



ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS

T H E S E

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences Forestières

présentée par

Jean-Michel MARTINEZ

**ESTIMATION DE LA BIOMASSE FORESTIERE ET
CARACTERISATION DE LA STRUCTURE VERTICALE
DES PEUPELEMENTS DE CONIFERES PAR RADAR
VHF ET RADAR SONDEURS AEROPORTES.**

Soutenue le 10 Novembre 2000 devant le jury suivant :

M. Claude Millier	Président du jury
M. François Houllier	Rapporteur
M. Shaun Quegan	Rapporteur
Mme Thuy Le Toan	Directeur de thèse
M. André Beaudoin	Examineur
M. Martti Hallikainen	Examineur
M. Michel Vallance	Examineur

**« La science de la vie consiste à saisir toutes les chances
que le hasard nous présente »**

Joseph Conrad - Fortune

Remerciements

Au début de cette thèse, je n'imaginai pas la quantité de gens que je croiserais et la somme d'épisodes qui jalonnaient ces trois ans. Je n'imaginai pas ainsi transporter précieusement dans un sac de voyage entre San Francisco, Los Angeles et Las Vegas, des transparents de présentation pour un congrès, ou bien fréquenter assidûment ... les plages de Waikiki Beach pour un autre symposium (!), ni traverser l'Argentine des chutes d'Iguazu à Ushuaia (ah ! Buenos Aires ... soupir...), mais sans transparents cette fois là. Je n'avais pas plus prévu d'avoir à changer de laboratoire en cours de thèse, de quitter Montpellier et la Maison de la Télédétection pour Toulouse et la CESBIO. De la Méditerranée à la Garonne, de l'huile d'olive à la graisse de canard...Ce changement, s'il aurait pu être déstabilisant, cette avéré comme une formidable chance à saisir : celle de côtoyer des scientifiques travaillant sur les mêmes sujets mais avec des approches différentes, voire complémentaires, ou avec des préoccupations à prime abord divergentes mais pas tant que ça en fin de compte !

Dans ces remerciements, il y a donc les gens de la « Maison » à Montpellier, ceux de Mende, mon site d'étude principal et, bien sur, ceux de Toulouse. Le lecteur voudra bien pardonner la longueur des remerciements qui suivent mais qu'il se rassure : leur lecture est optionnelle !

Commençons par la soutenance finale : merci au président du jury, Mr Claude Millier, aux rapporteurs, MM. Houllier et Quegan, et aux examinateurs d'avoir effectué, pour certains, de grande distance pour y assister, et surtout de leur intérêt vis à vis du manuscrit de thèse et de l'oral.

Tout a donc commencé à Montpellier et plus particulièrement au Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-ENGREF. Je tiens ici à remercier celui sans lequel rien n'aurait été possible, l'initiateur du sujet et mon encadrant en première année, André Beaudoin. Sa curiosité, sa rigueur et son dynamisme sont des qualités que j'ai pu apprécier. La confiance qu'il m'a accordé et le grand espace de liberté qu'il m'a laissé m'ont permis de plonger rapidement dans le travail et à prendre toutes mes responsabilités. C'est à lui que tient le caractère multidisciplinaire de cette thèse. Merci encore André.

Si ce travail a été passionnant et a débouché sur de bons résultats, c'est en grande partie grâce à Thierry Castel, doctorant dont j'ai pris la suite et qui avait défriché de nombreuses pistes avec André. Les nombreuses questions dont je les assailli ne l'ont pas départie de sa bonne humeur et de l'attention bienveillante envers celui qui continuait son travail. Grâce à un de ces hasards de la vie, nous avons eu le plaisir de partager le même bureau au CESBIO à la fin de ma propre thèse et je le congratulate d'avoir réussi à me supporter lors de la rédaction puis la préparation de la soutenance !

Si au LCT j'ai intégré l'équipe radar, ce n'était pas en concurrence avec nos amis de l'optique avec lesquels nous partagions le site d'étude. J'ai nommé Michel Deshayes et ses « forest boys »: Emmanuel Mushinzimana et Nicolas Stach. Avec grand bonheur nous avons pu mêler nos travaux sur la fin de thèse. Les conseils avisés de Michel pour préparer une présentation orale sont déjà devenus une légende et je ne peux que les louer à mon tour. Un grand salut amical à mes anciens collègues de bureaux à Montpellier, Nicolas et Emmanuel, qui ont réalisé un énorme travail sur la Cause de Mende et dont certains résultats ont été utilisés dans cette thèse.

J'ai quelques scrupules à passer rapidement sur le reste de la famille montpelliéraine mais il faut m'y résoudre sous peine d'en écrire un roman entier : merci à François pour nos fameuses discussions sur les statistiques, le bassin versant du Sousson, les « Austrian Pine » ... le championnat de France de football et les parties de beach volley ! Une attention particulière à la gente féminine de la maison : Isabelle, Julie, Alice, Delphine, Véronique. Remerciements à Sylvain Labbé et Laurent pour leur compétence informatique que je n'ai cessé de regretter depuis lors. Enfin, merci aux titulaires du laboratoire pour leur gentillesse et leur simplicité.

Pour leur soutien lors des différentes campagnes de terrains, je tiens également à remercier les équipes du CEMAGREF et de l'ENGREF du centre de Montpellier et Sciences du Sol de l'INRA. Un grand merci également au CIRAD et à l'équipe AMAP, Yves Caraglio en tête, pour leur collaboration et leurs travaux extrêmement précieux à cette thèse.

Passons à la Lozère, le terrain de jeux de cette thèse. Il est nécessaire ici de faire un arrêt pour saluer le grand rôle de Philippe Durand dans cette thèse. Sans l'intérêt d'un « forestier », cette thèse n'aurait sans doute pas eu la même coloration. Mes remerciements vont également aux agents, stagiaires et objecteurs de l'ONF de Mende qui ont participé aux mesures terrains quelles que soient les conditions météorologiques. Je n'oublierai pas les semaines entières passés dans les parcelles, les quelques péripéties (sangliers, routes enneigées ...) et surtout les retours sur Mende au soir venu après une journée entière passée dans les parcelles avec le sentiment du travail accompli.

Last but not least, la communauté du CESBIO. Tout d'abord Mme Le Toan qui m'a accueilli en début de seconde année, sa gentillesse et son constant enthousiasme pour nos travaux m'ont permis de m'intégrer rapidement dans ma nouvelle équipe. Je tiens spécialement à souligner son soucis récurrent de mettre en avant le travail de ses thésards et de leur mettre en quelque sorte le pied à l'étrier pour leur future carrière. Un grand merci donc, Thuy.

Dans l'équipe radar du CESBIO, je m'empresse de saluer Nicolas Floury dont j'ai pu apprécier l'efficacité et le sens du travail en commun. Une pensée aussi pour Pierre Melon avec qui j'ai effectué les travaux sur les données CARABAS et avec qui nous nous sommes creusés la tête bien des fois pour interpréter ces données. Enfin, merci à plusieurs personnes pour leur bonne humeur qui ont égayé ces deux années passées au CESBIO : Pierre Louis, Pierre, Christophe, Lionel, Jean-Pierre, Malcolm, Florence et Gaëtan.

Lors de cette thèse j'ai eu la chance de travailler avec plusieurs instituts étrangers. Notamment avec Urs Wegmüller et Tazio Strozzi de Gamma Remote Sensing : la rigueur, la simplicité et leur efficacité dans leur travail vont rester pour moi comme des modèles. Le rôle de l'équipe de Martti Hallikainen a été déterminant par la rapidité et l'excellence de leur travaux dans le traitement des données HUSTCAT. Une mention spéciale à Marko Mäkinen pour ses réponses à mes nombreuses questions concernant le traitement. Restons en Scandinavie, mais cette fois en Suède, pour mes derniers remerciements et saluer l'équipe CARABAS, Lars Ulander en tête.

Enfin, avant de laisser le lecteur entamer cette thèse, je voudrais associer mes parents qui ne se doutaient pas que ce bébé né une fin d'après midi du mois de Septembre 74, finirait par être docteur. Ce n'est pourtant qu'un début, le meilleur reste à venir !

Liste des abréviations et acronymes

AMAP	Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes
Bande C	Fréquence 5,3 GHz, longueur d'onde 5,6 cm
Bande L	Fréquence 1,2 GHz, longueur d'onde 25 cm
Bande P	Fréquence 450 MHz, Longueur d'onde de 70 cm
Bande X	Fréquence 9.8 GHz, longueur d'onde 3 cm
CARABAS	Coherent All Radio Band Sensing
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 Développement
CNES	Centre National d' Etudes Spatiales
dB	Décibels
DBH	Diamètre à hauteur de poitrine
E.M.	Electromagnétique
ENGREF	Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts
ERS-1/2	Earth Resource Satellite
ESA	European Space Agency
EUFORA	European Forest Observations by Radars
FAO	Food and Agricultural Organisation of the United Nations
FOA	Defence Research Establishment
GHz	Giga Hertz
ha	hectare
HH	Emission polarisée Horizontalement-Réception polarisée Horizontalement
HV	Emission polarisée Horizontalement-Réception polarisée Verticalement
HUT	Helsinki University of Technology
HUTSCAT	Helsinki University of Technology SCATterometer
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut Géographique National
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
JERS-1	Japanese Earth Remote-Sensing Satellite
LANDSAT TM	Land Satellite, capteur Thematic Mapper
LCT	Laboratoire Commun de Télédétection
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MHz	Mega Hertz
ONERA	Office National D'Etudes et de Recherches Aérospatiales
ONF	Office National des Forêts
RADAR	RADio Detection And Ranging
RADARSAT	Radar Satellite, Satellite radar canadien
RT	Radiative Transfer (modèle de transfert radiatif)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar à Synthèse d'Ouverture)
SIG	Système d'Information Géographique
SIR-C	Spaceborne Imaging Radar-C
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
VHF	Very High Frequency
VV	Emission polarisée Verticalement- Réception polarisée Verticalement
X-SAR	Antenne radar bande X

Introduction

1. La ressource forestière

- 1.1 Situation de la forêt dans le monde
- 1.2 Fonctions productives des forêts
- 1.3 Fonctions écologiques des forêts
- 1.4 L'évolution des besoins en matière d'information sur les forêts

2. La télédétection radar appliquée aux milieux forestiers

- 2.1 Bref historique de la télédétection radar
- 2.2 Etat de l'art

3. Objectifs de l'étude

4. Approche méthodologique

- 4.1 Expérimentation
- 4.2 Analyse des données
- 4.3 Modélisation
- 4.4 Inversion

5. Description de l'étude

- 5.2 Contexte
- 5.2 Publications
- 5.3 Structure de la thèse

Chapitre 1 : Résumé des travaux

1. Recueil et analyse des données

- 1.1 Les sites d'études
- 1.2 Les campagnes de terrains : HUTSCAT'97 et RAMCAR'98
- 1.3 Bases de données forestières
- 1.4 Analyse des données

2. Modélisation électromagnétique

- 2.1 Présentation des modèles utilisés
- 2.2 Amélioration du modèle de transfert radiatif et interprétation des données HUTSCAT
- 2.3 La modélisation cohérente pour l'analyse des données basses fréquences

3. Application

- 3.1 Le diffusiomètre HUTSCAT pour une meilleure estimation de la hauteur des arbres
- 3.2 Estimation de la biomasse foliaire à l'intérieur de la canopée

Chapitre II : Expérimentation et modélisation

Article A

« **Measurements and modeling of vertical backscatter distribution in forest canopy** »

J.M Martinez, N. Flourey, T. Le Toan, A. Beaudoin M. Hallikainen, and M. Makynen, *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, Mars 2000, p 710-719.

Article B

« **On the retrieving of forest stem volume from VHF SAR data : observation and modelling**»

P. Melon, J.M. Martinez, T. Le Toan, N. Flourey, L.M.H. Ulander and A. Beaudoin, soumis à *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*

Chapitre III : Inversion

Article C

« **Estimation de la hauteur des peuplements forestiers par diffusiomètre radar**»

J.M. Martinez, A. Beaudoin, P. Durand, T. Le Toan, N. Stach, *Revue Canadienne de Recherche Forestière*, Décembre 2000, p 1983-1991.

Article D

« **Retrieving vertical foliage distribution using high resolution airborne scatterometer data** »

J.M. Martinez, T. Le Toan, E. Mushinzimana, M. Deshayes, soumis à *Tree Physiology*.

Chapitre IV : Conclusions et perspectives

1. Bilan de l'étude

2. Perspectives

Annexe 1 : Etude du potentiel de l'interférométrie radar pour la foresterie.

« **ERS INSAR data for remote sensing over hilly forested areas** »

T. Castel, J.M. Martinez, A. Beaudoin, U. Wegmuller, T. Strozzi, *Remote Sensing Environment*, Juillet 2000, p 73-86.

Annexe 2 : Cartographies des massifs forestiers par interférométrie radar : une étude sur plusieurs sites européens.

« **Landuse Mapping with ERS SAR Interferometry** »

T. Strozzi, P. Dammert, U. Wegmüller, J.M. Martinez, J. Askne, A. Beaudoin, and M.Hallikainen, *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, Mars 2000, p 766-775.

Annexe 3 : Synthèse de l'évaluation par télédétection des dégâts forestiers causés par les tempêtes de décembre 1999

Annexe 4 : Liste des communications réalisées dans le cadre de la thèse

Références bibliographiques