N}^{n+1} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta' h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \cdot \sec \theta' \\
\overline{E}_{n} \int_{-d_{n}}^{-d_{n-1}} \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta'(-d_{n}-z'))\overline{E}_{n}^{-1}(\pi-\theta',\phi') \cdot \overline{W}_{n}(\pi-\theta',\phi',z') dz' \\
+ \sec \theta \overline{E}_{n}(\theta,\phi) \int_{-d_{n}}^{z} \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\theta,\phi) \sec \theta(z'-z))\overline{E}_{n}^{-1}(\theta,\phi) \cdot \overline{S}_{n}(\theta,\phi,z') dz' \tag{23}$$

for the upgoing wave. h_n is the thickness of region n, or $h_n = d_n - d_{n-1}$. Here we ignore all other source terms \overline{S} and \overline{W} except those in layer n.

Now we can identify the zeroth-order solution by ignoring scattering terms involving \overline{S} and \overline{W} . The zeroth order solutions for the up and down-going waves are

$$\overline{I}_{n}^{(0)}(\theta,\phi,z) = \overline{\overline{E}}_{n}\overline{\overline{D}}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta(z+d_{n}))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{\overline{E}}_{i}\overline{\overline{D}}_{i}(-\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta_{h})\overline{\overline{E}}_{i}^{-1})$$

$$\cdot \overline{\overline{R}}(\theta,\phi;\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \prod_{i=N}^{1} (\overline{\overline{E}}_{i}\overline{\overline{D}}_{i}(\beta_{n}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{0}h_{i})\overline{\overline{E}}_{i}^{-1})\overline{I}_{0}$$

$$(24a)$$

$$\overline{I}_{n}^{(0)}(\pi-\theta,\phi,z) = \overline{\overline{E}}_{n}\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta(z+d_{n-1}))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}$$

$$\cdot \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{\overline{E}}_{i}\overline{\overline{D}}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta,\phi)\sec\theta_{i})\overline{\overline{E}}_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0}\delta(\cos\theta-\cos\theta_{0})\delta(\phi-\phi_{0})$$
(24b)

which is the solution of (9) subject to the boundary condition (6).

To derive the first-order solution, the source terms \overline{S} and \overline{W} are calculated by substituting $\overline{I}_n^{(0)}(\theta,\phi,z)$ and $\overline{I}_n^{(0)}(\pi-\theta,\phi,z)$ into the integral part of (8).

$$\overline{S}_{n}^{(0)}(\theta,\phi,z) = \int d\Omega' \overline{P}_{n}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(-\beta_{n}(\theta',\phi') \sec \theta'(z+d_{n})) \overline{E}_{n}^{-1}$$

$$\cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{n}(\theta',\phi') \sec \theta'h_{i}) \overline{E}_{i}^{-1})$$

$$\cdot \overline{R}(\theta',\phi';\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \prod_{i=N}^{1} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \sec \theta_{0}h_{i}) \overline{E}_{i}^{-1}) \overline{I}_{0}$$

$$+ \overline{P}_{n}(\theta,\phi;\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \overline{E}_{n} \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \sec \theta_{0}(z+d_{n-1})) \overline{E}_{n}^{-1}$$

$$\cdot \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{E}_{i} \overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \sec \theta_{0}h_{i}) \cdot E_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0}$$
(25a)

$$\overline{W}_{n}^{(0)}(\pi-\theta,\phi,z) = \int d\Omega' \overline{\overline{P}}_{n}(\pi-\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \overline{\overline{E}}_{n} \cdot \overline{\overline{D}}_{n}(-\beta_{n}(\theta',\phi')\sec\theta'(z+d_{n}))$$

$$\overline{\overline{E}}_{n}^{-1} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{\overline{E}}_{i} \cdot \overline{\overline{D}}_{i}(-\beta_{i}(\theta',\phi')\sec\theta_{i})\overline{\overline{E}}_{i}^{-1})$$

$$\cdot \overline{\overline{R}}(\theta',\phi';\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \prod_{i=N}^{1} (\overline{\overline{E}}_{i} \cdot \overline{\overline{D}}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{0}h_{i})\overline{\overline{E}}_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0}$$

$$+ \overline{\overline{P}}_{n}(\pi-\theta,\phi;\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \overline{\overline{E}}_{n}\overline{\overline{D}}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{0}(z+d_{n-1}))\overline{\overline{E}}_{n}^{-1}$$

$$\prod_{i=n-1}^{1} (\overline{\overline{E}}_{i}\overline{\overline{D}}_{i}(\beta(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{0}h_{i}) \cdot \overline{E}_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0}$$
(25b)

Thereafter we can derive the first-order solution for the upgoing wave at $z = -d_{n-1}$ in terms of the incident specific intensity \overline{I}_0 by substituting $\overline{S}_n^{(0)}$ and $\overline{W}_n^{(0)}$ into (23). The first term in (23) is the zeroth-order solution as shown in (24) while the first-order solution is contained in the second and the third terms. Let us designate them as $\overline{I}_{n,1}^{(1)}$ and $\overline{I}_{n,2}^{(1)}$.

$$\overline{I}_{n,1}^{(1)}(\theta,\phi,-d_{n-1}) = \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi) \sec \theta(-d_{n-1}+d_{n}))\overline{E}_{n}^{-1} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi) \sec \theta_{h})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\cdot \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin \theta' \overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \prod_{i=N}^{n+1} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta'h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\cdot \sec \theta' \overline{E}_{n}(\pi-\theta',\phi') \int_{-d_{n}}^{-d_{n-1}} \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta'(-d_{n}-z'))\overline{E}_{n}^{-1}(\pi-\theta',\phi') \\
\cdot \overline{P}_{n}(\pi-\theta',\phi';\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \sec \theta_{0}(z'+d_{n-1}))\overline{E}_{n}^{-1} \\
\cdot \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{E}_{i}\overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \sec \theta_{0}h_{i}) \cdot E_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0} \\
+ \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(-\beta_{n}(\theta,\phi) \sec \theta(-d_{n-1}+d_{n}))\overline{E}_{n}^{-1} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi) \sec \theta_{h})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\cdot \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin \theta' \overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot \prod_{i=N}^{n+1} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta'h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \\
\cdot \sec \theta' \overline{E}_{n}(\pi-\theta',\phi') \int_{-d_{n}}^{-d_{n-1}} \overline{D}_{n}(\beta_{n}(\pi-\theta',\phi') \sec \theta'(-d_{n}-z'))\overline{E}_{n}^{-1}(\pi-\theta',\phi') \\
\int d\Omega'' \overline{P}_{n}(\pi-\theta',\phi') \cdot \overline{E}_{n} \cdot \overline{D}_{n}(-\beta_{n}(\theta'',\phi'') \sec \theta'(z'+d_{n})) \\
\cdot \overline{E}_{n}^{-1} \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta'',\phi'') \sec \theta''h_{i})\overline{E}_{i}^{-1}) \overline{I}_{0} \\
\overline{R}(\theta'',\phi'';\theta_{0},\phi_{0}) \cdot \prod_{i=N}^{1} (\overline{E}_{i} \cdot \overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0}) \sec \theta_{0}h_{i})\overline{E}_{i}^{-1})\overline{I}_{0} \\
(25a)$$

$$\overline{I}_{n,2}^{(1)}(\theta,\phi,-d_{n-1}) = \sec\theta\overline{E}_n \int_{-d_n}^{-d_{n-1}} dz' \overline{D}_n(\beta_n(\theta,\phi) \sec\theta(z'+d_{n-1})) \cdot \overline{E}_n^{-1} \\
\cdot P_n(\theta,\phi;\pi-\theta_0,\phi_0) \cdot (\overline{E}_n \cdot \overline{D}_n(\beta_n(\pi-\theta_0,\phi_0) \sec\theta_0(z'+d_{n-1})) \cdot \overline{E}_n^{-1}) \\
\cdot \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{E}_i \cdot \overline{D}_i(\beta_i(\pi-\theta_0,\phi_0) \sec\theta_0h_i) \cdot \overline{E}_i^{-1}) \cdot \overline{I}_0 \\
+ \sec\theta\overline{E}_n \int_{-d_n}^{-d_{n-1}} dz' \overline{D}_n(\beta_n(\theta,\phi) \sec\theta(z'+d_{n-1})) \cdot \overline{E}_n^{-1} \\
\cdot \int d\Omega' P_n(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot (\overline{E}_n \cdot \overline{D}_n(-\beta_n(\theta',\phi') \sec\theta'(z'+d_n)) \cdot E_n^{-1}) \\
\cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_i \cdot \overline{D}_i(-\beta_i(\theta',\phi') \sec\theta'h_i)\overline{E}_i^{-1}) \\
\cdot \overline{R}(\theta',\phi';\theta_0,\phi_0) \cdot \prod_{i=N}^{1} (\overline{E}_i \cdot \overline{D}_i(\beta_i(\pi-\theta_0,\phi_0) \sec\theta_0h_i)\overline{E}_i^{-1}) \cdot \overline{I}_0$$
(26b)

The integration of $\overline{\overline{D}}$ along the \hat{z} direction in (26) can be carried out analytically. The final result for the first-order solution is

$$\begin{split} & \left[\overline{E}_{n}^{(1)}(\theta,\phi,z=-d_{n-1}) = \\ & \sec\theta[\overline{E}_{n}] \cdot [\overline{E}_{n}^{-1}P_{n}(\theta,\phi;\pi-\theta_{0},\phi_{0})\overline{E}_{n}]_{km} \frac{1-e^{-\beta_{k}(\theta,\phi)\sec\theta_{h}-\beta_{m}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{h}}}{\beta_{k}(\theta,\phi)\sec\theta+\beta_{m}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{h}} \\ & \cdot [\overline{E}_{n}^{-1}]_{mj} \cdot \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{h}_{i})\cdot\overline{E}_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}_{0} \\ & + \sec\theta[\overline{E}_{n}] \cdot \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin\theta'[\overline{E}_{n}^{-1}P_{n}(\theta,\phi;\theta',\phi')\overline{E}_{n}]_{km} \frac{e^{-\beta_{k}(\theta,\phi)\sec\theta_{h}}-e^{-\beta_{m}(\theta',\phi')\sec\theta'_{h}}{\beta_{m}(\theta',\phi')\sec\theta'-\beta_{k}(\theta,\phi)\sec\theta} \\ & \cdot \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta',\phi')\sec\theta'_{h})\overline{E}_{i}^{-1}) \cdot [E_{n}^{-1}\overline{R}(\theta',\phi';\theta_{0},\phi_{0})]_{mj} \\ & \prod_{i=n}^{1} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})\sec\theta_{h})\overline{E}_{i}^{-1}) \cdot \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \tan\theta'\overline{E}_{n} \\ & + \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi)\sec\theta_{h})\overline{E}_{n}^{-1}\overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi') \frac{n+1}{\beta_{m}(\pi-\theta_{0},\phi')} \sec\theta'_{h} - e^{-\beta_{m}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})} \sec\theta_{h} \overline{E}_{n}^{-1}) \\ & [\overline{E}_{n}\overline{P}_{n}(\pi-\theta',\phi';\pi-\theta_{0},\phi_{0})\overline{E}_{n}]_{km} \frac{e^{-\beta_{k}(z-\theta',\phi')} \sec\theta'_{h} - e^{-\beta_{m}(x-\theta_{0},\phi_{0})} \sec\theta'_{h} \overline{E}_{n}^{-1}}{\beta_{m}(\pi-\theta_{0},\phi')} \sec\theta'_{h} - \theta',\phi') \sec\theta'_{h} \\ & + \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi)\csc\theta_{h})\overline{E}_{n}^{-1}\overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi')\overline{E}_{n}(\pi-\theta',\phi')} \\ & = \prod_{i=n+1}^{N} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi)\csc\theta_{h})\overline{E}_{n}^{-1}) \cdot \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \tan\theta'\overline{E}_{n} \\ & \frac{1}{E_{n}} (-\beta_{n}(\theta,\phi)\sec\theta_{h})\overline{E}_{n}^{-1}\overline{R}(\theta,\phi;\theta',\phi')\overline{E}_{n}(\pi-\theta',\phi') \\ & \prod_{i=n+1}^{n+1} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(-\beta_{i}(\theta,\phi)\sec\theta_{h})\overline{E}_{n}^{-1}) \int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} d\theta'' \sin\theta''\overline{E}_{n}^{-1}\overline{P}_{n}(\pi-\theta',\phi';\theta'',\phi'')\overline{E}_{n}]_{km} \\ & \frac{1-e^{-\beta_{k}(x-\theta',\phi')} \sec\theta'_{h,n}-\beta_{n}(\theta'',\phi'') \sec\theta''_{h,n}}{\beta_{k}(\pi-\theta',\phi')} \sec\theta''_{h,n}-\theta_{n}(\phi',\phi')} \\ & \frac{1-e^{-\beta_{k}(x-\theta',\phi')} \sec\theta'_{h,n}-\beta_{n}(\theta'',\phi'') \sec\theta''_{h,n}}{\beta_{k}(\pi-\theta',\phi')} \\ & \frac{1}{e^{-n}} (-\theta',\phi') \sec\theta'_{h,n}-\beta_{n}(\theta'',\phi'') \sec\theta''_{h,n}}{\beta_{k}(\pi-\theta',\phi')} \\ & \frac{1}{e^{-n}} (-\theta',\phi') \sec\theta'_{h,n}-\theta_{n}(\theta'',\phi'') \sec\theta''_{h,n}}{\beta_{k}(\pi-\theta',\phi')} \\ & \frac{1}{e^{-n}} (-\theta',\phi'',\theta_{0},\phi_{0})]_{m,i} \cdot \prod_{i=N}^{N} (\overline{E}_{i}\cdot\overline{D}_{i}(\beta_{i}(\pi-\theta_{0},\phi_{0})) \\ & \frac{1}{e^{-n}} (-$$

The first term in the above equation represents the single volume scattering contribution, the second and third terms represent the interaction between surface and volume scattering, and the last term represents two surface scattering and one volume scattering as shown in Figure 2.

To obtain $\overline{I}^{(1)}(\theta, \phi, 0)$ for a *N*-layer medium, we simply sum up the contribution from each layer and take into account the attenuation through upper layers.

$$\overline{I}^{(1)}(\theta,\phi,0) = \sum_{n=1}^{N} \prod_{i=n-1}^{1} (\overline{\overline{E}}_{i} \cdot \overline{\overline{D}}_{i} \cdot \overline{\overline{E}}_{i}^{-1}) \cdot \overline{I}^{(1)}_{n}(\theta,\phi,-d_{n-1})$$
(28)

A6.1.2.2 Second order solution with long cylinder approximation

Follow the same scheme, the second order iterative solution of the RT equation can be easily obtained. The solution involves the double integral representing the double scattering from one scattering direction to another. In forests, the trunks constitute a large portion of total biomass and due to the long structures, the second order scattering between the trunks and other components of the foliage will be considered to assess the higher order scattering effect.

Using the finite cylinder approximation where the induced current on the cylinder is the same as the one on an infinite long cylinder, the scattering function can be expressed as _

$$S_{\alpha\beta}(\hat{k}',\hat{k}_i) = S_{0\alpha\beta}(\hat{k}',\hat{k}_i) \int_{-d/2}^{d/2} dz \ e^{-ik_0(\cos\theta' - \cos\theta_i)z}$$
(29)

where d is the length of the cylinder, k_0 is the wave number in the free space, \hat{k}_i and \hat{k}' are the incident and scattering directions for a trunk, respectively, θ_i and θ' are the incident angle and scattering angles, α and β are scattered and incident polarizations and can be either h or v polarization. The phase matrix elements which are the correlation between different scattering matrix elements can be expressed as

$$P_{\alpha\beta\gamma\delta}(\hat{k}',\hat{k}_i) = S_{0\alpha\beta}(\hat{k}',\hat{k}_i) \cdot S_{0\gamma\delta}^*(\hat{k}',\hat{k}_i) \frac{\sin^2[(\frac{k_0d}{2})(\cos\theta'-\cos\theta_i)]}{[(\frac{k_0d}{2})(\cos\theta'-\cos\theta_i)]^2} \cdot d^2$$
(30)

where α , β , γ , δ can be either h or v polarization.

If $k_0 d$ is large as the case of tree trunks at microwave frequencies, the scattering from trunks $P(\hat{k}', \hat{k}_i)$ is peaked at $\theta' = \theta_i$. Assuming that the scattering from other components $P_1(\hat{k}', \hat{k}_i)$ is slowly varying compared with the scattering from trunks, the double scattering term in the second order solution of RT equation is in terms of

$$\int_{0}^{2\pi} d\phi' \int_{0}^{\pi} d\theta' \sin \theta' P_{1}(\hat{k}_{s}, \hat{k}') \cdot P(\hat{k}', \hat{k}_{i}) = \int_{0}^{2\pi} d\phi' P_{1}(\hat{k}_{s}, \hat{k}') \cdot S_{0\alpha\beta}(\hat{k}', \hat{k}_{i}) S_{0\gamma\delta}(\hat{k}', \hat{k}_{i})^{*} |_{\theta'=\theta_{i}}$$
(31)
$$\cdot d^{2} \int_{0}^{\pi} d\theta' \sin \theta' \frac{\sin^{2}[(\frac{k_{0}d}{2})(\cos \theta' - \cos \theta_{i})]}{[(\frac{k_{0}d}{2})(\cos \theta' - \cos \theta_{i})]^{2}}$$

and in the limit of $k_0 d \to \infty$,

1

$$\int_{0}^{\pi} d\theta' \sin \theta' \frac{\sin^{2}[(\frac{k_{0}d}{2})(\cos \theta' - \cos \theta_{i})]}{[(\frac{k_{0}d}{2})(\cos \theta' - \cos \theta_{i})]^{2}} = \frac{2}{k_{0}d} \cdot \pi$$
(32)

The remaining integration over ϕ' can be carried numerically.

The effect of the double scattering is illustrated with a simple tree structure with only trunks and branches as shown in Figure 3. The tree trunk has a radius of 4.0cm and length 5.0m. There are 50 branches attached to the the upper 2m of each trunk. The radius and length of branches are 1.0cm and 0.5m respectively. The fractional volume of crown layer is 0.1% The HH and HV backscattering coefficients as functions of incident angles are shown in Figures 4(a) and 4(b) in which the 1st-order and 2nd-order denote the RT solutions of first order and second order with long

cylinder approximation. It is shown that the second-order scattering has little effect on co-polarized backscattering coefficients although there is about 0.5 dB difference for the cross-polarized backscattering coefficient. As the fractional volume increases to 0.2% the effect becomes larger as shown in Figure 5.

A6.1.2.3 Scattering by circular cylinder

For a circular dielectric cylinder with length longer than the wavelength of incident electromagnetic wave and radius much smaller than the wavelength of interest, the finite cylinder approximation[Karam et al., 1988; Yueh, 1991] is a fairly good approach.

The finite cylinder approximation assumes that the internal field inside a finite length cylinder is the same as that inside an infinitely long cylinder upon an incident wave. Subsequently, scattered fields are obtained by evaluating the fields radiated from this approximate induced current sources. The scattered field in the far field limit is expressed in the following form,

$$\begin{pmatrix} E_{hs} \\ E_{vs} \end{pmatrix} = \frac{e^{ikr}}{\tau} \begin{pmatrix} f_{hh} & f_{hv} \\ f_{vh} & f_{vv} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{hi} \\ E_{vi} \end{pmatrix}$$
(1)

where E_{hi} and E_{vi} are the horizontally and vertically polarized components of the incident electric field, respectively, and similarly for the scattered field components, E_{hs} and E_{vs} .

The scattering matrix elements of a finite cylinder with dielectric constant ϵ , free space permeability, radius a and length l are given by

$$f_{hh} = \frac{k_0^2(\epsilon - 1)U}{2} (-Z_0^+ \eta B_{0h} + 2\sum_{n=1}^{\infty} (Z_n^- i \cos \theta_i A_{nh} - Z_n^+ \eta B_{nh}) \cos[n(\phi_s - \phi_i)])$$

$$f_{vv} = \frac{k_0^2(\epsilon - 1)U}{2} ((Z_0^+ \cos \theta_i \cos \theta_s + Z_0 \sin \theta_s) A_{nh} + 2\sum_{n=1}^{\infty} [(Z_n^+ \cos \theta_i A_{nh} + iZ_n^- \eta B_{nh}) \cos \theta_s + A_{nh} Z_n \sin \theta_s] \cos[n(\phi_s - \phi_i)])$$

$$f_{hv} = \frac{k_0^2(\epsilon - 1)U}{2} 2i \sum_{n=1}^{\infty} (Z_n^- i \cos \theta_i A_{nv} - Z_n^+ \eta B_{nv}) \sin[n(\phi_s - \phi_i)]$$

$$f_{vh} = \frac{k_0^2(\epsilon - 1)U}{2} 2i \sum_{n=1}^{\infty} [(Z_n^+ \cos \theta_i A_{nv} + iZ_n^- \eta B_{nv}) \cos \theta_s + A_{nh} Z_n \sin \theta_s] \sin[n(\phi_s - \phi_i)]$$
(2)

where

$$U = \frac{\exp[i(k_{zi} - k_{zs})l] - 1}{i(k_{zi} - k_{zs})}$$

and

$$Z_{n} = \frac{a}{k_{1\rho i}^{2} - k_{\rho s}^{2}} [k_{1\rho i} J_{n}(k_{\rho s} a) J_{n+1}(k_{1\rho i} a) - k_{\rho s} J_{n}(k_{1\rho i} a) J_{n+1}(k_{\rho s} a)]$$

$$Z_{n}^{+} = \frac{k_{0}}{2k_{1\rho i}} (Z_{n+1} + Z_{n-1})$$

$$Z_{n}^{-} = \frac{k_{0}}{2k_{1\rho i}} (Z_{n-1} - Z_{n+1})$$
(3)

The coefficients A_{nh} , A_{nv} , B_{nh} and B_{nv} are given by

$$A_{nh} = \frac{\Delta_{ah}}{\Delta}$$

$$A_{nv} = \frac{\Delta_{av}}{\Delta}$$

$$\eta B_{nh} = \frac{\Delta_{bh}}{\Delta}$$

$$\eta B_{nv} = \frac{\Delta_{bv}}{\Delta}$$
(4)

where

$$\Delta = \left(\frac{k_{zi}}{k_0}\right)^2 \left(\frac{1}{y^2} - \frac{1}{x^2}\right)^2 n^2 - \left[\frac{\epsilon J_n'(x)}{x J_n(x)} - \frac{H_n^{(1)'}(y)}{y H_n^{(1)}(y)}\right] \left[\frac{J_n'(x)}{x J_n(x)} - \frac{H_n^{(1)'}(y)}{y H_n^{(1)}(y)}\right]$$

$$\Delta_{ah} = 2\left(\frac{k_{\rho i}}{k_0}\right) \frac{1}{\pi y^2 J_n(x) H_n^{(1)}(y)} \frac{k_{zi}}{k_0} \left(\frac{1}{y^2} - \frac{1}{x^2}\right) n$$

$$\Delta_{bh} = 2\left(\frac{k_{\rho i}}{k_0}\right) \frac{1}{\pi y^2 J_n(x) H_n^{(1)}(y)} \left(-i\right) \left[\epsilon \frac{J_n'(x)}{x J_n(x)} - \frac{H_n^{(1)'}(y)}{y H_n^{(1)}(y)}\right]$$

$$\Delta_{av} = 2\left(\frac{k_{\rho i}}{k_0}\right) \frac{1}{\pi y^2 J_n(x) H_n^{(1)}(y)} i\left[\frac{J_n'(x)}{x J_n(x)} - \frac{H_n^{(1)'}(y)}{y H_n^{(1)}(y)}\right]$$

$$\Delta_{bv} = \Delta_{ah}$$
(5)

In the above equations, x and y are defined as

$$\begin{aligned} x = k_{1\rho i} a \\ y = k_{\rho i} a \end{aligned}$$

where

$$k_{1\rho i} = \sqrt{k_0^2 \epsilon - k_{zi}^2}$$
$$k_{\rho i} = \sqrt{k_0^2 - k_{zi}^2}$$

A6.1.2.4 Kirchhoff's approximation

In the Kirchhoff's Approximation, the field at a given point of the surface is assumed to be the same as the field for the tangent plane at that point [Kong, 1990]. In this appendix, the surface height and the surface correlation function are assumed to be Gaussian distributed. The surface has rms height σ and correlation length l. It is consisted of an coherent reflection term and an incoherent scattering term and is expressed as

$$\overline{\overline{R}}(\theta,\phi;\theta',\phi') = \overline{\overline{R}}_0(\theta)\delta(\cos\theta - \cos\theta')\delta(\phi - \phi') + \overline{\overline{R}}_f$$
(1)

The coherent reflection is expressed as

$$\overline{\overline{R}}_{0}(\theta) = \overline{\overline{R}}_{00}(\theta) \cdot e^{-4k^{2}\sigma^{2}\cos^{2}\theta}$$
⁽²⁾

where k is the free space wavenumber. $\overline{\overline{R}}_{00}$ is the reflection from the flat surface and is expressed as

$$\overline{\overline{R}}_{00}(\theta) = \begin{pmatrix} |R_h(\theta)|^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & |R_v(\theta)|^2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & Re(R_v(\theta)R_h^*(\theta)) & -Im(R_v(\theta)R_h^*(\theta))\\ 0 & 0 & Im(R_v(\theta)R_h^*(\theta)) & Re(R_v(\theta)R_h^*(\theta)) \end{pmatrix}$$
(3)

where $R_h(\theta)$ and $R_v(\theta)$ are the Fresnel reflection coefficients for horizontally and vertically polarized waves, respectively.

The incoherent reflection is expressed as

$$\overline{\overline{R}}_{f}(\theta,\phi;\theta',\phi') = D_{I} \cdot \overline{\overline{C}}(\theta,\phi;\theta',\phi') \cdot S(\theta,\phi;\theta',\phi')$$
(4)

 D_I is expressed in terms of summation as

$$D_I = \sum_{m=1}^{\inf} \frac{(k_{tdz}^2 \sigma^2)^m}{m!m} l^2 e^{-(k_{tdx}^2 + k_{tdy}^2)l^2/4m} e^{-\sigma^2 k_{tdz}^2}$$
(5)

where $\overline{k}_{td} = \overline{k}_i - \overline{k}_t = \hat{x}k_{tdx} + \hat{y}k_{tdy} + \hat{z}k_{tdz}$

The matrix $\overline{\overline{C}}$ is given in terms of scattering functions from the surface as $\overline{\overline{C}}(\theta, \phi, \theta', \phi') =$

$$\begin{pmatrix} \langle |f_{hh}|^{2} \rangle & \langle |f_{hv}|^{2} \rangle & Re \langle f_{hv}f_{hh}^{*} \rangle & -Im \langle f_{hv}f_{hh}^{*} \rangle \\ \langle |f_{vh}|^{2} \rangle & \langle |f_{vv}|^{2} \rangle & Re \langle f_{vv}f_{vh}^{*} \rangle & -Im \langle f_{vv}f_{vh}^{*} \rangle \\ 2Re \langle f_{vh}f_{hh}^{*} \rangle & 2Re \langle f_{vv}f_{hv}^{*} \rangle & Re \langle f_{vv}f_{hh}^{*} + f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle & -Im \langle f_{vv}f_{hh}^{*} - f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle \\ 2Im \langle f_{vh}f_{hh}^{*} \rangle & 2Im \langle f_{vv}f_{hv}^{*} \rangle & Im \langle f_{vv}f_{hh}^{*} + f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle & Re \langle f_{vv}f_{hh}^{*} - f_{vh}f_{hv}^{*} \rangle \end{pmatrix}$$
(6)

where

$$\begin{aligned} f_{hh} &= -(\hat{v} \cdot \hat{k}')(\hat{v}' \cdot \hat{k})R_h - (\hat{h} \cdot \hat{k}')(\hat{h}' \cdot \hat{k})R_v \\ f_{vv} &= -(\hat{h} \cdot \hat{k}')(\hat{h}' \cdot \hat{k})R_h - (\hat{v} \cdot \hat{k}')(\hat{v}' \cdot \hat{k})R_v \\ f_{hv} &= (\hat{h} \cdot \hat{k}')(\hat{v}' \cdot \hat{k})R_h - (\hat{v} \cdot \hat{k}')(\hat{h}' \cdot \hat{k})R_v \\ f_{vh} &= (\hat{v} \cdot \hat{k}')(\hat{h}' \cdot \hat{k})R_h - (\hat{h} \cdot \hat{k}')(\hat{v}' \cdot \hat{k})R_v \end{aligned}$$
(7)

and the R_h , R_v are the Fresnel reflection coefficients evaluated at the stationary phase points for the horizontal and vertical polarizations, respectively. The angular bracket denotes ensemble average.

The shadowing effects are taken into account by introducing the shadowing function S derived by [Smith, 1967; Sancer, 1969] as

$$S(\theta,\phi,;\theta',\phi') = \begin{cases} 1/(1+\Lambda(\mu)), & \text{for } \phi = \phi' + \pi, \theta \ge \theta' \\ 1/(1+\Lambda(\mu')), & \text{for } \phi = \phi' + \pi, \theta' \ge \theta \\ 1/(1+\Lambda(\mu) + \Lambda(\mu')), & \text{otherwise} \end{cases}$$
(8)

with $\mu = \cot \theta \, , \; \mu^{\prime} = \cot \theta^{\prime} \, , \; {\rm and}$

$$\Lambda(\mu) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{s}{\mu} \exp^{-\mu^2/2s^2} - erfc(\frac{\mu}{\sqrt{2s}}) \right]$$
(9)

where erfc is the complementary error function.

A6.2 Calcul de la constante diélectrique

A6.2.1 Expression de la constante diélectrique de la végétation (Ulaby and El-Rayes 1987)

La constante diélectrique de la végétation (ε_v) est considérée comme l'addition mixte simple de trois composantes :

- 1) & une composante résiduelle non dispersive correspondant à la matière sèche,
- 2) $v_{fw} \varepsilon_f$ composante de l'eau libre avec v_{fw} la fraction de volume de l'eau libre et ε_f sa constante diélectrique,
- 3) $v_b \varepsilon_b$ composante d'eau liée dans le volume de végétation avec v_b la fraction volumique d'eau liée et ε_b sa constante diélectrique.

Le modèle prend donc la forme :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_r + \upsilon_{fw} \varepsilon_f + \upsilon_b \varepsilon_b$$

En remplaçant & et & par les modèles de Debye et Cole il vient :

$$\varepsilon_{v} = \varepsilon_{r} + v_{fv} \left[4,9 + \frac{75}{1 + \frac{jf}{18}} - j\frac{18\sigma}{f} \right] + v_{b} \left[2,9 + \frac{55}{1 + \left(\frac{jf}{0,18}\right)^{0.5}} \right]$$

avec :

$$\varepsilon_r = 1,7 - 3,2Hv + 6,5(Hv)^2$$

$$v_{fv} = Te(0,82Hv + 0,166)$$

$$v_b = 31,4(Hv)^2/(1+59,5(Hv)^2)$$

$$\sigma = 1,27$$

où f est la fréquence en GHz, σ la conductivité ionique de l'eau libre en solution exprimée en siemens/m. Hv est l'humidité volumique (g/cm³) s'exprimant en fonction de la densité volumique ρ (g/cm³) et de la teneur en eau (humidité pondérale) Hp (g/g) mesurée:

$$Hv = \frac{Hp \cdot \rho}{1 - Hp \cdot (1 - \rho)}$$

A6.2.2 Expression de la constante diélectrique du sol (Hallikainen et al. 1985)

La constante diélectrique est obtenue à partir du modèle empirique développé par Hallikainen et al. (1985) pour différentes configuration radar et de sol prenant la forme :

$$\varepsilon = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C) \cdot Hv + (c_0 + c_1S + c_2C) \cdot Hv^2$$

Les coefficients a_n , b_n et c_n avec n = 0, 1 et 2 sont données par Hallikainen et al. (1985) pour les parties réelle et imaginaire en fonction des différentes fréquence. S et C sont respectivement les composantes texturales en sable et argile du sol obtenues à partir de Laganne (1988). Hv est l'humidité volumique du sol se déduisant de la teneur en eau par :

$$Hv = \rho Hp$$

où ρ est la densité volumique déduite à partir des caractéristiques physiques du sol données par Dobson et al. (1985) et Hp est la teneur en eau du sol mesurée.



A6.2.3 Constante diélectrique pour le végétation et le sol sur le site d'étude

b)

Figure A : Variation des parties réelle ɛ' et imaginaire ɛ" de la constante diélectrique de la végétation (a) et du sol (b) en fonction de la teneur en eau, et pour les bandes L et C.

<u>Références</u>

- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., and El Rayes, M. A. (1985). "Microwave dielectric behavior of wet soil-part II : dielectric mixing models." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23(1), 35-46.
- Hallikainen, M. T., Ulaby, F. T., Dobson, M. C., El Rayes, M. A., and Wu, L. K. (1985). "Microwave dielectric behavior of wet soil-part I: empirical models and experimental observations." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23(1), 25-34.

Laganne, J. P. (1988). "Etude des stations forestières du Causse de Mende, Service départemental de la Lozère,." , ONF, Service départemental de la Lozère, Mende.

Ulaby, F. T., and El-Rayes, M. A. (1987). "Microwave dielectric spectrum of vegetation- part II: dual-dispersion model." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-25(5), 550-557.

A6.4 Angle d'incidence local théorique





Résumé

La possibilité de spatialiser certains paramètres forestiers comme la biomasse sur pied représente un enjeu significatif pour la gestion raisonnée de la ressource forestière, et une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers. A cette fin, l'imagerie par radar à synthèse d'ouverture (RSO), en plus de son utilisation tout temps, a montré ces dernières années de bonnes potentialités par la sensibilité de la rétrodiffusion basses fréquences (P et L) en polarisation croisée (HV) aux paramètres de la masse ligneuse, jusqu'à des volumes de l'ordre de 200-300 m³/ha. Ces études, réalisées sur des milieux forestiers simples (essentiellement plantations de résineux) ont démontré dans une certaine mesure que l'architecture de l'arbre ainsi que la topographie sont des paramètres importants à prendre en compte, nécessitant toutefois des études complémentaires. Plus globalement, la généralisation à des conditions forestières variées, nécessite une meilleure compréhension du lien biophysique entre l'écho radar et les paramètres recherchés, lien perturbé par la topographie, grâce à une approche de modélisation de la diffusion électromagnétique des ondes par le couvert. Toutefois, ce type d'approche bute sur l'absence de description précise du milieu forestier en termes géométrique et architectural des diffuseurs élémentaires (feuilles, branches, troncs). Ainsi, les récents modèles architecturaux de croissance des plantes du type AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes du CIRAD) s'avèrent intéressants à cette fin.

Le premier objectif, de type problème direct, vise à affiner la compréhension du lien physique entre la rétrodiffusion radar et les paramètres forestiers, à l'aide d'une démarche originale de couplage du modèle AMAP avec le modèle de transfert radiatif vectoriel du MIT/CESBIO. Un deuxième objectif, de type problème inverse, est d'évaluer la faisabilité d'estimation spatialisée de paramètres forestiers à l'aide de données RSO seules ou en synergie avec le modèle AMAP, intégrés dans un SIG. Dans les deux cas, les perturbations dues au relief sont abordées explicitement, et nécessite la mise en œuvre et la validation de post-traitements développés récemment au LCT.

L'étude est menée sur un site forestier "simple" de parcelles monospécifiques équiennes de pin noir d'Autriche, localisé en Lozère et situé dans différentes configurations topographiques où des données RSO variées (ERS, JERS et surtout SIR-C) ont été acquises. La méthodologie est basée sur un SIG permettant la mise en correspondance des données expérimentales (RSO, MNT, paramètres forestiers). Elle intègre également le développement et le calage du modèle AMAP pour le pin noir, et d'une nouvelle interface dénommé AMAP2SAR, permettant d'accéder à une caractérisation architecturale réaliste du couvert forestier.

Les résultats en bande L et en particulier en polarisation HV montrent une bonne sensibilité aux paramètres forestiers de la masse ligneuse, pour des volumes de fûts jusqu'à 150 m³/ha. Cette sensibilité est très similaire à celle observée auparavant en terrain plat, après l'application d'une phase de correction des perturbations radiométriques dûs au relief, impliquant le développement d'un modèle semi-empirique de correction angulaire. Par la suite, la modélisation de la rétrodiffusion prenant en compte la variabilité verticale dans le couvert grâce à AMAP a montré les faiblesses de l'hypothèse d'homogénéité verticale utilisée jusqu'à maintenant par les modèles électromagnétiques. Ceci a permis de mieux mettre en évidence le lien de la rétrodiffusion de volume dominante pour la configuration L-HV avec la densité et le diamètre des branches primaires, paramètres bien corrélés allométriquement à des paramètres plus classiques du couvert comme la densité et la section des fûts, et donc du volume à l'hectare des fûts. L'impact topographique a également été modélisé ce qui a permis de valider le modèle semi-empirique de correction angulaire précité.

Finalement, des résultats d'inversion de paramètres forestiers à partir des données radar, du modèle AMAP ou des deux couplés dans un SIG sont présentés. L'ensemble de ces résultats permet de cerner les limites de ce type d'approche et de discuter des perspectives d'applications et des travaux à mener à cette fin.

<u>Mots clés</u> : Paramètres forestiers, biomasse, télédétection radar, pin noir d'Autriche, topographie, modèle architectural de plantes, modèle de transfert radiatif, couplage de modèles, SIG, corrections topographiques, simulation, interprétation, inversion.