



# **CHAPITRE III**

---

# **INVERSION**

---

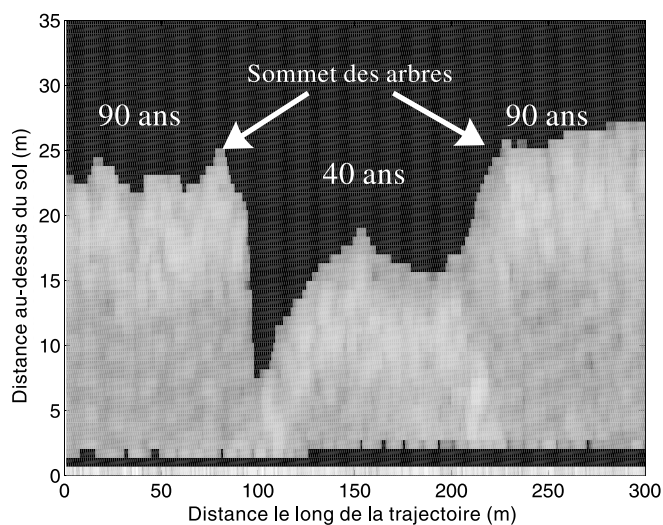
## **Article C**

### **«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.

**Fig. 2.** Succession de sondages verticaux fournis par HUTSCAT, au-dessus de peuplements de différents âges de pin noir d'Autriche.



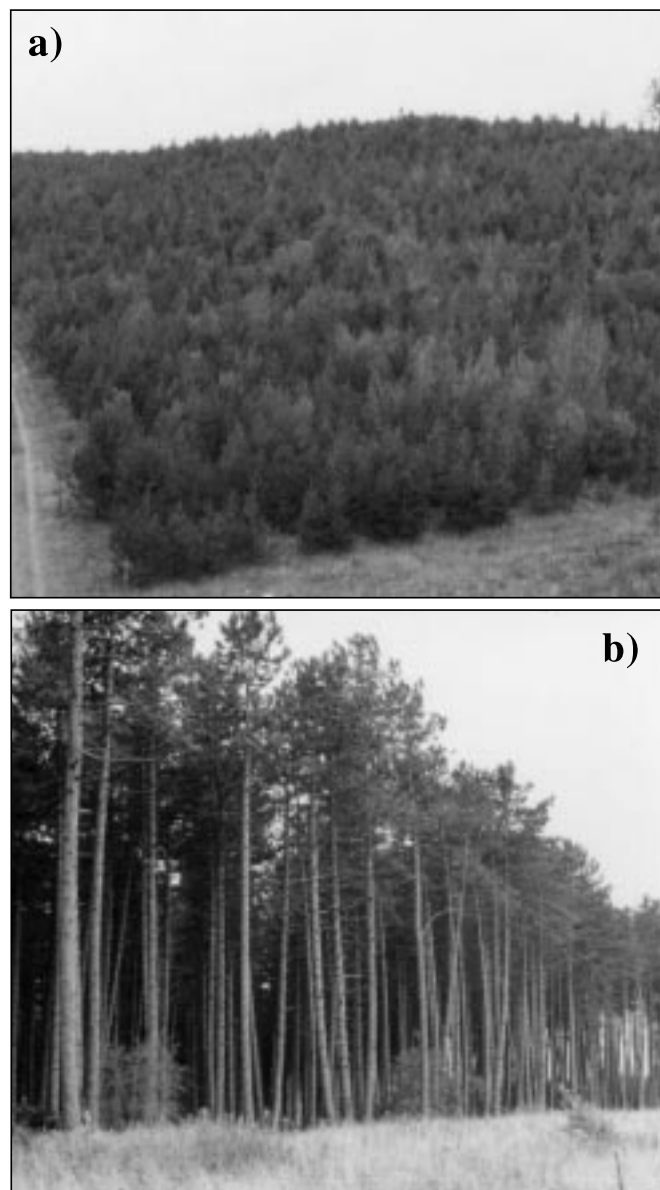
gauche à droite, de 90, 40 et 90 ans. Les différentes teintes de gris traduisent la variation de l'intensité rétrodiffusée par le couvert forestier, qui est sensible à la quantité de biomasse et à sa structure. On peut ainsi remarquer que l'intensité maximale rétrodiffusée provient d'une zone épaisse de quelques mètres à l'intérieur du houppier. À la vue de ces sondages, on peut noter facilement la variation en hauteur à l'intérieur d'une même parcelle, celle de 40 ans dans l'exemple.

Simultanément aux mesures radar, le couvert forestier est observé avec une caméra vidéo, et un GPS (Global Positioning System) différentiel enregistre la trajectoire suivie par l'hélicoptère avec une précision de 1 m. L'altitude typique durant un vol est de 120 m et la vitesse de vol est environ de 25 m/s. HUTSCAT, qui effectue 20 mesures par seconde, permet donc de mesurer un sondage vertical environ tout les 1 m le long d'un transect.

#### Site d'étude

La campagne HUTSCAT a eu lieu les 22 et 23 novembre 1997, au-dessus de plantations de pin noir d'Autriche situées sur les Causses de Sauveterre et de Mende (France) et gérées par l'Office national des forêts (ONF) de Mende, Lozère. Ce sont des plateaux calcaires, relativement plats, ayant une altitude moyenne de 1000 m, séparés par des vallées ou de profondes gorges où les pentes peuvent dépasser 45°. La forêt domaniale, qui couvre 5400 ha, est constituée de plantations équiennes de 0 à 130 ans (ONF 1989). Elle est issue des plantations de pin noir réalisées de 1864 à 1910, en application des lois sur la RTM (Restauration des terrains de montagne). Il s'agissait de contenir l'érosion massive des versants calcaires et d'écarter les crues désastreuses de la Garonne et de ses affluents. Son rôle de production est apparu dans les années 1960, lorsque l'on entrepris l'éclaircie des peuplements adultes. Actuellement, la majorité des peuplements sont âgés de 100 à 130 ans, mais une partie du massif a déjà fait l'objet de renouvellements et une deuxième génération, âgée de 0 à 40 ans, est présente

**Fig. 3.** Peuplements de pin noir d'Autriche âgés de 15 ans (a) et 100 ans (b), situés en forêt domaniale de Mende.



sur le site. La forêt est subdivisée en unités de gestion : la parcelle, d'une taille moyenne de 10 ha. Les figures 3a et 3b montrent deux exemples de peuplements, respectivement de 15 et 100 ans.

#### Données disponibles

Les données HUTSCAT donnent les coefficients de rétrodiffusion du sol et du houppier avec 68 cm de résolution verticale. Ces sondages verticaux ont été calculés seulement quand l'écho radar provenant du sol et du houppier étaient nettement séparables. Dans le cas contraire, seuls les coefficients de rétrodiffusion totaux, somme des contributions du sol et du houppier, ont été calculés.

Afin de valider les estimations des paramètres forestiers fournies par HUTSCAT, des mesures dendrométriques ont été effectuées ultérieurement sur un nombre réduit de

**Tableau 1.** Statistiques concernant les paramètres mesurés et calculés sur les 66 placettes utilisées pour la validation des mesures HUTSCAT.

	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	Volume sur pied (m <sup>3</sup> /ha)	Densité de tiges (ha <sup>-1</sup> )	$H_{\text{dom}}$ (m)	$H_{\text{moy}}$ (m)	Épaisseur du houppier (m)
Moyenne	49,5	492	788	19,5	18,4	7,0
Écart type	17,4	266	405	5,8	5,7	1,1
Maximum	91,1	1023	2216	29,1	27,8	9,8
Minimum	19,7	71	288	8,3	7,2	4,5

Nota :  $H_{\text{dom}}$ , hauteur dominante;  $H_{\text{moy}}$ , hauteur moyenne.

parcelles survolées. Nous allons utiliser les données extraites de trois transects sélectionnés de manière à couvrir la plus grande variété de stades de croissance. Les peuplements se situent dans des zones de pentes allant de 0 à 15°. Sur le terrain, des placettes de 7 m de rayon et espacées de 20 m le long des trajectoires de l'hélicoptère ont été définies. Le diamètre a été choisi de manière à avoir suffisamment d'échantillons HUTSCAT par placette, 7 en moyenne. À l'intérieur de chaque placette, toutes les circonférences à 1,3 m, les hauteurs des houppiers et les hauteurs totales des arbres ont été mesurées, à l'exception de quelques placettes dans les peuplements jeunes ayant une très forte densité de tiges. Dans celles-ci, où la densité peut monter localement à plus de 2000 tiges/ha, toutes les circonférences ont été échantillonnées mais seules les hauteurs des 10 plus gros arbres, sélectionnés d'après les mesures de circonférence, ont été mesurées.

Ont pu être calculés, pour chaque placette, la surface terrière totale, le volume de bois sur pied, la densité de tiges, l'épaisseur des houppiers et les hauteurs moyenne et dominante. La hauteur moyenne se réfère à la moyenne arithmétique de toutes les hauteurs mesurées. La hauteur dominante est définie comme la hauteur des 100 plus gros arbres par hectare. En conséquence, la hauteur dominante d'une placette a été prise comme la hauteur du plus gros arbre présent. Au total, 77 placettes ont été échantillonnées, avec un volume de bois sur pied allant de 70 jusqu'à plus de 1000 m<sup>3</sup>/ha.

Les placettes de mesures et les trajectoires des vols ont ensuite été intégrées dans un système d'information géographique (SIG) préexistant et mis en place par le Laboratoire commun de télédétection, qui met en correspondance la carte d'aménagement de la forêt domaniale de Mende établie par l'ONF et un modèle numérique de terrain (MNT) de l'Institut géographique national français. Les emplacements des placettes de mesures, positionnés par GPS différentiel avec une précision de 1 m, ont été confrontés avec les trajectoires au sein du SIG pour vérifier leur positionnement respectif. Pour la phase d'analyse, nous avons choisi de ne garder que les placettes éloignées de moins de 2 m de la trajectoire suivie par l'hélicoptère, l'incertitude résiduelle totale des deux GPS. Ainsi, 66 parmi les 77 placettes ont été utilisées pour la phase d'analyse. Les statistiques concernant ces points sont résumées au tableau 1.

## Résultats

### Hauteur de peuplement

Nous allons étudier la précision de la mesure des hauteurs moyenne et dominante par HUTSCAT sur le jeu de placettes qui vient d'être défini. Pour chaque placette mesurée sur le terrain est extraite une séquence de sondages verticaux correspondante, déterminée grâce au SIG et à la vidéo. La hauteur moyenne « radar » est définie comme la moyenne des hauteurs extraites des sondages appartenant à la séquence, et la hauteur dominante « radar », comme la hauteur maximale dans cette même séquence.

L'analyse des données en bandes C et X, quelles que soient les polarisations, montre que les résultats sont très similaires d'un canal à l'autre. Les figures 4 et 5 montrent les résultats pour les estimations respectivement de la hauteur moyenne et de la hauteur dominante en utilisant le canal correspondant à la bande X en polarisation HH (émission horizontale – réception horizontale). Les résultats sont très satisfaisants, avec un coefficient de corrélation de 0,96 pour la hauteur moyenne et 0,94 pour la hauteur dominante. Le résidu quadratique moyen ( $\sigma_R$ ) de l'estimation des hauteurs terrain ( $H_{\text{terrain}}$ ) par les hauteurs estimées par radar ( $H_{\text{radar}}$ ) s'écrit :

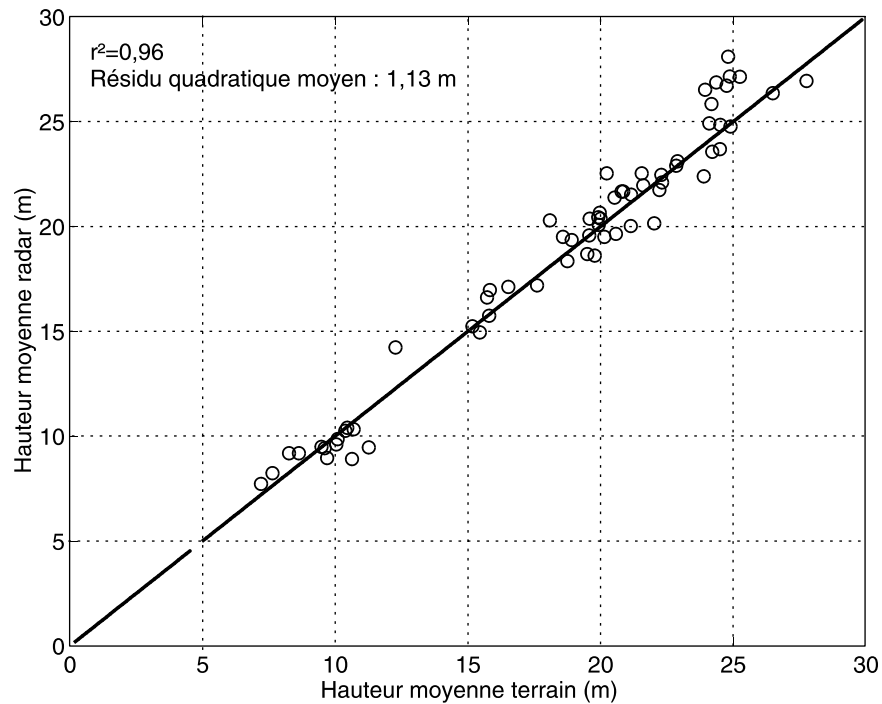
$$[1] \quad \sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [H_{\text{radar}}(i) - H_{\text{terrain}}(i)]^2}$$

où  $n$  est le nombre d'échantillons. Le coefficient  $\sigma_R$  donne donc l'erreur d'estimation de  $H_{\text{terrain}}$  par  $H_{\text{radar}}$ , prenant en compte également un éventuel biais. Pour les hauteurs moyennes et dominantes,  $\sigma_R$  vaut, respectivement, 1,1 et 1,2 m pour le jeu de 66 placettes. La précision relative est de 6%, ce qui peut être considéré comme équivalent à la précision des mesures terrain.

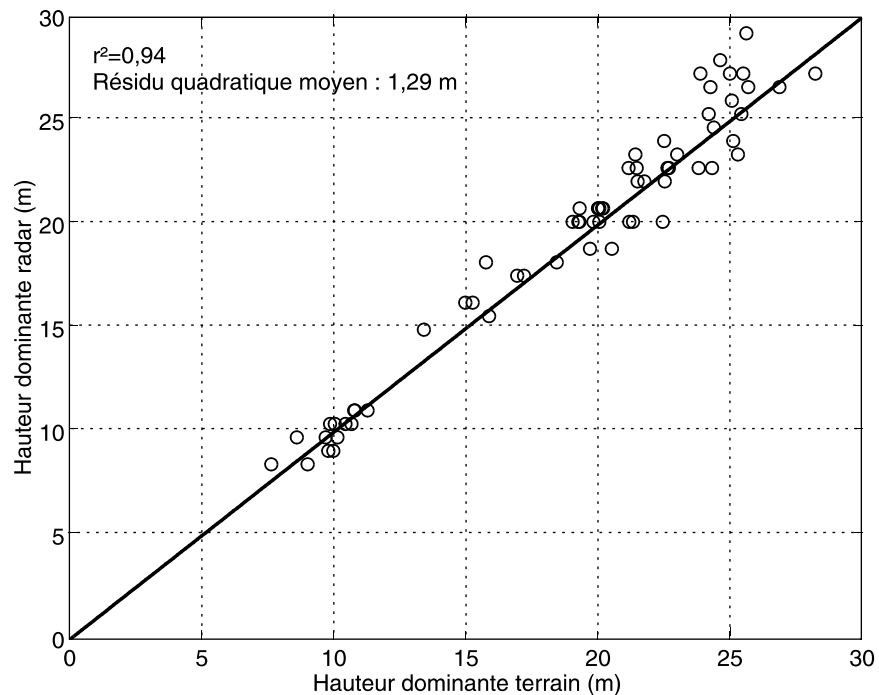
L'examen des statistiques fait apparaître un léger biais avec une sous-estimation moyenne de 0,2 m des hauteurs moyenne et dominante par le radar. Plusieurs raisons peuvent être avancées :

- (1) Les mesures forestières ont été effectuées 1 an après la campagne radar, mais n'ont pas été corrigées de la croissance en hauteur entre les deux dates. Ceci peut expliquer, pour partie, la légère sous-estimation systématique des hauteurs d'arbres par le radar.
- (2) La différence de surface entre les placettes « radar » et sur le terrain (80 m<sup>2</sup> contre 150 m<sup>2</sup> en moyenne) est susceptible d'introduire une légère sous-estimation quant à l'estimation de la hauteur dominante, puisque la probabilité (loi de Poisson) de trouver au moins un

**Fig. 4.** Comparaison des mesures forestières (abscisse) avec les estimations fournies par HUTSCAT (ordonnée) sur la hauteur moyenne de 66 placettes.



**Fig. 5.** Comparaison des mesures forestières (abscisse) avec les estimations fournies par HUTSCAT (ordonnée) sur la hauteur dominante de 66 placettes.



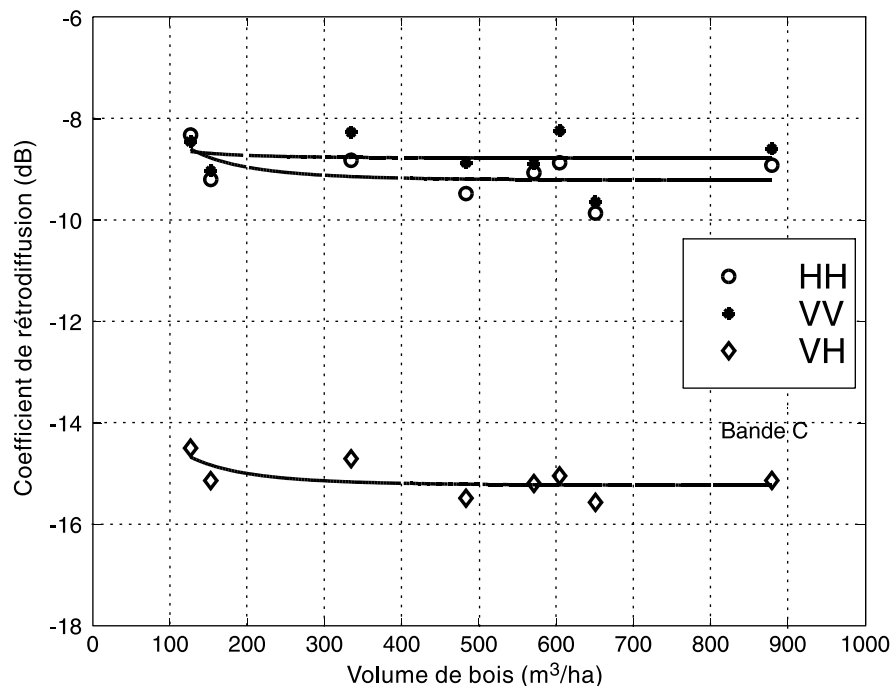
dominant par placette est différente (79% contre 57%). Toutefois, l'homogénéité des peuplements étudiés diminue fortement l'incidence de ce biais dans le cas présenté.

- (3) Les positionnements par GPS différentiel des placettes et des trajectoires de l'hélicoptère présentent une incertitude résiduelle d'environ 2 m. Ceci ne peut qu'accroître les

différences entre les observations forestières et les estimations de HUTSCAT, et donc les erreurs d'estimations.

Il apparaît donc que les estimations des hauteurs d'arbres par radar sont très satisfaisantes, les erreurs étant du même ordre de grandeur que sur les observations de terrain. De plus, contrairement aux estimations par systèmes lidar, celles par radar restent fiables, même pour de très forts volumes

Fig. 6. Coefficient de rétrodiffusion total de parcelles de pin noir d'Autriche en bande C et pour les trois polarisations (HH, VV, VH).



(plus de 1000 m<sup>3</sup>/ha) correspondant aux parcelles les plus âgées ayant des hauteurs proches de 30 m.

#### Surface terrière et volume sur pied

De nombreuses études ont montré que le signal mesuré dans le domaine des microondes est sensible à la quantité de biomasse présente dans le milieu (Beaudoin et al. 1994; Dobson et al. 1992; Le Toan et al. 1992). Toutefois, cette sensibilité est perdue à partir d'un certain niveau de biomasse, en raison d'un phénomène de saturation qui apparaît d'autant plus vite que la longueur d'onde utilisée est courte (Le Toan et al. 1992). Nous allons maintenant étudier la variation du coefficient de rétrodiffusion mesuré par HUTSCAT en fonction du volume de bois sur pied. Pour avoir une estimation correcte de ce coefficient, il est nécessaire de moyenner un nombre suffisant de sondages verticaux indépendants, ce qui nécessite de travailler à l'échelle de la parcelle. Pour chacune, ont été extraits le coefficient de rétrodiffusion du houppier ( $\sigma_{\text{houppier}}^0$ ), celui du sol ( $\sigma_{\text{sol}}^0$ ) et total ( $\sigma_{\text{total}}^0$ ), soit la somme des deux premiers.

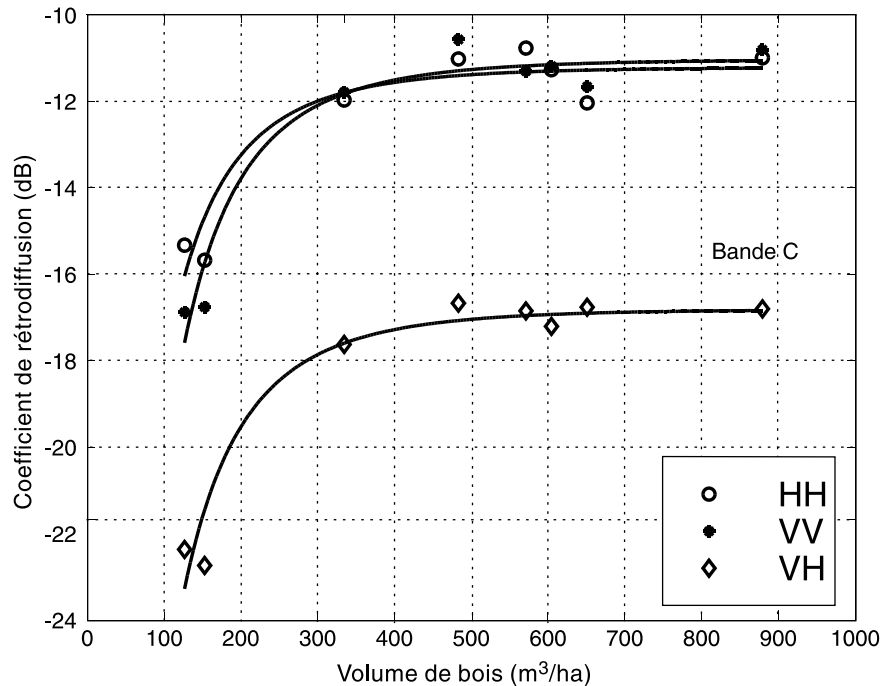
La figure 6 montre le comportement de  $\sigma_{\text{total}}^0$ , à 5,6 cm de longueur d'onde (bande C), en fonction du volume de bois sur pied de différentes parcelles. Les données de volume correspondent à celle décrites au tableau 1, mais moyennées par parcelle. Le signal ne présente aucune sensibilité, quelle que soit la polarisation utilisée. En mesurant séparément les contributions du houppier et du sol, la sensibilité du signal doit être meilleure. La figure 7 montre le comportement de  $\sigma_{\text{houppier}}^0$  en fonction du volume sur pied pour la bande C qui donne de meilleurs résultats que la bande X, quelles que soient les polarisations. Pour les faibles volumes, une tendance croissante est visible avec une dynamique de l'ordre de 6 dB. Toutefois l'absence de mesures concernant des peuplements ayant un volume de bois sur pied entre 100 et

300 m<sup>3</sup>/ha ne permet pas de conclure quant au seuil de saturation qui devrait se situer autour de 200 m<sup>3</sup>/ha, comme l'a montré une étude précédente (Pulliainen et al. 1994).

Ces observations peuvent être interprétées de la manière suivante : dans la gamme de faible volume (0–200 m<sup>3</sup>/ha), le coefficient de rétrodiffusion total est un mélange des contributions venant du sol et de la végétation elle-même. Comme le montre la figure 7, la rétrodiffusion du houppier augmente avec le volume, jusqu'à atteindre un niveau de saturation vers 200 m<sup>3</sup>/ha. Au contraire, la contribution du sol décroît à mesure que la biomasse augmente, car le milieu forestier devient de plus en plus atténuant. Finalement, la chute de la réponse du sol est compensée par l'augmentation de la réponse de la végétation (fig. 7). Enfin, pour les plus fortes valeurs de biomasse, l'écho de la végétation est dominant et le niveau de saturation est atteint. Il faut remarquer ici qu'en séparant les contributions du sol et du houppier, le niveau de saturation est plus haut que ceux communément observés avec d'autres capteurs fonctionnant dans la même longueur d'onde (bande C), tel les satellites ERS 1/2 ou RADARSAT, dont le signal sature dès 50 m<sup>3</sup>/ha (Dobson et al. 1992).

La dynamique du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la biomasse et la saturation du signal à partir de 200 m<sup>3</sup>/ha ne permettent pas de développer un modèle de régression fiable pour estimer des variables comme le volume de bois ou la surface terrière de façon précise. Il est par contre intéressant de développer une régression à plusieurs variables en utilisant à la fois les estimations de hauteur données par HUTSCAT et les coefficients de rétrodiffusion mesurés. Pour ce faire, nous avons utilisé un test *F* pour retenir les variables les plus significatives. Il apparaît que les meilleures variables explicatrices tirées de l'analyse des données radar sont, dans l'ordre, la hauteur dominante, la hauteur moyenne, les coefficients de rétrodiffusion du sol et

**Fig. 7.** Coefficient de rétrodiffusion du houppier de parcelles de pin noir d'Autriche en bande C et pour les trois polarisations (HH, VV, VH).



**Tableau 2.** Statistiques sur la régression du volume sur pied de huit peuplements à partir de  $H_{\text{dom}}$ ,  $H_{\text{moy}}$ ,  $\sigma_{\text{houppier}}^0$  et  $\sigma_{\text{sol}}^0$  en bande C et en polarisation croisée.

Variable explicatrice	Coefficient de corrélation ( $r^2$ )	Écart type résiduel (m³/ha)	Erreur relative (%)
$H_{\text{dom}}$	0,94	50	10,5
$H_{\text{moy}}$	0,90	71	15,0
$H_{\text{dom}}, \sigma_{\text{sol}}^0$	0,96	47	10,0
$H_{\text{dom}}, \sigma_{\text{houppier}}^0$	0,94	48	10,1
$H_{\text{moy}}, \sigma_{\text{sol}}^0$	0,92	65	13,7
$H_{\text{dom}}, H_{\text{moy}}, \sigma_{\text{sol}}^0$	0,96	47	10,0

**Nota :**  $H_{\text{dom}}$ , hauteur dominante;  $H_{\text{moy}}$ , hauteur moyenne;  $\sigma_{\text{houppier}}^0$ , coefficient de rétrodiffusion du houppier;  $\sigma_{\text{sol}}^0$ , coefficient de rétrodiffusion du sol.

du houppier en bande C et en polarisation croisée (HV). Les tableaux 2 et 3 résument les erreurs de prédiction sur le volume sur pied et la surface terrière en combinant ces variables obtenues sur les parcelles utilisées précédemment. Un exemple de régression à partir de la hauteur dominante et du coefficient de rétrodiffusion du sol est montré en figure 8. En raison du faible nombre de parcelles où ont été effectuées les mesures dendrométriques, il n'a pas été possible de valider les modèles sur un jeu de parcelles indépendantes des parcelles d'apprentissage.

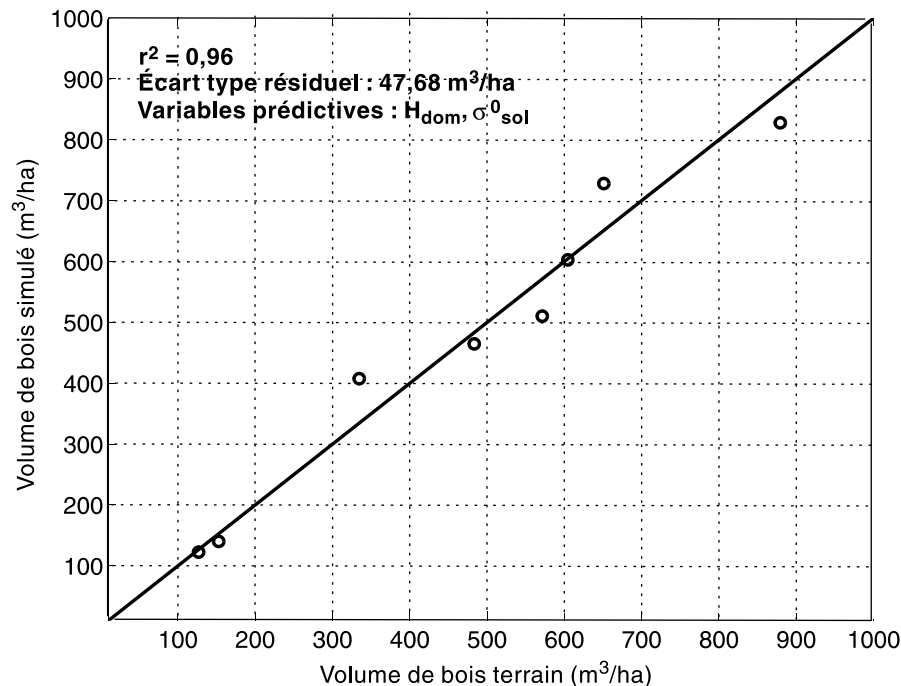
Les meilleures précisions relatives concernant l'estimation de la surface terrière et du volume sur pied sont, respectivement, de 8,8 et 10%. Comme le montre l'examen précis des statistiques des tableaux 2 et 3, les variables hauteurs (dominante puis moyenne) dominent largement les statistiques. En effet, l'utilisation du coefficient de rétrodiffusion n'est pertinente que dans le domaine de sensibilité du radar à la biomasse (0–200 m³/ha), ce qui n'est

**Tableau 3.** Statistiques sur la régression de la surface terrière de huit peuplements à partir de  $H_{\text{dom}}$ ,  $H_{\text{moy}}$ ,  $\sigma_{\text{houppier}}^0$  et  $\sigma_{\text{sol}}^0$  en bande

Variable explicatrice	Coefficient de corrélation ( $r^2$ )	Écart type résiduel (m²/ha)	Erreur relative (%)
$H_{\text{dom}}$	0,88	4,37	9,0
$H_{\text{moy}}$	0,85	5,17	10,6
$H_{\text{dom}}, \sigma_{\text{sol}}^0$	0,90	4,31	8,8
$H_{\text{dom}}, \sigma_{\text{houppier}}^0$	0,90	4,28	8,8
$H_{\text{moy}}, \sigma_{\text{sol}}^0$	0,86	4,91	10,1
$H_{\text{dom}}, H_{\text{moy}}, \sigma_{\text{sol}}^0$	0,90	4,29	8,8

le cas que pour deux des huit parcelles utilisées. Un jeu de parcelles représentant mieux les faibles classes de volume permettrait de mieux juger de l'utilité respective des variables hauteur et rétrodiffusion dans une stratégie

**Fig. 8.** Comparaison du volume sur pied terrain (abscisse) et obtenu par régression (ordonnée) pour différentes parcelles. Les variables utilisées pour la régression sont la hauteur dominante radar ( $H_{\text{dom}}$ ) et le coefficient de rétrodiffusion du sol ( $\sigma_{\text{sol}}^0$ ) en bande C et en polarisation croisée.



d'inversion. Enfin, dans le cas de peuplements mixtes, l'utilisation du coefficient de rétrodiffusion pourrait se justifier dans une stratégie d'inversion en permettant de stratifier les espèces selon la valeur de leur coefficient de rétrodiffusion (voir partie suivante).

## Discussion

Pour envisager l'opérationnalité, il faut étudier l'influence de contraintes extérieures (comme la topographie et le type de sylviculture appliqué) ou le cas de peuplements mélangés. L'étude détaillée des estimations de hauteur par HUTSCAT montre que les mesures ne sont pas influencées par la topographie dans les conditions étudiées (pentes de 0–15°). La mesure se faisant relativement au sol, l'influence devrait être nulle. Dans une expérience précédente (Hyypä et Hallikainen 1996), cet effet a été indirectement étudié en inclinant l'antenne par rapport à la verticale, permettant de se placer virtuellement dans le cas d'un sol en pente. L'estimation avec une incidence de 40° (antenne inclinée de 40° par rapport à la verticale) donne toujours de bons résultats sur la hauteur, bien qu'inférieurs à l'incidence normale, 1,64 m contre 1 m pour le pin. Pour conclure définitivement quant à ce sujet, il serait intéressant de disposer de placettes de mesures sur des pentes plus raides (20–45°) sur les bords des Causses.

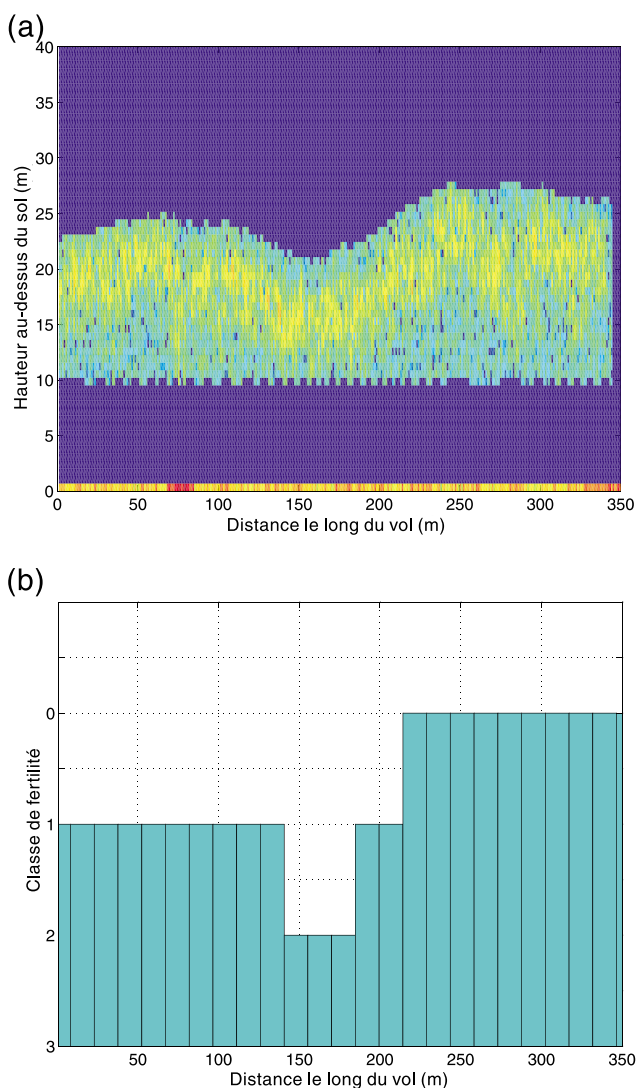
Comme nous l'apprend la loi d'Eichorn, la hauteur dominante n'est pas influencée par le type de sylviculture appliqué. Ceci nous indique que les mesures de hauteurs dominantes fournies par HUTSCAT seront insensibles à la sylviculture. Toutefois, selon le type de sylviculture employé, la structure des arbres peut subir des modifications, par exemple dans le cas de peuplements très denses,

l'angle d'insertion des branches primaires sur le fût peut être affecté. Le coefficient de rétrodiffusion étant sensible à ces changements (Dobson et al. 1992), il peut alors varier entre deux peuplements de même volume et (ou) même âge, mais où la sylviculture est différente. Ceci implique qu'une stratification par type de sylviculture est nécessaire pour avoir une relation non ambiguë entre le coefficient de rétrodiffusion et le volume. Dans le cas de peuplements à essences mélangées, Hallikainen et al. (1990) présente un algorithme permettant une différenciation entre plusieurs espèces en analysant l'allure de chaque sondage vertical.

Dans le cas d'un peuplement équié et monospécifique, les données HUTSCAT pourraient permettre de réaliser ou de mettre à jour des cartes de station. Le simple examen visuel de la figure 2 a montré une variabilité des hauteurs d'arbres à l'intérieur d'une des parcelles. La figure 9a montre un autre exemple de sondages verticaux, cette fois au-dessus d'une parcelle équiéenne de 100 ans, supposée homogène en conditions stationnelles. Les hauteurs d'arbres varient de 20 à 28 m, indiquant une variabilité intra-parcelle appréciable. En estimant la hauteur dominante par segments de 15 sondages consécutifs, il est possible d'estimer un indice de fertilité local. La figure 9b montre, selon la même coupe que la figure 9a, les classes de fertilité déduites des données HUTSCAT, grâce à la table de production présentée par Levy (1982), corrigée pour la forêt domaniale de Mende, à partir des tables du pin noir pour le sud-est de la France calculées par Ottorini et al. (1975). Ce type d'information peut s'avérer très intéressant pour la mise en place d'une gestion fine du milieu par le forestier. De plus, la rapidité des mesures, donc le grand nombre de données acquises, et l'échantillonnage continu selon un transect sont des atouts certains. Par exemple, la forêt domaniale de Mende (d'une



**Fig. 9.** (a) Sondages verticaux fournis par HUTSCAT au-dessus d'une parcelle de pin noir âgé de 100 ans. (b) Classes de fertilité déduite à partir de Levy (1982) pour la même séquence.



superficie supérieure à 5000 ha) peut être couverte en 3–4 h par des transects espacés de 100 m, avec un coût relativement faible, le principal poste de dépense étant le coût horaire de l'hélicoptère, lequel était de 4200 francs français (700 \$US) pour la campagne, en 1997. Le prix du traitement des données est lui plus difficilement estimable, ayant été effectué dans le cadre d'un programme de recherche.

Ainsi, les mesures fournies par HUTSCAT s'avèrent non seulement fiables mais également peu sensibles aux contraintes environnementales extérieures. Ces deux atouts permettent d'entrevoir de nombreuses applications dans le domaine de la foresterie (estimation de la hauteur des peuplements et d'autres variables corrélées : volume de bois, indice de fertilité) et montrent que les diffusiomètres sondeurs radar sont d'un intérêt certain pour le gestionnaire forestier.

## Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet européen EUFORA financé par l'Union européenne. Les auteurs désirent également remercier le Laboratory of Space Technology de l'université d'Helsinki dirigé par M. M. Hallikainen pour le prétraitement des données HUTSCAT.

## Références

- Beaudoin, A., Le Toan, T., Goze, S., Nezry, E., Lopes, A., Mougin, E., Hsu, C.C., Han, H.C., Kong, J.A., et Shin, R.T. 1994. Retrieval of forest biomass from SAR data. *Int. J. Remote Sens.* **15**(14) : 2777–2796.
- Bernard, R., Frezal, M.E., Vidal-Madjar, D., Guyon, D., et Riom, J. 1987. Nadir looking airborne radar and possible applications to forestry. *Remote Sens. Environ.* **21** : 297–309.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E.S., et Christensen, N.L., Jr. 1992. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **30**(2) : 412–415.
- Hallikainen, M., Tares, T., Hyypä, J., Somersalo, E., Ahola, P., Toikka, M., et Pulliainen, J. 1990. Helicopter-borne measurements of radar backscatter from forests. *Int. J. Remote Sens.* **11**(7) : 1179–1191.
- Hallikainen, M., Hyypä, J., Haapanen, J., Tares, T., Ahola, P., Pulliainen, J., et Toikka, M. 1993. A helicopter-borne eight-channel ranging scatterometer for remote sensing—part I: system description. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **31**(1) : 161–169.
- Hyypä, J., et Hallikainen, M. 1993. A helicopter-borne eight-channel ranging scatterometer for remote sensing—part II: forest inventory. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **31**(1) : 170–179.
- Hyypä, J., et Hallikainen, M. 1996. Applicability of airborne profiling radar to forest inventory. *Remote Sens. Environ.* **57** : 39–57.
- Hyypä, J., Pulliainen, J., Hallikainen, M., et Saatsi, A. 1997. Radar-derived standwise forest inventory. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **35**(2) : 392–404.
- Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G., et Shugart, H.H. 1999. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sens. Environ.* **67** : 83–98.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., et Guyon, D. 1992. Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **30**(2) : 403–411.
- Levy, A. 1982. Pour mieux connaître la forêt domaniale de Mende. Mémoire de 3<sup>e</sup> année, École nationale d'ingénieurs des travaux sur les eaux et forêts, Nogent-sur-Vernisson.
- Nelson, R., Krabill, W., et Mac Lean, G.A. 1988. Determining forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sens. Environ.* **24** : 247–267.
- Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne Lidar system. *Remote Sens. Environ.* **56** : 1–7.
- ONF. 1989. Aménagement de la forêt domaniale de Mende, 1989. Service départemental de la Lozère, Mende.
- Ottorini, J.M., Toth, J., et Turrel, M. 1975. Tables de production du pin noir d'Autriche dans le Sud-est de la France. Institut national de la recherche agronomique – Centre national de la recherche forestière, document 75/FM/04. Diffusion limitée.

Pulliainen, J.T., Heiska, K., Hyypä, J., et Hallikainen, M. 1994. Backscattering properties of boreal forests at the C- and X-bands. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **32**(5) : 1047–1050.