



INTRODUCTION

Introduction

1. La ressource forestière

1.1 Situation de la forêt dans le monde

« Nous savons bien des choses sur la lune mais nous ignorons l'étendue de la superficie terrestre qui est couverte de forêts et de terres boisées » écrivait Persson en 1974. Certes, la situation a quelque peu changé depuis cette citation, mais elle souligne bien la dichotomie entre le rôle omniprésent de la forêt dans l'histoire des civilisations et le manque de connaissances des écosystèmes forestiers. La forêt a toujours été en effet un enjeu économique, un lieu de pouvoir disputé mais aussi un lieu chargé de symboles culturels. En France, la première ordonnance étendant l'autorité royale à toutes les surfaces boisées date de 1669, indiquant le souci déjà ancien de contrôler les ressources de bois. Par la suite, l'intérêt n'a pas cessé de s'affirmer et l'on peut relever la phrase du ministre Martignac en 1827 lors de la promulgation du premier Code Forestier : « La conservation des forêts est l'un des premiers intérêts des sociétés, et par conséquent l'un des premiers devoirs des gouvernements ». Pourtant, il a fallu attendre la fin du 20^{ème} siècle pour que la perception et les préoccupations vis à vis de la forêt se modifient sensiblement. Car, si la crainte de voir s'épuiser la ressource de bois est millénaire, c'est seulement avec l'amélioration des savoirs et la fantastique accélération des techniques au cours de ce dernier siècle, que l'homme a pu réellement modifier les équilibres de régions entières. Notamment, en exploitant des zones jusque-là inaccessibles, et ce à la surface de tout le globe. Un tel pouvoir a conduit à des excès qui ont provoqué la prise de conscience par la communauté scientifique, puis par le grand public, de ce que les écosystèmes naturels sont fragiles et que les ressources naturelles, forestières en particulier, ne sont pas infinies. Pourtant, si l'attention est plus marquée il reste bien souvent à passer des paroles aux actes.

Jamais les pressions exercées sur les milieux forestiers n'ont été aussi fortes, notamment sous l'influence d'un monde en croissance démographique continue. Dans les pays pauvres, cette accélération se traduit par une forte demande en bois mais aussi par un besoin grandissant de terrains agricoles aux dépens des forêts. Dans les pays riches, où la demande en bois est aussi élevée, d'autres préoccupations viennent se greffer : la conservation de la diversité biologique, la préservation des paysages, et les nouvelles

demandes en matière de récréation et d'agrément. Dans un souci de clarté, il est pratique de regrouper en trois grands groupes les différents rôles de la forêt : la production de bois, son implication dans la biosphère, les aspects sociaux et culturels. Nous allons nous attacher à voir plus précisément les deux premières fonctions qui rentrent dans le cadre du travail de thèse.

1.2 Fonctions productives des forêts

Malgré l'évolution des préoccupations, la production de bois reste bien la fonction majeure et principale de la forêt. L'étude menée par la FAO à l'occasion du Forest Resource Assessment en 1990 (FAO 1995) le montre clairement. Différents usages y étaient dénombrés parmi lesquels la production de bois, le rôle de protection, la chasse, la réserve d'eau, la récréation. L'importance accordée à chaque usage y était classée en 3 catégories fort/moyen/faible. Il apparaissait, en Europe, que la production de bois était bien la fonction première, suivie de la chasse et de la récréation (figure 1). Cet ordre variera selon les continents, mais il est certain que la fonction de production de bois restera toujours prédominante.

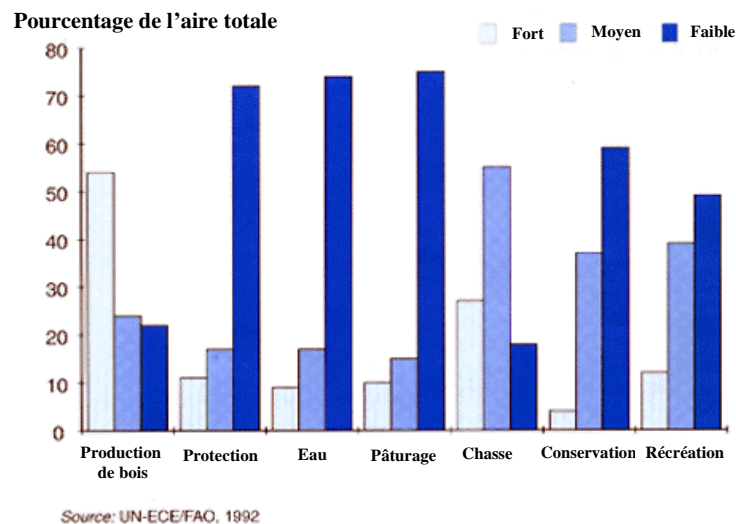


Figure 1 : Les différentes fonctions de la forêt (forêts publiques et privées incluses) en Europe. L'importance relative des niveaux d'attention (fort - moyen - faible) accordée à une fonction est évalué en terme de pourcentage de l'aire totale. (Source FAO 1995).

En effet, la demande de bois n'a cessé de croître au cours des dernières décennies en raison de l'expansion démographique et de l'accélération du développement économique. Entre 1961 et 1991 la consommation mondiale de bois a ainsi augmenté de 80% (FAO 1995). L'utilisation à des fins de combustible est la forme dominante d'usage dans les pays en voie de développement (80%), mais n'est que mineure dans les pays industrialisés (16%) où les utilisations courantes des produits ligneux sont la production de bois rond industriel, de bois de sciages et de pâte à papier.

Cette augmentation de la demande en bois se traduit par l'exploitation sans cesse de nouvelles terres. Ainsi, on estime que la moitié des forêts naturelles du monde (non modifiées par l'exploitation ou la sylviculture), principalement situées hors d'Europe, sont aujourd'hui « exploitables », c'est-à-dire qu'elles ne sont soumises à aucune restriction juridique et présentent un couvert forestier exploitable de manière rentable. La surface des forêts naturelles dans les pays en développement a réduit chaque année de 13,7 millions d'hectares au début des années 90 (FAO 1995), et au total la planète a perdu entre 1990 et 1995 une surface de 56,3 millions d'hectares de forêts, soit la superficie totale de la France. De plus, outre la perturbation directe des couverts forestiers, les opérations de récolte ont des impacts secondaires majeurs sur d'autres aspects de l'écosystème forestier (déstabilisation des sols, régulation des bassins versants, diminution de la diversité biologique).

Si l'on ne veut pas courir le risque de voir se tarir la ressource en bois et de se dégrader gravement l'environnement, il faut donc que les gouvernements prennent des décisions raisonnées et encouragent une gestion durable des forêts, à savoir une gestion qui tienne compte à la fois des intérêts économiques mais aussi écologiques et sociaux. L'aménagement forestier et la sylviculture ne doivent pas seulement avoir pour fonction de renforcer la croissance des arbres et des forêts, mais aussi de faire en sorte que la qualité des arbres produits soit améliorée et que l'environnement soit protégé. Le débat est donc centré sur les efforts à produire pour maintenir un équilibre entre production et protection.

Pour surveiller les milieux forestiers et éventuellement intervenir face aux problèmes qui se dressent, il y a un besoin grandissant de supports d'informations. Parmi les produits d'informations on pourra distinguer ceux touchant à la cartographie et ceux liés au suivi des ressources. Les données cartographiques donneront des informations sur l'étendue des surfaces forestières, les usages du sol, l'inventaire des différents types forestiers et l'inventaire de la ressource en bois à travers l'estimation de paramètres liés à la biomasse comme le volume de bois sur pied (m^3/ha ou tonnes/ha), la surface terrière

(m²/ha), la hauteur des arbres ou l'indice de fertilité local. Le suivi de la ressource permettra de connaître l'évolution des déboisements ou des régénérations, l'état sanitaire des peuplements et l'impact de catastrophes naturelles (incendies, tempêtes).

Ces informations doivent être obtenues à plusieurs échelles spatiales. Une information fine peut être nécessaire à des gestionnaires nationaux ou régionaux. A l'inverse des informations globales peuvent être utiles aux gestionnaires locaux. Il faut donc développer des solutions multiples, pouvant intéresser le gestionnaire local mais aussi les responsables des inventaires nationaux. Se pose donc le problème de disposer d'informations spatialisées, dont les protocoles de mesures sont non-dépendants du site ou du pays afin qu'elles puissent être utilisées par toutes les personnes impliquées dans la gestion et le suivi des ressources forestières.

1.3 Fonctions écologiques des forêts

Les forêts sont impliquées dans nombre de processus écologiques aussi bien en relation avec l'atmosphère qu'avec le milieu terrestre (cycle du carbone, cycle de l'eau, biodiversité végétale et animale) dans lesquels elles jouent souvent un rôle de protection.

On peut affirmer que les forêts naturelles sont certainement les plus grandes dépositaires de la diversité biologique terrestre. Raven (1988) a ainsi estimé que deux tiers à trois quarts de la biodiversité totale se trouvent dans les forêts, tropicales surtout. Ainsi, le taux de déforestation élevé de ces forêts peut conduire à une réduction du nombre des végétaux comme des animaux.

L'implication des forêts dans la régulation de la biosphère continentale peut être appréciée à plusieurs niveaux. Les forêts jouent par exemple un rôle important dans la régulation du cycle hydrologique. Quand une pluie tombe sur une forêt, une partie de l'eau est interceptée par certaines parties de la plante et par la suite s'évapore. La pluie qui atteint le sol s'infiltré en profondeur ou coule à sa surface avant de finir dans le réseau hydrographique. Le passage de l'eau à travers l'écosystème forestier est influencé par un certain nombre de facteurs tels que la couverture végétale, les propriétés du sol, la topographie. Des variations dans le couvert suite à des coupes, des reboisements ou d'autres causes peuvent affecter le cycle de l'eau, notamment dans le rapport précipitations/ruissellement dans les bassins versants.

La végétation forestière affecte également le climat. Elle peut effectivement absorber une plus grande partie du rayonnement solaire incident par rapport à la terre dénudée diminuant ainsi l'albédo de la surface. Cette variation peut affecter le bilan thermique

régional et donc le climat. On peut citer également l'impact du couvert forestier sur la circulation des courants d'air (on parle de rugosité de surface).

Les concentrations croissantes de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère sont reconnues comme l'une des principales causes de changement climatique (Schimel *et al.* 1995). Or, les forêts contribuent activement au cycle du carbone (C) et interviennent donc dans les changements du climat mondial. Les forêts font office de réservoir, de puits mais aussi de sources de gaz à effet de serre. En tant que réservoir, elles stockent le carbone dans la biomasse et dans les sols; en tant que puits, elles absorbent le CO₂ contenu dans l'atmosphère en fonction de leur surface et de leur productivité. A l'inverse, elles sont émettrices de carbone lors de la combustion et de la décomposition de la biomasse ainsi que des altérations infligées aux sols entraînant des émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre. A l'heure actuelle, les émissions de CO₂ attribuables aux changements dans l'utilisation des sols, notamment au déboisement dans les régions tropicales, représenteraient près de 20 % des émissions de CO₂ dues aux interventions humaines à l'échelle mondiale (Schimel *et al.*, 1995).

L'estimation des stocks de carbone varie énormément selon les études et les modèles utilisés. Il convient donc de prendre avec précaution les chiffres avancés par les différents travaux existants. A titre d'ordre de grandeur, on peut citer les travaux de Brown qui indiquent que l'ensemble des écosystèmes forestiers du monde contiennent 830 giga tonnes de carbone, 40% dans la végétation et 60 % dans les sols. Cette même étude montre que les bilans de carbone des forêts des pays tempérés et boréaux sont à l'heure actuelle un puits net de carbone atmosphérique, d'environ 0,7 Pg/an, mais que les zones tropicales sont une source nette d'environ 1,6 Pg/an. Au total, les forêts du monde seraient donc une source de CO₂ de $0,9 \pm 0,5$ Pg/an (Brown, 1997). Ces chiffres sont à comparer à celui de la quantité de carbone provenant de l'utilisation de combustibles fossiles, qui est de l'ordre de 5,5 giga tonnes. Il apparaît donc aujourd'hui que les forêts ne contribuent que faiblement à l'accumulation du CO₂ dans l'atmosphère. Ceci pourrait pourtant changer dans le futur, en particulier si l'âge moyen des forêts tempérées et boréales augmentait globalement (suite en particulier au classement en aires protégées d'une proportion significative de celles-ci).

Le rôle joué par les forêts dans l'atténuation des changements climatiques de la planète a été reconnu prioritairement dans le protocole de Kyoto. Ce dernier prévoit des clauses contraignantes en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre par les pays industrialisés. Des dispositions encouragent notamment ces pays à investir sur leurs

propres territoires mais aussi à l'extérieur, dans des activités forestières qui augmentent le captage du carbone et/ou réduisent les émissions.

Une bonne gestion des ressources forestières peut contribuer à réduire les émissions nettes, que ce soit par une diminution de la part des forêts au niveau mondial, ou par une promotion de leur rôle en tant que puits de carbone. Or, l'adaptation de la gestion forestière à une augmentation de la fixation du carbone et à une diminution des émissions passe par une meilleure connaissance de l'état et de l'évolution dans le temps de la biomasse des écosystèmes forestiers. Nombre de ces besoins se recoupent avec ceux exprimés par la fonction productive. Seules les échelles diffèrent, car de nombreux modèles de fonctionnement visant à estimer les ressources en terme de carbone fixé et leur évolution travaillent à une échelle globale avec des résolutions spatiales kilométriques. Ces approches pèchent par la validation et l'incertitude qu'il convient généralement d'associer aux résultats produits. Il reste donc beaucoup de travail à effectuer pour préciser à la fois le rôle des forêts dans les changements climatiques et l'impact de ces éventuels changements sur l'évolution des milieux forestiers.

1.4 L'évolution des besoins en matière d'information sur les forêts

Historiquement, les inventaires forestiers ont été entrepris pour évaluer les ressources en bois exploitables. Au milieu du 19^{ème} siècle, les premiers inventaires consistaient souvent à pointer systématiquement les arbres désignés à être exploités, avant que les techniques d'échantillonnages soient introduites (Peng 2000, Perrson et Janz 1997). Par la suite, l'estimation des changements et des accroissements a été renforcée nécessitant la répétition des inventaires, conduisant au suivi d'année en année de placettes de mesures fixes. L'apparition dans les années 50 de la photographie aérienne a constitué une révolution en ce qu'elle permettait de couvrir des grandes étendues avec une bonne précision. Cette technique est sans doute la plus fiable actuellement pour la cartographie et l'estimation des surfaces boisées. Pourtant, le travail de terrain n'a pas toujours diminué dans la mesure attendue. L'estimation de paramètres dendrométriques par exemple (volume sur pied, hauteur) restant difficilement accessible autrement que par les mesures terrains.

Néanmoins, si à l'origine l'estimation de la ressource forestière était réalisée à des fins de production, nous venons de voir que la forêt n'est pas qu'une réserve de bois. Le rôle écologique de la forêt en tant que réserve de la biodiversité ainsi que son importance dans les changements climatiques sont en passe de devenir des priorités tout aussi déterminantes que les fonctions de production. Les demandes liées à l'estimation des

ressources forestières touchent désormais aussi bien la production que les préoccupations environnementales. Les tableaux 1 et 2 résument différents types d'informations recensés par le groupe de travail Pléiades du CNES (Jolly et Le Toan, 2000), réunion d'experts forestier et de télédétection visant à définir les demandes et les moyens d'y répondre en matière de forêt. Les experts ont segmenté les principaux produits d'information en trois classes : cartographie des ressources, suivi des ressources, la troisième catégorie recensant les informations en matière de risques de déboisements et d'incendies de forêts.

Si les besoins sont bien cernés, il reste à déterminer quels types d'approches il faut appliquer pour répondre aux demandes exprimées. A la vue des tableaux 1 et 2, il apparaît que l'on peut classer à notre tour en deux catégories les techniques à développer : celles permettant de cartographier les massifs forestiers et celles touchant à l'inversion de variables forestières d'intérêts. La première classe recouvre la cartographie des surfaces forestières, l'inventaire des types forestiers, l'état sanitaire des forêts, l'impact de catastrophes naturelles (incendies, tempêtes, attaques parasitaires). L'inversion de variables regroupe l'évaluation des ressources en bois, les accroissements en biomasse, le suivi des régénérations, le volume de coupes. Pour l'inversion, la variable

Description	Fonction concernée	Précision géométrique	Fréquence de mise à jour
<ul style="list-style-type: none"> • Zone boisées/non boisées • Usage du sol (forêt, agriculture, urbain) • Suivi des déboisements et reboisements 	(Production) Ecologie	Faible à moyenne (1 :200000)	1 à 5 ans
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaires et suivi des types forestiers 	Production Ecologie (Protection)	Elevée (1 :10000) A Moyenne (1 :200000)	1 à 5 ans
<ul style="list-style-type: none"> • Suivi des types forestiers vulnérables ou à fonction de protection (érosion, ressource en eau), habitats 	Ecologie (Protection)	Elevée (1 :10000 à 1 :25000)	5 ans
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire de la ressource en bois 	Production (Ecologie)	Elevée (1 :25000) à moyenne selon les régions du globe	5 ans

Tableau 1 : Evaluations des besoins en matière de cartographie des ressources forestières.

(Source groupe Pléiades (Jolly et Le Toan 2000))

Description	Fonction concernée	Précision géométrique	Fréquence de mise à jour
• Suivi de la ressource en bois	Production Ecologie	Moyenne (1 :50000 à 1 :200000)	1 an
• Evaluation et suivi des stocks de carbone	Ecologie	Moyenne à faible (1 :50000 à 1 :200000)	5 ans
• Suivi des régénérations	Ecologie (Protection)	Moyenne	1 à 5 ans selon les milieux
• Etat sanitaire	Ecologie Protection Production	Elevée (1 :10000 à 1 :25000)	1 an
• Impact de facteurs biotiques ou abiotiques (incendies, tempêtes, attaques d'insectes,...) → cartographie des dégâts	Ecologie Production (Protection)	Elevée (1 :25000) à moyenne (1 :100000)	Occasionnel mais Délais très courts (→ archives indispensables)

Tableau 2 : Evaluations des besoins en matière de suivi des ressources forestières. (Source groupe Pléiades (Jolly et Le Toan 2000))

à atteindre sera différent selon le type d'application. Si l'on parle de biomasse en terme de production, on cherchera à obtenir le volume de bois sur pied (matière vivante du tronc exprimé en m³/ha ou en tonnes/ha) ou d'autres paramètres corrélés comme la hauteur des arbres. Pour un écologue la même estimation sera faite en terme de stock de carbone (matière sèche) ou de surface foliaire (indice foliaire m²/m²).

Les tableaux 1 et 2 définissent pour chaque information la précision géométrique avec laquelle doivent être traités les problèmes. On y remarque que les besoins sont très disparates et qu'il n'existe pas une seule résolution spatiale capable de répondre à tous les besoins. De même, le besoin de réactualisation de l'information varie de quelques jours (quelques heures ?) dans la cas de cartographies de dégâts à plusieurs années pour la cartographie des types forestiers.

Ce foisonnement de demandes nécessite de nouvelles techniques, parmi lesquelles la télédétection apparaît comme la plus prometteuse. La télédétection offre en effet la possibilité d'étendre à différentes échelles spatiales l'estimation de paramètres d'intérêts (surfaces forestières, niveau de biomasse). Mis en parallèle avec le développement des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), cette technique ouvre de nouvelles voies d'analyse des données en permettant de croiser des informations provenant de plusieurs sources. Toutefois, si séduisantes que puissent être ces méthodes, elles n'ont pour

l'instant pas supplanté les techniques traditionnelles. Le problème est que les techniques sont jugées par les gestionnaires forestiers comme souvent incompatibles avec leurs besoins. En effet, à l'heure actuelle les méthodes utilisant de manière opérationnelle la télédétection afin d'estimer différents paramètres forestiers (surface, niveau de biomasse) sont effectuées à des échelles globales (avec des résolutions kilométriques) et à l'aide de méthodes supervisées. Ces informations sont utiles pour les écologues travaillant à l'échelle de la biosphère terrestre pour prédire les tendances en matière d'évolution du taux de carbone ou des climats. Elles sont utiles également pour les organisations internationales ayant pour missions de suivre et de prévoir les évolutions des écosystèmes naturels. Mais, il y a encore un fossé entre ces méthodes et les besoins d'une information spatialisée et quantitativement précise. Le défi est aujourd'hui de développer des méthodes fiables à l'échelle régionale et locale, faiblement ou non supervisées, qui pourraient être ensuite utilisées pour des estimations globales. De tels procédés seraient alors utiles à toutes les personnes concernées par la gestion et la préservation des écosystèmes forestiers.

2. La télédétection radar appliquée aux milieux forestiers

2.1 Bref historique de la télédétection radar

La récente histoire de la télédétection dans le domaine des micro-ondes, appelée communément télédétection radar prend ses racines dans le développement de technologies à des fins militaires. On cite habituellement les recherches sur les radars de surveillance par la Royal Air Force au Royaume-Uni, au début de la deuxième guerre mondiale, comme la première tentative d'utilisation du potentiel des ondes électromagnétiques à des fins de détection. Si depuis les développements civils ont été nombreux, les traces de cette origine sont encore présentes, ne serait-ce que dans les noms codés des bandes de fréquences utilisées (on parle de bande C, X, L, P) ou du vocabulaire couramment employé (« cibles » au lieu de diffuseurs).

Les premiers efforts sérieux visant à chercher à caractériser et comprendre comment les micro-ondes interagissent avec les milieux naturels datent de la deuxième moitié des années 50. Notamment grâce à l'équipe de William Peake de l'Ohio State University, qui produisit les premières tables de mesures sur la rétrodiffusion de surfaces naturelles à 10, 15 et 35 Ghz. Les premières observations de la terre à partir de l'espace au moyen de capteurs radars datent du début des années 70 avec le laboratoire spatial Skylab de la NASA. Mais il a fallu attendre 1978 pour voir le premier satellite radar, Seasat, qui

malgré sa courte vie et ses faibles performances radiométriques au regard de ce qui se fait aujourd'hui, a permis de montrer le potentiel des données micro-ondes pour l'étude de nombreuses thématiques (océanographie, géologie, hydrologie, étude des milieux terrestres). A partir des années 80 les expériences se sont suivies à un rythme soutenu, on peut citer parmi elles, les missions des navettes spatiales (SIR-A,-B et -C), avant d'arriver aux lancement des satellites désormais bien connus ERS (1 et 2) de l'Agence Spatiale Européenne, de J-ERS de l'agence spatiale japonaise et du satellite canadien RADARSAT 1 (tableaux 3 et 4).

Satellites	Années en opération	Configuration radar	Résolution
Seasat	1978 (105 jours)	Bande L Polarisation HH	25 m
JERS-1	1992-1998	Bande L Polarisation HH	18 m
SIR-C/X-SAR	1994 (2 X 10 jours)	L,C,X Polarimétrique	30 m
ERS-1	1991 - 2000	Bande C Polarisation VV	25 m

Tableau 3 : Systèmes SAR passés, sur plates-formes spatiales.

Satellites	Date de lancement	Configuration radar	Résolution
ERS-2	1995	Bande C Polarisation VV	25 m
RADARSAT-1	1995	Bande C Polarisation HH	10-100 m

Tableau 4 : Systèmes SAR en service, sur plates-formes spatiales.

Pour synthétiser les efforts produits pendant cette période de quarante ans, on peut subdiviser le domaine en quatre grandes catégories (Ulaby, 1998): (a) les développements techniques, avec les développements des radar à synthèse d'ouverture (RSO ou SAR en anglais) puis les constants progrès faits dans le traitement des données ou la calibration ; (b) les pré-traitements des images produites comme l'orthorectification des images, le géocodage ou les traitement du speckle (chatoiement en français), bruit de fond propre aux images radars ; (c) la modélisation électromagnétique afin de mieux comprendre les interactions entre l'onde émise par le capteur et les milieux étudiés ; (d) la mise au point d'algorithmes d'inversion robustes à des fins d'applications. Si les progrès ont été phénoménaux dans les deux premiers domaines, les efforts de modélisation n'ont pas encore permis de pleinement comprendre ce que « voit » un capteur radar lorsqu'il mesure l'amplitude et la phase de l'onde radar rétrodiffusée par

une surface naturelle selon les configurations utilisées. Enfin, les résultats applicatifs sont aujourd'hui encore bien trop limités pour être jugés satisfaisants.

2.2 Etat de l'art

Le domaine de la télédétection des milieux forestiers a été marqué de grandes avancées, ces dix dernières années. Cette section présente une revue synthétique des principaux résultats obtenus en télédétection radar, en distinguant les travaux sur la cartographie des zones forestières et ceux effectués sur l'inversion de variables descriptives des couverts forestiers.

Les résultats obtenus et les méthodes utilisées dépendent du type de capteur employé. Les capteurs expérimentaux, la plupart aéroportés, ont des configurations riches (plusieurs fréquences, plusieurs polarisations), au contraire des satellites opérationnels qui ont des configurations limitées. En effet, l'allocation des fréquences et la nécessité d'utiliser des antennes de taille réduite pour réduire l'encombrement du satellite, a poussé les concepteurs à n'utiliser que des capteurs opérant dans le domaine des longueurs d'ondes allant de la bande X (3 cm) et C jusqu'à la bande L (25 cm). A l'heure actuelle, les plates-formes précitées n'utilisent qu'une polarisation et une seule incidence à l'exception de RADARSAT qui travaille selon plusieurs « modes » à la fois en résolution (30 m et 500 m) et en incidences (de 23° à 53 °).

La disponibilité de plusieurs canaux autorise l'utilisation de méthodes empiriques et supervisées à la manière de ce qui se fait en télédétection optique et infrarouge. Ils permettent également de développer des algorithmes complexes basés sur la connaissance physique des mécanismes d'interaction entre l'onde électromagnétique et les couverts forestiers. A l'opposé, l'utilisation des données de satellites impose de développer des algorithmes et des techniques spécifiques qui exploite au mieux le peu de canaux à disposition. Nous séparerons donc ce qui se fait à l'aide des instruments expérimentaux, qui préfigurent les capteur futurs, des méthodes utilisant les données spatiales.

Enfin, il convient de distinguer le niveau d'opérationnalité des travaux présentés. Pour la plupart il s'agit de résultats de recherches demandant à être validés. Certains travaux sont à un niveau de démonstration, c'est-à-dire que des algorithmes sont appliqués en grandeur réelle sur des scènes entières et validés de manière objective. Le dernier stade est le niveau opérationnel, quand les résultats de recherche ont passé avec succès les stades de la démonstration et de la validation.

2.2.1 Cartographie des zones forestières

La cartographie des zones forestières recouvre, on l'a vu, la caractérisation des types d'occupations des sols et des zones boisées/non-boisées, la détection de changements dans les couverts consécutifs à des catastrophes ou des attaques parasitaires, ainsi que l'inventaire des types forestiers (discrimination des espèces et de la structure des peuplements).

Capteurs expérimentaux :

De nombreuses méthodes utilisent les données multi-polarimétriques. Une onde électromagnétique est polarisée, c'est-à-dire que son champ électrique est orienté dans l'espace selon une direction privilégiée. On utilise généralement des polarisations linéaires (dites verticales ou horizontales). L'intérêt réside dans la sensibilité aux propriétés géométriques des cibles : une onde polarisée verticalement interagira préférentiellement avec les éléments du couvert verticaux (le tronc par exemple) alors qu'une onde polarisée horizontalement aura tendance à interagir avec les éléments horizontaux du couvert. La polarisation employée influera donc sur les mécanismes. Afin d'exploiter cette sensibilité, l'idée de nombreux travaux a été de cartographier des types d'occupations du sol et les massifs boisés en fonction de leur principaux mécanismes de rétrodiffusion (Cloude et Pottier, 1996 ; Freeman et Durden 1998). Dans l'algorithme proposé par Freeman et Durden, les surfaces sont ainsi classées : rétrodiffusion de volume ou multi-diffusion pour la végétation, rétrodiffusion de Bragg pour une surface, et double réflexion ou « effet de coin » pour les zones urbaines. Toutefois, en pratique un seul mécanisme ne suffit pas à caractériser un thème et dans le cas de la forêt la classification doit être adaptée à la longueur d'onde utilisée.

Cartographier diverses essences au sein de forêts reste à l'heure actuelle difficile au moyen des données radar. La sensibilité du coefficient de rétrodiffusion aux caractéristiques structurales des couverts devrait permettre de discerner diverses espèces. Toutefois, à l'exception de quelques travaux théoriques (Floury, 1999, Imhoff 1995), il existe très peu d'études montrant la possibilité de discriminer des structures différentes de peuplements. En effet, la saturation du signal pour les faibles biomasses permet difficilement de discerner quelconques évolutions du signal parmi des peuplements matures. Néanmoins, on peut citer les travaux de Imhoff (1997) sur des plantations tropicales éparses à faible biomasse qui donnent des bons résultats pour discerner des groupes de végétation différant par leur structure et leur type floristique.

Des techniques, non plus basées uniquement sur l'analyse de l'intensité du coefficient de rétrodiffusion, mais aussi sur sa distribution spatiale (texture), sont prometteuses. Il s'agit alors de discerner des forêts présentant des structures très différentes (au niveau de l'arbre et de l'arrangement spatial des individus au sein d'un peuplement) grâce à l'utilisation de données aéroportées haute résolution. De bons résultats sont en particulier obtenus dans les forêts tropicales pour discriminer forêts primaires et secondaires (Saatchi et al., 2000, Oliver 1998).

Les données de satellites :

Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années sur le développement de méthodes de cartographie de la forêt à partir de données de satellites (type ERS). La plupart des algorithmes existants se base sur l'analyse de la variation au cours du temps de l'intensité du signal mesuré par le capteur (coefficient de rétrodiffusion). Les forêts se caractérisent par la stabilité temporelle de leur signature radiométrique au contraire d'autres thèmes d'occupation du sol (agriculture, eau, landes). L'utilisation d'une série temporelle d'images, en discriminant les aires où aucun changement de rétrodiffusion n'est apparu (ou dans une faible amplitude qu'il conviendra de fixer avec un seuil de rejet), permettra donc de discerner les forêts des zones non-boisées. Diverses techniques ont été utilisées pour quantifier les changements radiométriques dans une série temporelle d'images, parmi lesquelles on peut citer les travaux de Quegan et Le Toan (Quegan et Le Toan 1998, Quegan et al. 2000). Toutefois, ces méthodes présentent la limitation de ce que les règles de décision (souvent par un simple seuil) sont à affiner selon le site et les dates d'acquisitions.

La cohérence interférométrique à passages répétés par le même satellite consiste à combiner (corrélation complexe) le signal de deux images acquises à des dates différentes et sur le même site (voir Annexe 1). Ces changements peuvent être partiellement reliés aux propriétés biophysiques et structurales des types d'occupation du sol. De manière générale, les couverts montrent des cohérences faibles dues à l'agitation de la végétation sous l'effet du vent (décorrélation temporelle). A l'inverse, les sol nus ou les zones urbaines sont des surfaces géométriquement plus stables et exhibent des cohérences élevées. A l'aide de ces observations, diverses études ont donné d'excellents résultats (Strozzi et Wegmuller 1997) lorsque l'on classe des thèmes simples (taux de bonne classification forêt/non-forêt supérieur à 90%). La principale limitation réside dans la disponibilité des données, la plupart des études utilisant des données ERS acquises avec un intervalle de 24h (passage successifs de ERS 1 et 2), mode qui n'est plus exploitable

depuis l'arrêt définitif d'ERS-1 en Mars 2000. Des solutions utilisant des images acquises à 35 jours d'intervalle sont proposées, mais les résultats sont sensiblement inférieurs.

La survenue d'une catastrophe naturelle (tempête, incendie, attaque parasitaire) ou les interventions humaines (coupes, reboisements) induisent des changements dans le couvert forestier qui sont susceptibles d'être détectables par un capteur radar. La cartographie de ce type d'événements requiert une bonne répétitivité temporelle des acquisitions (journalières), ou une plus grande flexibilité des acquisitions, et une résolution suffisante. Les algorithmes se basent sur les mêmes principes que la cartographie des zones boisées et non-boisées, à savoir l'analyse du coefficient de rétrodiffusion et de ses variations au cours du temps, et l'interférométrie. Il apparaît d'ores et déjà que la télédétection radar, par sa possibilité d'observation tout temps (jour et nuit et quelles que soient les conditions météorologiques) présente un potentiel important. Plusieurs études ont ainsi montré que l'utilisation de données ERS, J-ERS et interférométriques est pertinente pour cartographier les incendies ainsi que la déforestation dans les forêts tropicales (Kwoh et al. 1997, Ribbes et al. 1997).

Les travaux venant d'être cités sont tous des travaux de recherche acquis sur des sites connus par leurs auteurs et qui ainsi ont nécessité des phases aller-retour entre le développement des algorithmes et la validation sur le site d'étude. L'opérationnalité d'un algorithme se juge à son efficacité lorsqu'il est appliqué à des scènes entières dont on ne connaît que peu d'informations a priori. A ce titre, il est utile de citer les résultats venant d'études de démonstration. Nous allons ici utiliser les travaux du projet européen FMERS (Forest Monitoring in Europe with Remote Sensing), et l'étude qui a porté sur la cartographie des dégâts survenus dans les forêts françaises lors du passage des tempêtes exceptionnelles de fin 1999 (Annexe 3).

Le projet FMERS (Häme et al. 1998) visait à comparer la précision de la cartographie des massifs forestiers à partir de données de satellites optiques/infrarouges (LANDSAT/SPOT/IRS, Resurs) et radar (ERS). L'objectif était de cartographier, sur six sites répartis en Europe, les zones boisées et non-boisées, puis de discriminer plusieurs types forestiers (conifères majoritaires, feuillus majoritaires, mixtes conifères-feuillus, autres). Pour la cartographie forêt/non-forêt, les données radar ont donné des résultats égaux voire meilleurs que les données SPOT et Landsat (80-95% de bonne classification). L'analyse radar portait sur des séries temporelles d'images, de 2 à 15 images. L'usage de deux images optimales (choisies en fonction de la saison et du type site : boréal/tempéré) s'avérait presque aussi pertinent qu'une série entière d'images. Toutefois, la cartographie de différents types forestiers s'est avérée impossible avec les données ERS

alors que les données des autres satellites permettaient de discriminer entre 2 et 4 types forestiers, mais avec une précision assez médiocre (40-70%).

L'Inventaire Forestier National (IFN) a validé l'étude menée en Janvier 2000 et qui visait à cartographier les dégâts causés par les tempêtes de fin 1999. La validation a montré que l'interférométrie donnait les meilleurs résultats (50% de bonne classification) devant l'optique puis l'analyse multi-temporelle. Les conditions défavorables d'observations pendant la période d'étude (hiver) expliquaient pour parti la faiblesse des résultats et la précision finale a été jugée non compatible avec une phase opérationnelle. Toutefois, ce test « grandeur nature » indique l'intérêt évident des données interférométriques pour la cartographie forêt/non-forêt et le suivi des changements survenant dans les couverts.

2.2.2 Inversion de variables descriptives des couverts

Différents paramètres d'intérêts peuvent être estimés à partir de données de télédétection. Parmi ces variables on trouve le volume de bois sur pied, la surface terrière, la hauteur des arbres, la biomasse foliaire. Nous allons ici répéter la distinction capteurs aéroportés / capteurs sur satellites. L'utilisation de capteurs aéroportés s'est en effet avérée déterminante pour étudier expérimentalement la sensibilité du signal au niveau de biomasse en fonction de différentes configurations.

Capteurs expérimentaux :

De manière générale, le signal rétrodiffusé par un couvert forestier est la somme des contributions de la couche de végétation et du sol. A mesure que la végétation croît, l'atténuation du milieu augmente et par conséquent la contribution du sol diminue. Selon les niveaux respectifs de la rétrodiffusion du sol et de la végétation, le coefficient de rétrodiffusion peut croître ou décroître avant d'atteindre le niveau de saturation, le niveau à partir duquel une augmentation de biomasse ne se traduit plus par une augmentation du signal rétrodiffusé. Une onde aura tendance à interagir de manière préférentielle avec les éléments du couvert de la même taille que sa longueur d'onde. Ainsi, il est reconnu que les bande X et C sont principalement sensibles aux plus petits éléments du couvert, à savoir les aiguilles et les feuilles, tandis que plus la fréquence diminue plus on sera sensible à des éléments grands comme les troncs et les branches primaires. Ainsi, les principales sources de rétrodiffusion en bande L semblent être les branches secondaires et primaires (Castel 1998). En bande P (450 Mhz, 0,7 m),

différentes études ont montré (Le Toan et al. 1992, Hsu et al. 1994, Beaudoin et al. 1994) que les branches primaires étaient le principal diffuseur suivi du tronc.

Si l'on cherche donc à atteindre des grandeurs comme le volume sur pied ou d'autres variables corrélées à la quantité de biomasse totale (hauteur, surface terrière), l'utilisation de grandes longueurs d'ondes semble la plus appropriée. Toutefois, le lien physique unissant les caractéristiques structurales du couvert au signal mesuré posent des problèmes de robustesse, puisque ces caractéristiques structurales sont différentes selon les espèces, et peuvent varier au cours de la croissance des arbres.

L'estimation de la biomasse foliaire peut se faire en terme de matière sèche ou d'indice foliaire (surface foliaire par unité de surface terrain généralement exprimée en m^2/m^2). L'estimation de tels paramètres reste un problème épineux, puisque il existe un grand nombre de méthodes d'estimations indirectes (au sol et par télédétection optique/infrarouge) et qui donnent des résultats divergents. Comme cela se fait en télédétection optique, il est possible d'estimer la biomasse foliaire à partir de la combinaison de différents canaux. Il s'agit d'approches empiriques, consistant à calibrer des relations liant le coefficient de rétrodiffusion à la biomasse foliaire à partir d'un jeu de placettes d'entraînements. Quelques études (Bergsen et Dobson 1999, Kimball et al. 2000) ont ainsi montré la faisabilité de telles méthodes à partir de données de capteurs multi-fréquences et polarimétriques et sur des sites bien maîtrisés. La généralisation de telles approches reste à démontrer.

Données de satellites :

Les études menées ont surtout porté sur les milieux tempérés et boréaux. En bande C, le coefficient de rétrodiffusion est sensible à la biomasse jusqu'à 100 m^3/ha en moyenne (Pulliainen et al. 1994), avec une dynamique variant de 1-2 jusqu'à 4-5 dB selon les sites. Dans ces configurations, la contribution du sol nu est aussi forte que celle de la végétation et apparaît très sensible en fonction de sa rugosité et de sa teneur en eau, ce qui explique bien souvent la variabilité des relations observées en fonction des sites et des périodes d'observations. A plus grande longueur d'onde, en bande L, la dynamique du signal est plus limitée qu'en bande C, en général de 2 dB, alors que le niveau de saturation est atteint plus haut, autour de 200 m^3/ha en moyenne. L'étude des données multi-incidences RADARSAT a montré également une perte de sensibilité à mesure que l'incidence augmente (Floury 1999). On peut donc conclure que l'estimation des volumes de bois est limitée avec les capteurs satellites actuels et restreinte aux faibles classes de volume.

L'utilisation de la cohérence interférométrique est ici aussi intéressante, notamment en repoussant le niveau de saturation. La cohérence décroît avec la biomasse, à mesure que la contribution du sol diminue (fortement cohérente) et que la contribution de la végétation (faiblement cohérente) croît. Plusieurs études ont montré une sensibilité jusqu'à 500 m³/ha (Smith et al. 1998, Annexe 1). Toutefois, la variabilité des relations, en fonction des conditions environnementales rencontrées (vent, pluie, types de sols, topographie) rend difficile le développement d'algorithmes robustes à partir de la seule cohérence.

L'estimation de la hauteur des arbres est le sujet d'étude de nombreux travaux à partir de techniques très variées. Estimer directement la hauteur à partir de données satellitaires est impossible. L'inversion se fait donc par des relations empiriques liant l'intensité du signal mesuré à la biomasse (LAI, volume de bois) qui peut être, ensuite, corrélée à la hauteur. Hyypä et al. (2000) montrent que de telles méthodes donnent des résultats très proches quelque soient les capteurs avec une précision relative variant entre 36 et 42%.

En utilisant l'interférométrie radar, l'analyse des déphasages des ondes entre les deux acquisitions permet de retrouver des informations utiles sur la hauteur des surfaces. Cette technique a été appliquée pour la génération de Modèles Numériques de Terrains (MNT) (Zebker et al. 1994, Massonnet et Rabaut 1993). Si l'on possède déjà un MNT sur un site il est possible de retrouver la hauteur des arbres en retranchant de l'altitude déduite par interférométrie (haut de la canopée) l'altitude donnée par le MNT (surface du sol). Si séduisante que soit cette technique, les résultats sont à l'heure actuelle très variables (Hagberg et al. 1995, Beaudoin et al. 1995), et la précision est au mieux de quelques mètres quand les inversions ne donnent pas parfois des hauteurs ... négatives ! Il s'avère en effet que la hauteur varie en fonction de la pénétration de l'onde et de la contribution relative du sol (Floury 1999). De plus, la qualité de l'estimation des déphasages est déterminée par le niveau de cohérence. Or, la cohérence est faible au dessus des couverts forestiers ce qui affecte donc la précision des estimations.

3. Objectifs de l'étude

Nous venons de voir brièvement que la télédétection radar présente un potentiel important pour l'étude des forêts mais que de nombreuses limitations ont également été démontrées. L'objectif de cette thèse est de poursuivre les travaux engagés dans le domaine de la télédétection radar mais dans une voie originale. L'étude se propose ainsi de :

- **Explorer le potentiel de nouveaux systèmes radars** pour l'extraction de variables d'intérêts. L'utilisation des **très basses fréquences** (bande VHF) doit permettre d'obtenir une plus grande dynamique en fonction de variables liées à la biomasse (volume, surface terrière). Les instruments classiques ne possèdent pas de résolution verticale permettant de caractériser le milieu dans sa dimension verticale. Les **radars sondeurs** aéroportés apportent une solution en fournissant la distribution du signal dans le couvert forestier en fonction de la hauteur avec une haute résolution. De telles données peuvent être extraites des variables comme la hauteur des arbres et la répartition de la biomasse à l'intérieur des houppiers.
- **Poursuivre les travaux de modélisation théorique** visant à mieux comprendre comment le signal radar est relié aux variables géophysiques et biophysiques des couverts. Ceci à l'aide de **modèles de diffusion radar couplés à un modèle de croissance d'arbre** (AMAP) fournissant une description fine de la végétation. La comparaison des simulations avec les données expérimentales permettra de valider les modèles qui seront utilisés ensuite pour interpréter les observations en terme de mécanismes d'interactions et de diffuseur prépondérant.
- **Etendre les possibilités des capteurs actuels à travers l'utilisation de méthodes originales**. Notamment l'interférométrie à partir des satellites ERS pour la cartographie des milieux forestiers : discrimination forêt/non-forêt, conifères-feuillus.

L'écriture de la thèse se focalisera sur les deux premiers points de ce travail pour lesquels une approche de modélisation a été utilisée. Les travaux sur l'interférométrie sont cités à titre d'information en annexes 1 et 2.

4. Approche méthodologique

L'approche utilisée dans cette étude se veut approfondie au sens où elle part de l'acquisition de données à travers plusieurs expérimentations, passe par une phase de

modélisation et se conclut par le développement d'algorithme d'inversion. La figure 2 résume la démarche utilisée, qui a été séparée pour plus de lisibilité en trois grandes phases : analyse des mesures (qui regroupe les expérimentations et l'analyse elle-même des données), compréhension du signal mesuré et inversion du signal. Chacune de ses phases est présentée dans les paragraphes suivants.

① Analyse des mesures

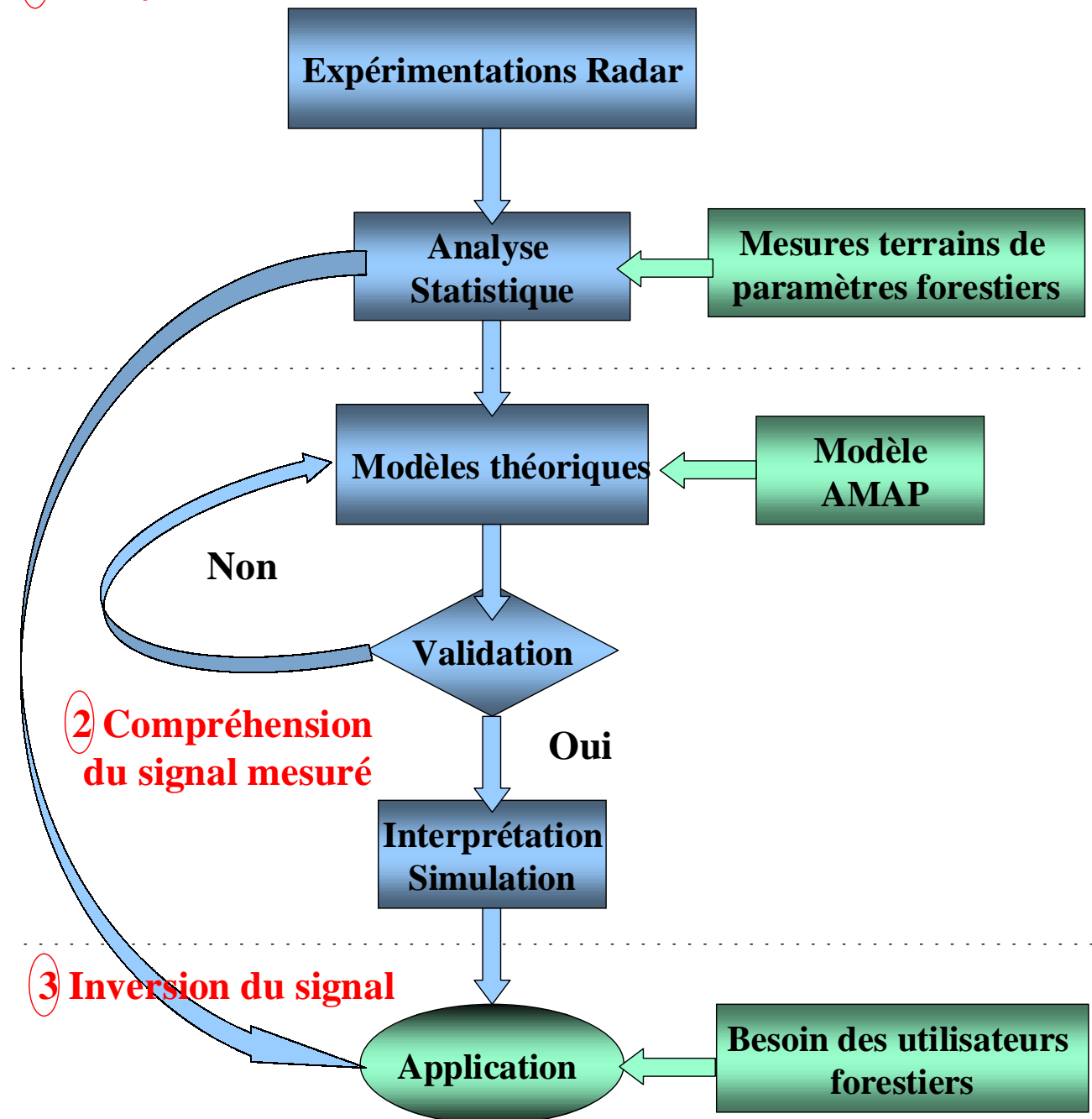


Figure 2 : Schéma représentant la méthodologie adoptée dans cette thèse

4.1 Expérimentation

Sites d'étude :

Le choix des sites d'études a répondu à plusieurs soucis :

- Une relative simplicité permettant l'étude et l'interprétation des observations radar. Le choix s'est donc porté sur des plantations équiennes et monospécifiques.
- La disponibilité d'une grande quantité de données terrain. Les sites d'études du Laboratoire commun de Télédétection (LCT) en Lozère et du Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) dans les Landes, apparaissaient comme les plus appropriés considérant l'important dispositif expérimental sur ces sites (voir Chap. I).
- La possibilité d'étudier différentes caractéristiques grâce à la complémentarité des sites (différentes espèces, conditions topographiques variées)
- Enfin, la présence d'une large gamme de niveau de biomasse.

Campagnes de terrain :

Nous avons eu l'opportunité d'avoir deux campagnes européennes :

- La campagne sur le site de Lozère du diffusiomètre sondeur HUSCAT (Helsinki University of Technology SCATterometer) en novembre 1997 dans le cadre du programme européen EUFORA (European Forest Observation by Radar).
- L'expérimentation franco-suédoise RAMCAR sur les deux sites des Landes et de Lozère avec les capteurs aéroportés CARABAS de la FOA (basses fréquences) et RAMSES de l'ONERA (multipolarisations/bifréquence L et X).

4.2 Analyse des données

L'analyse statistique des données (HUTSCAT, CARABAS) vise à cerner les diverses relations existant entre la rétrodiffusion radar et les variables représentatives du couvert forestier. Cette phase est utilisée pour guider l'étape ultérieure d'interprétation physique des mécanismes de rétrodiffusion. Il est possible également de proposer des algorithmes d'inversion sans passer par une phase de modélisation. Les résultats d'analyse sont alors directement utilisés pour une inversion empirique. Ce fut notamment le cas pour l'estimation de la hauteur des arbres à partir des données HUTSCAT.

4.3 Modélisation

La phase de modélisation vise à mieux interpréter les observations et expliquer les tendances observées, par la caractérisation des mécanismes d'interactions entre les ondes et le couvert forestier ainsi que par l'identification des principales sources de rétrodiffusion en fonction des configurations utilisées. L'objectif est de s'assurer de la robustesse et de la généralisation possible des relations observées entre le signal mesuré et les variables du couvert.

Les résultats obtenus par les modèles théoriques sont confrontés aux mesures expérimentales afin de valider l'approche modélisatrice. Ce processus exige souvent des aller-retour entre l'expérimentation et la modélisation, afin d'affiner certains paramètres du modèle ou de corriger certaines hypothèses faites dans la première étape de modélisation. Par la suite, différentes simulations peuvent être conduites pour quantifier l'influence de différentes variables (topographie, effet de la structure selon l'espèce, ...). Nous avons travaillé sur deux types de modèles de diffusion, le modèle de transfert radiatif MIT/CESBIO et le modèle cohérent développé par Floury au CESBIO. Les deux modèles sont couplés au modèle de croissance d'arbres AMAP du CIRAD qui fournit une description fine et réaliste des couverts étudiés.

4.4 Inversion

Que ce soit directement après la phase d'analyse des données ou après une phase de modélisation, la finalité reste la production d'algorithmes d'inversion des variables d'intérêts susceptibles d'intéresser les communautés des gestionnaires forestiers et des scientifiques travaillant sur les aspects environnementaux liés aux forêts. Cette phase nécessite une validation rigoureuse, phase trop souvent sacrifiée dans les travaux de recherche en télédétection, où se pose le problème de la représentativité et de l'adéquation des mesures terrains avec ce que mesure réellement un capteur.

Il faut préciser qu'il ne s'agit pas d'inverser directement les modèles de diffusion. Le nombre de paramètres d'entrée rend impossible une méthode d'inversion sans l'utilisation d'algorithmes spécifiques (réseau de neurones par exemple) qui déborderait du cadre de cette thèse. L'inversion est effectuée à partir de résultats de simulations dans lesquelles le nombre de variables d'entrée a été réduit, en isolant la réponse d'un type de diffuseur ou d'un seul mécanisme, identifié comme prépondérant.

5. Description de l'étude

5.2 Contexte

Cette thèse s'effectue dans le cadre de deux projets destinés à développer les connaissances sur la télédétection par radar des couverts forestiers. Ainsi, l'étude sur les radars sondeurs est effectuée dans le cadre du projet européen EUFORA du 4ème PCRD financé par l'Union Européenne faisant intervenir 7 laboratoires dont le LCT, le CESBIO et le Laboratoire des Techniques Spatiales de l'université d'Helsinki (HUT). L'analyse des données basses fréquences a lieu dans le cadre du projet « Modélisation du couvert forestier » cofinancé par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) dans lequel sont impliqués 4 laboratoires français : le LCT, le CESBIO, le laboratoire des Signaux et Systèmes de Sup'Elec et l'IRESTE de Nantes.

Ce travail s'insère dans la suite de 2 thèses précédentes, celles de Thierry Castel du Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-ENGREF, soutenue en 1998, et de Nicolas Floury du Centre d'Etudes de la Biosphère, soutenue en 1999. Ces thèses, en particulier, ont notamment développée l'idée et réalisé le couplage d'un modèle électromagnétique de diffusion d'un couvert forestier avec un modèle de croissance d'arbres.

La première année de thèse (1997-98) a été effectuée au Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref-ENGREF (LCT) à Montpellier avec pour encadrant Mr André Beaudoin. Suite à son départ, le travail s'est poursuivi à partir d'octobre 1998 au Centre d'Etudes de la Biosphère (CESBIO), UMR CNRS-CNES-UPS, sous la direction de Madame Thuy Le Toan dans le cadre d'une convention de transfert des activités de recherche en radar du LCT au CESBIO.

Lors de cette thèse, de nombreuses collaborations ont été développées à tous les stades des travaux. Afin, d'éclairer le lecteur à ce sujet, la tableau 5 présente les différents personnes et laboratoires qui ont apporté leurs connaissances et leurs efforts. Pour plus de clarté, les travaux y sont séparés en fonction des différents types de données utilisées et selon les étapes de la méthodologie employée.

	HUTSCAT	CARABAS
Expérimentation radar	J.M. Martinez, A. Beaudoin, T. Castel, N. Stach (LCT) N. Floury (CESBIO) M. Hallikainen et ses collaborateurs (HUT – Finlande) ONF - Mende	J.M. Martinez, A. Beaudoin, N. Stach (LCT) T. Le Toan (CESBIO) L. Ulander, P. Frörlind et leurs collaborateurs (FOA - Suède) ONERA ONF - Mende
Mesures forestières	J.M. Martinez N. Stach E. Mushinzimana T. Castel (LCT) T. Le Toan (CESBIO) INRA Sciences du Sol - Montpellier ONF - Mende CIRAD AMAP Cemagref – Montpellier ENGREF	
Analyse des données	J.M. Martinez N. Floury T. Le Toan (CESBIO) M. Hallikainen, M. Mäkynen (HUT – Finlande)	J.M. Martinez P. Melon T. Le Toan (CESBIO) L. Ulander (FOA - Suède)
Modélisation	J.M. Martinez N. Floury T. Le Toan (CESBIO) Y. Caraglio – J.F. Barczi (CIRAD AMAP)	P. Melon J.M. Martinez T. Le Toan N. Floury (CESBIO) Y. Caraglio – J.F. Barczi (CIRAD AMAP)
Application	J.M. Martinez T. Le Toan (CESBIO) P. Durand – P. Duplat (ONF) E. Mushinzimana – M. Deshayes – N. Stach – A. Beaudoin (LCT) Y. Caraglio (CIRAD AMAP)	

Tableau 5 : Résumé des collaborations intervenues pendant la thèse.

5.2 Publications

Six publications dans des revues internationales avec comités de lecture ont été préparées durant la thèse. Quatre d'entre elles sont définitivement acceptées et deux sont soumises et en cours d'examen par les revues. Trois publications traitent de l'analyse des données HUTSCAT, une des données CARABAS et deux de l'étude des données interférométriques ERS :

- « Understanding Backscatter Mechanisms inside tree canopy: theory and experiment »
J.M. Martinez, N. Floury, T. Le Toan, A. Beaudoin M. Hallikainen, and M. Makynen, *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, Mars 2000, p 710-719.
- « 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.
- « 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.
- « 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.
- « On the retrieving of forest stem volume from VHF SAR data : observation and modeling»
P. Melon, **J.M. Martinez**, T. Le Toan, N. Floury, L.M.H. Ulander and A. Beaudoin, soumis à *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*
- « Retrieving vertical foliage distribution using high resolution airborne scatterometer data»
J.M. Martinez, T. Le Toan, E. Mushinzimana, M. Deshayes, soumis à *Tree Physiology*.

5.3 Structure de la thèse

La thèse comprend un résumé des travaux effectués, à partir des 4 articles traitant les études effectuées sur les données HUTSCAT et CARABAS. Deux des articles sont regroupés dans le chapitre « Expérimentation et modélisation » tandis que les deux autres sont regroupés dans le chapitre « Inversion ». Le corps principal de la thèse sera conclu par un chapitre portant sur les conclusions de l'étude et sur les perspectives de la télédétection radar appliquée aux milieux forestiers. Enfin, les deux articles traitant de l'interférométrie seront regroupés en annexe.

Chapitre I : Résumé des travaux

Chapitre II : Expérimentation et modélisation

Article A

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

J.M Martinez, N. Floury, 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. Floury, 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

Annexes

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.