



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions et perspectives

1. Bilan de l'étude

L'objectif de cette thèse était d'étudier le potentiel de nouveaux capteurs radars pour l'observation de la forêt, aptes à dépasser les limites des capteurs actuels. L'originalité de l'étude résidait non seulement dans l'utilisation de nouveaux types de données mais aussi dans la méthodologie. L'approche proposée se basait à la fois sur l'acquisition et l'analyse de données de télédétection, une solide connaissance du milieu forestier, et une phase de modélisation couplant l'utilisation et le développement de modèles électromagnétiques de diffusion avec un modèle de croissance d'arbres, AMAP. La définition d'algorithmes d'inversion constituant le point final de l'approche. Le bilan de cette étude peut donc être mené en deux étapes : 1) les enseignements quant à la méthodologie employée, 2) les résultats consécutifs aux travaux effectués.

La méthodologie

Dans le domaine de la télédétection appliquée aux milieux forestiers, les approches se basant uniquement sur l'analyse expérimentale ont montré leurs limites. Les résultats obtenus par ce type d'études ont le mérite de livrer des enseignements quant aux possibilités des capteurs utilisés et de démontrer certaines limitations. Toutefois, les résultats sont peu généralisables car souvent trop liés aux sites d'études voire aux périodes d'observations. Les approches se basant d'abord sur le développement de modèles théoriques sans connaissances sur les milieux observés et les enseignements tirées des analyses expérimentales sont également limités. Notamment, par l'absence d'adéquation entre une description purement physique et peu fidèle à la réalité du terrain.

L'étude se proposait d'utiliser à la fois une approche pragmatique, par l'analyse de données expérimentales et de mesures forestières, et plus fondamentale par l'utilisation de modèles de diffusion électromagnétiques des couverts. Les résultats montrent la pertinence de cette approche pour dériver des algorithmes visant une plus grande généralisation que ceux précédemment obtenus dans le domaine. En particulier, il s'avère qu'une caractérisation fine du milieu à travers des mesures terrains et grâce au

modèle AMAP sont aussi bien nécessaires durant l'analyse expérimentale que pour supporter l'interprétation grâce aux modèles de diffusion. A ce titre, l'étude a démontré la pertinence du couplage d'un modèle de diffusion électromagnétique avec un modèle décrivant la végétation. Le couplage s'avère un outil unique afin d'identifier les mécanismes prépondérants et d'isoler les diffuseurs principaux. En retour, cette phase d'interprétation permet ensuite de dériver des algorithmes d'inversion capable de fournir des informations complémentaires ou difficilement accessibles par les mesures terrains : mesures spatialisés de la biomasse (volume de bois sur pied, biomasse foliaire, cartographie des forêts).

Les résultats

Cette étude a permis a la fois de confirmer et d'explorer des voies prometteuses en télédétection et en modélisation :

Basses fréquences

L'utilisation de basses fréquences s'avère intéressante par la forte corrélation du signal aux caractéristiques géométriques des troncs. Le seuil de saturation du signal en fonction du niveau de biomasse est rejeté très loin (entre 700 et 1000 m³/ha), et au-dessus de tout ce qui avait été montré auparavant avec des capteurs radars. L'utilisation de deux sites d'études a permis d'examiner l'influence de la variabilité du milieu sur la réponse mesurée par le capteur. Pour les deux types de conifères étudiés, aucun effet de structure lié à l'espèce n'a été décelé. L'analyse du signal en fonction d'autres paramètres comme les caractéristiques géométriques du tronc ont cependant montré que le type de sylviculture appliquée, en déterminant la densité de tiges à l'hectare, influençait indirectement la réponse finale. Le paramètre volume de bois s'est donc avéré très utile par son caractère intégrateur des différentes variables descriptives du couvert.

La phase de modélisation a montré que lorsque les dimensions des éléments du couvert sont du même ordre de grandeur que le tronc, principal diffuseur, plusieurs mécanismes de rétrodiffusion avaient lieu au sein du couvert. Dans le cas de conifères, cette situation n'est rencontrée que dans les peuplements jeunes. Mais, pour certains peuplements de feuillus, on peut s'attendre à ce que la structure plus complexe de ces espèces altèrent les résultats observés.

Enfin, l'étude a permis de quantifier pour la première fois la sensibilité du signal VHF à la topographie. Une forte chute du signal est observée (10 dB) entre le sol plat et des

pentés de 15°. Cette sensibilité est expliquée par la prépondérance du mécanisme troncosol qui va diminuer très rapidement à mesure que la pente augmente.

Radars sondeur

L'utilisation de radars sondeurs date des années 80. Plusieurs études avaient déjà signalé le grand potentiel de ce type de données pour l'estimation directe de la hauteur des arbres et, par le biais de relations allométriques, d'autres paramètres corrélés à la biomasse. Cette étude a permis de confirmer et/ou de préciser : 1) la précision des estimations de hauteurs (6%) ; 2) l'insensibilité de la précision des mesures à la pente locale (< 15°); 3) la précision constante de mesures mêmes pour de très forts volumes (> 1000 m³/ha localement) et quelle que soit la densité (> 2000 tiges/ha localement).

Les données du diffusiomètre sondeur ont ensuite été utilisées afin de valider le modèle de rétrodiffusion multi-couches MIT/CESBIO couplé au modèle architectural AMAP. Les profils de diffusion à haute résolution dans le couvert constituaient, en effet, un jeu de données particulièrement approprié pour valider le modèle. Cette phase de validation effectuée, le modèle pouvait être utilisé afin d'interpréter le signal mesuré. La première phase a nécessité d'introduire dans le modèle une meilleure prise en compte de l'aire diffusante en fonction de la hauteur, donc du chemin d'interception des micro-ondes par le couvert. Cette correction faite, l'approche a permis de montrer, que l'onde électromagnétique interagit avec tout le couvert pour de faibles incidences et à courte longueur d'onde. L'interprétation des données à partir du modèle a permis d'identifier les aiguilles comme les diffuseurs principaux du couvert. Ces conclusions ont permis de développer un algorithme d'inversion basé sur l'inversion du coefficient de rétrodiffusion en terme de biomasse foliaire. Cet algorithme a pu être validé sur la forêt domaniale de Mende grâce à des mesures de terrain destructrices.

2. Perspectives

Les capteurs étudiés

Nous venons de voir les principaux résultats obtenus quant à l'estimation de variables d'intérêts afin de caractériser finement le couvert forestier. Les limitations ayant déjà été citées durant la synthèse des travaux, nous allons nous focaliser sur les perspectives de tels instruments en fonction des différents besoins détaillés dans l'introduction de la thèse. Un capteur comme CARABAS apparaît comme un outil bien adapté pour l'estimation de la ressource en bois avec une excellente résolution spatiale. Une telle

information est intéressante aussi bien pour le gestionnaire forestier que pour l'écologue. Du signal CARABAS peuvent être directement inversés le volume de bois sur pied, et par le biais de relations allométriques ou de connaissances terrains, d'autres variables d'intérêt comme la surface terrière, le diamètre moyen des fûts et leur hauteur. Cette même information peut être traduite en terme de matière sèche et de quantité de carbone stocké par une forêt. La détection de changements liés à l'exploitation forestière ou à la survenue de catastrophes naturelles constitue également un autre champ d'investigation.

La capteur HUTSCAT s'avère extrêmement intéressant pour délivrer des informations très fines sur les propriétés du couvert comme la hauteur des arbres. Il pourrait s'avérer un outil indispensable pour les gestionnaires. La hauteur des arbres, et particulièrement la hauteur dominante, est en effet une variable très riche en information. Si la précision de l'estimation est du même ordre que celle des mesures terrains, ce type de capteur présente l'avantage supplémentaire, par rapport aux méthodes d'estimations traditionnelles, de pouvoir spatialiser les mesures à l'échelle de forêts entières. En utilisant des relations allométriques liant la hauteur à d'autres variables, il est possible de déterminer le volume de bois sur pied. Par des survols successifs à quelques années d'intervalle, il serait également possible de déterminer avec précision les accroissements en hauteur (donc en biomasse). Ces informations sont intéressantes autant pour le gestionnaire forestier que pour le scientifique travaillant sur les écosystèmes forestiers. L'écologue pourrait en effet ici suivre avec précision l'évolution de la croissance des arbres en fonction de l'évolution des climats. De même, l'estimation de la biomasse foliaire et de sa répartition trouve son intérêt dans les modèles de fonctionnement qui utilisent en entrée des estimations de biomasse foliaire mais souvent avec des hypothèses simplistes quant à sa répartition spatiale. Pour ces mêmes modèles, le couplage de basses fréquences pour estimer la biomasse sèche et de hautes fréquences afin d'estimer la biomasse foliaire pourrait s'avérer particulièrement prometteuse. Une très récente étude (Kimball et al. 2000) utilisant des données aéroportées multi-fréquences (X, L et P) a ainsi permis de montrer l'intérêt de telles estimations spatialisées combinées afin d'interpréter les variations de production primaire nette au sein des couverts.

A l'heure actuelle, il semble impossible d'envisager des configurations de satellites proches des systèmes HUTSCAT et CARABAS. Pour ce dernier, il se pose en effet un problème spécifique lié à l'ionosphère qui n'est pas entièrement transparente aux fréquences VHF. Cependant, les capteurs aéroportés comme CARABAS et HUTSCAT apparaissent particulièrement utiles dans des pays possédant des inventaires forestiers

précis (comme la France) pour lesquels des estimations globales et peu fiables ne sont que peu d'intérêt. Dans un tel contexte, le croisement d'estimations précises de paramètres d'intérêts avec différentes sources d'informations regroupées au sein de SIG s'avérerait un outil très performant. Le papier C présente un tel exemple d'application consistant en l'estimation d'indices de fertilités locaux à partir de mesures de hauteurs fournies par HUTSCAT, d'un parcellaire forestier et d'une table de production préalablement déterminée.

Les satellites futurs

Nous allons désormais élargir la discussion aux capteurs spatiaux futurs et voir comment la télédétection radar peut répondre aux besoins en matière d'information forestière, aujourd'hui et dans un avenir proche. Le tableau 1 synthétise les configurations des prochains satellites qui seront lancés dans les années qui viennent. La brève discussion qui suit est détaillée par grands types d'informations comme ils avaient été énumérés durant l'introduction.

Satellites	Lancement prévu	Configuration radar	Résolution
ENVISAT-ASAR	2001	Bande C Polarisation HH,VV, HV	25 – 1000 m
RADARSAT-2	2002	Bande C Polarimétrique ?	< 10 m
ALOS-PALSAR	2003	Bande L Polarimétrique	10-100 m

Tableau 1 : Liste des capteurs spatiaux radar allant être lancés dans les prochaines années.

On a vu que les capteurs satellites étaient surtout efficaces pour la cartographie des massifs boisés et des types d'occupations du sol. L'utilisation de longueurs d'ondes centimétriques par les capteurs actuels impose une limite supérieure sur les capacités d'inversion de la biomasse. Ils sont adaptés à la cartographie de grandes classes d'occupations des sols et au suivi des régénérations.

L'inventaire des types forestiers (discrimination d'espèces) sera améliorée par la disponibilité de multiples canaux grâce aux futurs capteurs. La multiplication de canaux d'informations (polarimétrique et en fréquences) permettra sans doute d'appliquer des méthodes supervisées par analogie à ce qui se fait en optique.

L'estimation des ressources en bois (en terme de volume pour la production ou de matière sèche pour l'évaluation des stocks de carbone) requiert l'utilisation de basses fréquences qui ne seront pas disponibles à partir de données de satellites pour la décennie à venir. Une approche complémentaire combinant l'utilisation de capteurs aéroportés, de données terrains et de données satellites s'imposera donc.

Le suivi de l'impact de catastrophes naturelles pose de nombreux problèmes. Les conclusions tirées au terme de l'analyse menée à la suite des tempêtes de fin 1999 (Annexe C) sont à ce titre intéressantes. Elle montre à la fois le besoin d'une haute résolution spatiale et temporelle (possibilité d'acquérir des images sur un même site dans des délais très courts). Le taux de revisite d'un site est en effet assez faible avec les capteurs actuels et n'évoluera pas avec les futures satellites, il est au mieux de 35 jours. Ce problème de la résolution spatiale renvoie à l'utilisation de capteurs aéroportés tels ceux présentés dans l'étude. Le tableau 2 reprend ces conclusions, en « miroir » des tableaux présentés dans l'introduction de la thèse qui résumaient les besoins en matière d'information sur la forêt.

Description	Instruments à utiliser	Résolution Spatiale
<ul style="list-style-type: none"> • Zone boisées/non boisées • Usage du sol (forêt, agriculture, urbain) • Suivi des déboisements et reboisements 	Capteurs satellites conventionnels	1:50000 et au-dessus
<ul style="list-style-type: none"> • Suivi de la ressource en bois 	CARABAS	1:10000 à 1:25000
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation et suivi des stocks de carbone 	Capteurs aéroportés du type CARABAS, HUTSCAT	1 :5000 à 1 :25000
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaires et suivi des types forestiers 	Données multifréquences des futurs capteurs ?	1 :50000 et au-dessus
<ul style="list-style-type: none"> • Suivi des régénérations 	Capteurs satellites actuels	1 :50000 et au-dessus
<ul style="list-style-type: none"> • Impact de facteurs biotiques ou abiotiques (incendies, tempêtes, attaques d'insectes,...) → cartographie des dégâts 	Interférométrie CARABAS	1 :50000 et au-dessus 1 :10000 à 1 :25000
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire de la ressource en bois, accroissements 	CARABAS, HUTSCAT	1 :5000 à 1 :25000

Tableau 2 : Synthèse des produits d'informations requis par les différents acteurs forestiers et des techniques de télédétection radar qui pourraient être utilisées de manière opérationnelle pour les fournir.