

# Détermination de la biomasse aérienne du sous-bois de peuplements adultes de Pin maritime : contribution à la quantification des stocks de carbone forestier à l'aide d'indicateurs de couvert

Annabel Porté (1), Raphaël Dulhoste (1), Sandra Lopez (1),  
Alexandre Bosc (1), Céline Meredieu (1), Rémi Teissier du Cros (2),  
Pierre Trichet (1), Frédéric Bernier (4) et Denis Loustau (3)

Avec la collaboration technique de : Stéphanie Arigoni (1), Francis Bourrinet (2), Régis Burlett (1),  
Nicolas Cheval (4), Hannele Jaukinen (1), Frédéric Lagane (1), Catherine Lambrot (1),  
Thierry Labbé (1), Michel Sartore (1), Valérie Savornin (1) et Laurent Séverin (4)

(1) INRA Unité de Recherches EPHYSE – 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas cedex  
Tel. 05 57 12 28 95 – Fax. 05 56 68 05 46 - E-mail : annabel.porte@pierroton.inra.fr

(2) IFN – 62 rue de Laseppe, 33000 Bordeaux

(3) INRA Unité de Recherches EPHYSE – 71 avenue Edouard Bourlaux BP81,  
33883 Villenave d'Ornon cedex

(4) INRA Unité Expérimentale de l'Hermitage – 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas cedex

## Résumé

Des mesures de biomasse destructives de sous-bois ont été réalisées sur une série de peuplements de Pin maritime en Landes méso-hygrophile, mésophile et sèche. Nous avons estimé le stock de carbone dans ce compartiment de la forêt à  $1.75 \text{ tC ha}^{-1}$ , en moyenne. Une forte variabilité existe résultant des conditions stationnelles.

D'autre part, nous avons construit un indice volumique de sous-bois pouvant servir d'indicateur des stocks de carbone dans la biomasse aérienne du sous-bois. Cet indice est calculé à partir des notations de recouvrement par espèce et de hauteurs moyennes

réalisées classiquement par l'Inventaire Forestier National (IFN) sur ses points de sondage. Nous l'avons comparé aux données de biomasse acquises durant cette étude ; des relations significatives ont été mises en évidence pour les herbacées, les fougères et les mousses. Il conviendrait d'adapter la méthode en travaillant par espèce pour améliorer la relation pour les ligneux.

## 1. Introduction

La gestion durable des peuplements forestiers implique d'assurer conjointement les fonctions sociales, économiques et écologiques de la forêt, pour les temps présent et futur (Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement 1992). Lors de la Conférence Interministérielle pour la Protection des Forêts en Europe (Helsinki 1993), une série de 6 critères a été présentée afin d'évaluer cette gestion durable. L'un de ces critères correspond à la conservation et l'amélioration des ressources forestières en terme de contribution au cycle global du carbone.

Les mesures de flux de carbone réalisées sur un échantillon d'écosystèmes forestiers en Europe font ressortir une forte variabilité inter-site du bilan net de carbone de l'écosystème (Valentini et al. 2000). Les auteurs soulignent notamment que l'un des éléments les plus mal connus est la contribution du sous-bois à cet ensemble ; son importance varie suivant l'âge des peuplements, le climat, la fertilité du site et la composition spécifique du peuplement. D'après Dupouey et al. (2000), le stock moyen de carbone dans le sous-étage (sous-bois vivant + bois mort) des forêts françaises est de 4 %, ce qui correspond pour les pinèdes landaises à 2.5 tC ha<sup>-1</sup> en moyenne. Cette estimation ne tient pas compte de la variabilité des conditions rencontrées dans le massif forestier landais. Ces résultats demandent donc à être complétés.

D'autre part, nous ne disposons pas à l'heure actuelle d'indicateurs permettant d'évaluer correctement et simplement les stocks de carbone en sous-bois de ces forêts. Armand et al. (1993) ont établi des relations permettant d'estimer la biomasse individuelle d'arbustes, connaissant le volume d'espace qu'ils occupent. Par analogie à cette technique, nous avons proposé d'utiliser des notations de recouvrement au sol par espèce du sous-bois comme indicateurs de leur biomasse. Cette étude s'intègre dans le projet FORSEE (financé avec l'aide de l'Union européenne, FEDER - Interreg IIIB Espace atlantique) qui vise à élaborer un guide régional pour l'évaluation de la gestion durable des forêts. Le premier objectif de notre étude était de préciser la contribution du sous-bois au stock de carbone de différents peuplements du massif landais ; le second objectif était d'évaluer la pertinence des notations de recouvrement réalisées en routine par l'IFN (Inventaire Forestier National) comme estimateurs des stocks de biomasse aérien du sous-bois. Plusieurs méthodes ont été testées, afin de pouvoir faire évoluer, éventuellement, les pratiques d'inventaire.

## 2. Méthodologie

Une estimation de la biomasse aérienne du sous-bois forestier a été réalisée en juillet 2005 sur une sélection de 14 peuplements de Pin maritime âgés de 25 à 35 ans (Figure 1). Ils ont été sélectionnés selon leur appartenance aux différents types de landes : mésohygrophile, mésophile, sèche.

La biomasse du sous-bois a été mesurée dans 20 emplacements carrés de 1 x 1 m répartis dans un cercle de 1 ha (rayon 56.4 m). Le relevé floristique et la description du couvert absolu au sol ont été réalisés sur un cercle central de 15 m de rayon. (Figure 2).

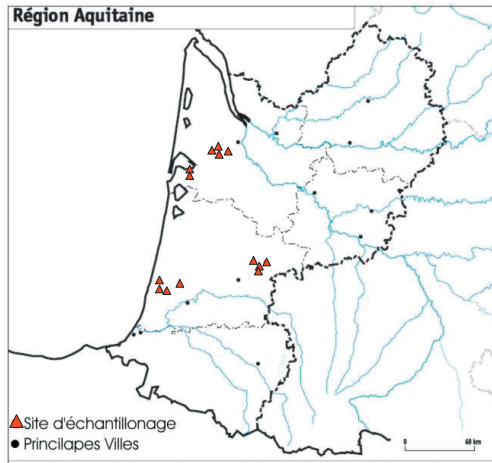


Figure 1. Carte de l'Aquitaine présentant la localisation des peuplements inventoriés.

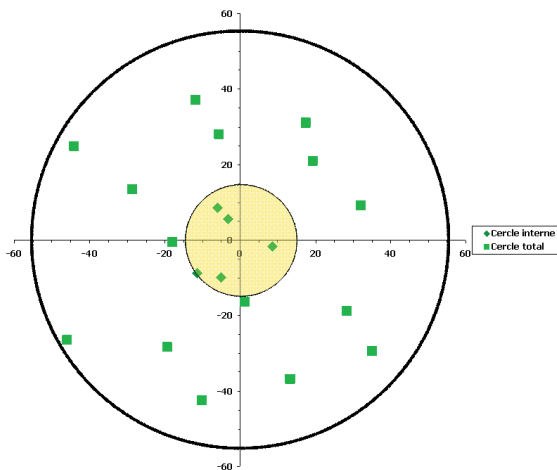


Figure 2. Disposition des points d'échantillonnage de sous-bois réalisés dans une zone couvrant 1 ha dans chaque peuplement. La notation de couvert absolu par strate a été opérée dans la zone centrale (cercle interne de rayon = 15 m) où 5 prélèvements de biomasse ont été réalisés.

Les mesures destructives de biomasse ont été complétées par un échantillon de 15 points supplémentaire dans la zone externe de rayon = 56.4 m.

Le couvert de la végétation a été décrit par strate (ligneux supérieurs à 2 m de hauteur, ligneux inférieurs à 2 m de hauteur, herbacées et fougères, mousse). Au sein de chaque strate, le recouvrement absolu est noté par espèce et exprimé en 1/4 (notation classique) ou en 1/10<sup>ème</sup> (notation précise). Pour chaque espèce, la hauteur moyenne a été estimée visuellement.

Afin de pouvoir confronter biomasse et indices de couvert, l'échantillonnage de biomasse a été réalisé de façon emboîtée : 5 emplacements positionnés aléatoirement dans le cercle interne et 15 emplacements placés aléatoirement dans le reste de la zone d'analyse. La totalité du sous-bois présent sur chaque emplacement a été prélevée par groupe d'espèces : les herbacées (H), les fougères (F), les ligneux inférieurs à 2 m (LB), les ligneux supérieurs à 2 m (LH) et les mousses (M). Pour chaque prélèvement de 1 m<sup>2</sup>, nous avons noté la présence (notée 1/20) ou non (notée 0/20) de chacun de ces groupes d'espèces ; la somme de ses notations nous a permis de calculer une fréquence d'apparition par peuplement échantillonné. Pour les ligneux (LB et LH), ces notations ont été réalisées par espèces ou genre. Les prélèvements ont ensuite été séchés à l'étuve à poids constant (65°C) puis pesés pour déterminer la biomasse sèche. Les compartiments chlorophylliens et non chlorophylliens ont été séparés sur les végétaux ligneux afin de disposer d'une estimation de la répartition de la biomasse entre les compartiments ligneux et verts, réalisant la photosynthèse. Les données sont exprimées en tonnes de matière sèche par hectare (t MS.ha<sup>-1</sup>) ou transformées en tonnes de carbone par hectare (t C.ha<sup>-1</sup>) en considérant la valeur de 50 % pour la teneur en carbone.

### 3. Biomasse du sous-bois de peuplements de Pin maritime

#### 3.1 Avant-propos : cas des ligneux de plus de 2 m

Les ligneux hauts ont été retirés de l'analyse car il est apparu que les relevés de recouvrement ne correspondent pas avec les relevés de biomasse, et réciproquement : aucune des deux méthodologies employées (indice de couvert et prélèvements de biomasse) n'a permis de déterminer correctement ce compartiment du sous-bois. Ceci est probablement lié à la forte hétérogénéité spatiale de leur distribution ; un traitement par inventaire similaire à celui appliqué à la strate arborée, pourrait être mise en oeuvre pour estimer sa contribution aux stocks du sous-bois.

#### 3.2 Structuration en fonction des caractéristiques des peuplements

Selon les sites, nous avons observé la présence ou non dans le groupe des ligneux de deux espèces d'ajoncs (*Ulex europaeus* et *U. minor*), de nombreuses Ericacées (*Erica* sp., *Calluna vulgaris*), de chèvrefeuille (*Lonicera periclymenum*), de bourdaine (*Rhamnus frangula*), de semis de chêne (*Quercus ilex*, *Q. petraea*, *Q. suber*), de semis de pin (*Pinus pinaster*). Les notes de fréquence ainsi que les valeurs moyennes de biomasse par groupes d'espèces sont présentés sur la Figure 3, plan principal de l'ACP (Analyse en Composantes Principales). L'axe 1 permet de discriminer les sites en fonction de la proportion de fougères (F0FOU, BFOU) et ligneux (BLBN, BLBV, F0BRU) : côté gauche, se situent les sites présentant beaucoup de fougères en fréquence (F0) et en biomasse (B) et de chèvrefeuille (F0LON) et peu de ligneux ; côté droit ceux présentant beaucoup de ligneux dont la bruyère (F0BRU). L'axe 2 oppose les sites en fonction de la présence forte d'herbacées (en haut) et la présence forte de mousses (en bas). L'opposition visualisée sur l'axe 1 entre fougères et ligneux semble traduire la pertur-

bation anthropique du sous-bois liée aux travaux sylvicoles de débroussaillage. Timbal et Caze (2005) ont montré que les faciès à fougère ne constituent pas un type de Landes à proprement parler mais la dégradation de Landes méso-hygrophiles à molinie (*Molinia coerulea*) et fougère (*Pteridium aquilinum*) liée aux actions anthropiques. Ce phénomène est déjà connu des forestiers qui rattachent le fort développement des fougères au débroussaillage (entraînant la fragmentation des rhizomes) puis constatent leur disparition progressive avec le temps, conjointement au développement de végétaux ligneux et herbacés. La perturbation supprime une grande partie des ligneux du sous-bois et facilite le développement opportuniste de la fougère. Plus le temps passe après la perturbation, plus les ligneux se développent et deviennent prépondérants, limitant le développement de la fougère (Demounem et Legigan 1988).

L'axe 2 peut s'interpréter comme un gradient d'humidité, opposant les conditions plus humides des Landes méso-hygrophiles où se développent les herbacées, essentiellement la molinie, aux conditions plus sèches caractérisées par la présence en quantité de mousses. L'abondance de la molinie est classiquement reconnue comme indicatrice de conditions humides (Rameau et al. 1989, Guinaudeau 1964, Timbal et Caze 2005) et l'abondance de mousses (*Pleurozium schreberi* et *Dicranum scoparium*) est indiquée comme caractéristiques des Landes sèches (Timbal et Caze 2005).

Les sites secs de Vielle se caractérisent par l'abondance de mousse et une forte biomasse totale et s'opposent aux sites de Lande méso-hygrophile (plus humide) à forte abondance de Molinie (Bray, Retjons, Nezzet 1232, Marcheprime C5 et H5). Du côté gauche du graphe (Figure 3) se regroupent les sites mésophiles à forte abondance de fougère (Marcheprime C21, Herm 49, Losse 41, Messanges, Vieux Boucau). Ce type de Lande et d'association végétale est présenté plutôt comme le résultat de l'action anthropique sur les Landes méso-hygrophiles. Ce groupe s'étale le long de l'axe 2, distinguant des sites plus ou moins humides.

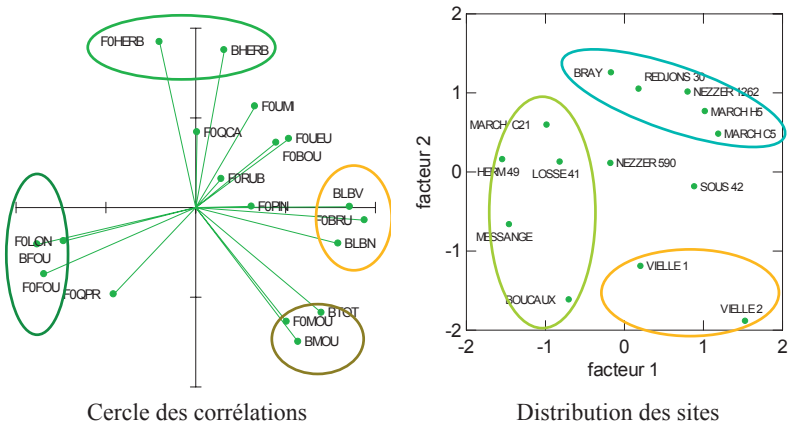


Figure 3. Analyse en composantes principales des variables de biomasse par groupe d'espèces et des notations de fréquence d'apparition des groupes d'espèces dans l'échantillon réalisé dans chaque peuplement. Le cercle des corrélations présente la structuration des variables mesurées et leur corrélation avec les axes principaux : BFOU = biomasse de fougère, BMOU = biomasse de mousse, BLBV = biomasse de ligneux bas - partie chlorophyllienne, BLBN biomasse de ligneux bas - partie non chlorophyllienne, BHERB = biomasse d'herbacées, BTOT = biomasse totale, FOFOU = fréquence de fougère, FOMOU = fréquence de mousse, FOLON = fréquence de chèvrefeuille, FOQPR = fréquence de chêne à feuilles persistantes, FOQCA = fréquence de chêne à feuilles caduques, F0RUB = fréquence de ronce, F0UEU = fréquence d'ajonc d'Europe, F0UMI = fréquence d'ajonc nain, F0BOU = fréquence de bourdaine, F0PIN = fréquence de semis de pins, FOBRU = fréquence de bruyères, FOHERB = fréquence d'herbacées. Le graphe de droite présente la répartition des sites dans le plan défini par les variables mesurées.

### 3.3 Biomasse estimée

Les valeurs de biomasse aérienne totale<sup>1</sup> estimées par ha varient entre 1.5 tMS ha<sup>-1</sup> de matière sèche à 8.2 tMS ha<sup>-1</sup> (Tableau I, Figure 4). Les sites sont présentés de gauche à droite selon leur classement en type de Landes, du plus humide vers le plus sec. Ce classement a été réalisé à partir des relevés floristiques sur les placettes, en prenant les critères de communautés végétales et d'espèces indicatrices de Timbal et Caze (2005). Tous sites confondus, on estime une biomasse moyenne de 3.5 tMS ha<sup>-1</sup> soit un stock de 1.75t ha<sup>-1</sup> de carbone. Il apparaît des fortes variations au sein de chaque type de Landes. Le type « Sec » montre de fortes valeurs de biomasse, systématiquement supérieures à la moyenne calculée sur cet échantillonnage.

On retrouve certains indicateurs classiques de type de Landes : présence d'herbacées (principalement molinie) en Landes dites méso-hygrophiles et mésophiles, et quasi-disparition en Landes dites sèches. Simultanément, les fougères sont en plus forte proportion en Landes mésophiles (entre 20 et 80 % de la biomasse totale). La fougère est

<sup>1</sup> A partir de ce point, la biomasse totale du sous-bois est employée pour faire référence à l'ensemble des herbacées, des fougères, des ligneux de moins de 2 m et des mousses, à l'exclusion des ligneux de plus de 2 m.

cependant présente dans des peuplements dits en Lande méso-hygrophile et dits en Lande sèche. La biomasse de mousse est considérable, représentant en moyenne 1/3 de la biomasse (32 %, écart-type= 25 %) notamment dans les Landes dites sèches (57, 77 et 61 % sur les sites de Soustons, Vielle 1 et 2).

Site	Type de lande	Biomasse (t/ha)				Totale
		Fougère	Herbacées	Ligneux Bas	Mousse	
BRAY	Méso-hygrophile	0.0481	0.6052	0.7099	0.1360	<b>1.4992</b>
MARCH C5	Méso-hygrophile	0.1750	0.6082	2.1141	1.6706	<b>4.5679</b>
MARCH H5	Méso-hygrophile	0.0000	0.9099	2.7555	1.0451	<b>4.7106</b>
NEZZER 1262	Méso-hygrophile	0.0397	0.7013	2.2622	0.4460	<b>3.4493</b>
NEZZER 590	Méso-hygrophile	0.6231	0.3749	1.1631	0.5799	<b>2.7411</b>
RETJONS 30	Méso-hygrophile	0.0000	0.8930	0.5013	1.3416	<b>2.7359</b>
MARCH C21	Mésophile	1.6258	0.6243	0.4643	0.0525	<b>2.7669</b>
BOUCAU	Mésophile	1.0844	0.0041	0.5622	2.2635	<b>3.9143</b>
HERM 49	Mésophile	1.9687	0.2773	0.1428	0.0000	<b>2.3887</b>
LOSSE 41	Mésophile	1.0630	0.4405	0.0550	0.2476	<b>1.8060</b>
MESSANGES	Mésophile	1.3928	0.0924	0.0693	0.4778	<b>2.0323</b>
SOUS 42	Sèche	0.0000	0.0141	1.4339	1.9018	<b>3.3498</b>
VIELLE 1	Sèche	0.4838	0.0009	0.6797	3.9116	<b>5.0759</b>
VIELLE 2	Sèche	0.1250	0.0000	3.0727	5.0548	<b>8.2524</b>
	<b>Moyenne (écart-type)</b>	<b>0.6164 (0.6860)</b>	<b>0.3962 (0.3358)</b>	<b>1.1419 (1.0211)</b>	<b>1.3663 (1.5187)</b>	<b>3.5207 (1.7503)</b>

Tableau I. Biomasse de sous-bois par groupe d'espèces (t MS ha<sup>-1</sup>).  
Le type de Landes correspond à la classification présentée par Timbal et Caze (2005) et réalisée à partir des relevés floristiques de cette étude.

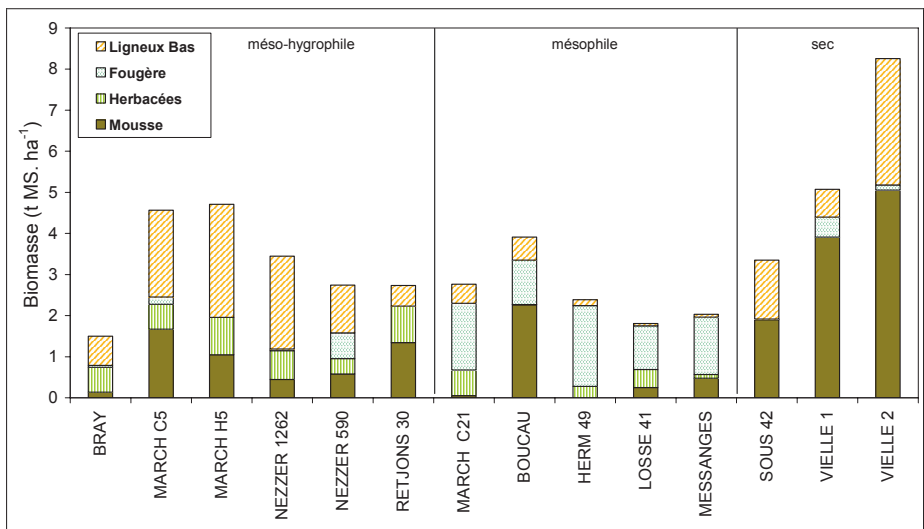


Figure 4. Biomasse par hectare de sous-bois (t MS ha<sup>-1</sup>) estimée pour chaque site échantillonné. Les trois zones correspondent à leur classification en type de Landes, du plus humide au plus



sec. La classification correspond à celle présentée dans Timbal et Caze (2005) et se base sur les relevés floristiques réalisés par l'IFN dans les peuplements de cette étude.

#### 4. Contribution à l'estimation des stocks de carbone forestier à l'aide d'indicateurs de couvert

Nous avons déterminé pour chaque groupe végétal un indice volumique (phytovolume) : il correspond à la somme pour toutes les espèces du groupe du produit de la note de recouvrement (exprimée en %) par la hauteur moyenne mesurée de l'espèce ( $\sum(\text{recouvrement} \times \text{hauteur})$ ). Il apparaît de très bonnes relations entre le stock de carbone de chaque groupe d'espèces du sous-bois et ces indices volumiques (Figure 5). Les relations pour les fougères et les ligneux bas sont de forme linéaire, et suivent une allure de puissance pour les mousses et les herbacées. Ce type de relations entre biomasse et phytovolume avait déjà été établi avec succès en région méditerranéenne sur des espèces arbustives de sous-bois (Armand et al. 1993).

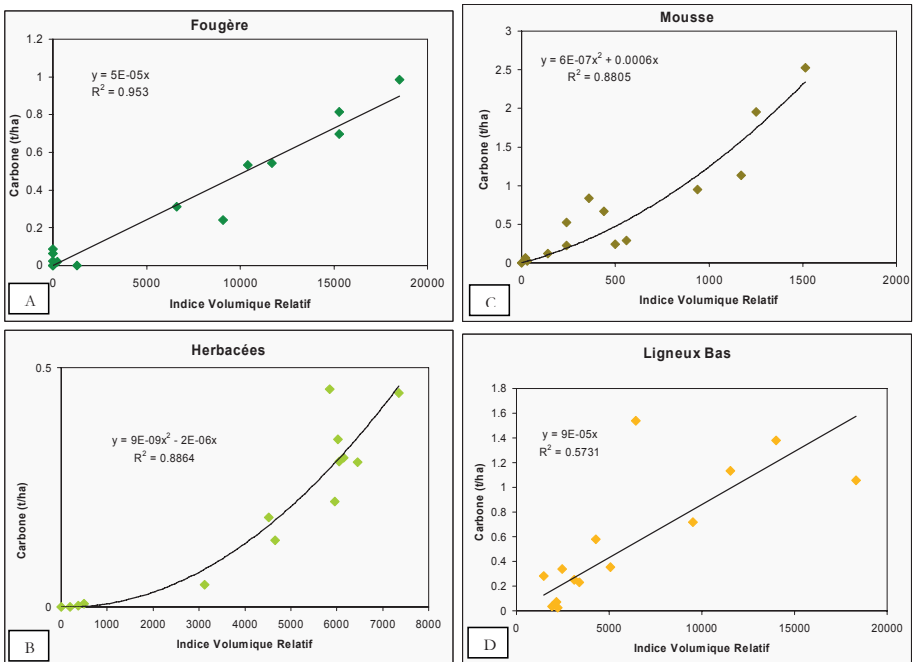


Figure 5. Relations entre la biomasse de sous-bois et l'indice volumique de couvert par groupe d'espèces ( $\sum(\text{recouvrement} \times \text{hauteur})$ ). (A) Fougères, (B) Herbacées, (C) Mousses, (D) Ligneux bas (H < 2m).

Si on utilise uniquement les relevés de biomasse réalisés dans le cercle interne décrit lors des notations de couvert, nous n'obtenons pas de relations significativement cor-

rectes entre l'indice volumique et la biomasse du sous-bois. De même, nous avons testé l'utilisation de notation de recouvrement classiquement appliquées par l'IFN : inspirées du code Braun-Blanquet, elles correspondent à des notations par classe de recouvrement de 25 %. Leur utilisation ne donne pas de résultats aussi satisfaisants en terme de relation avec la biomasse. Les notations plus précises par classe de recouvrement de 1/10 sont donc préférables.

Compte tenu de la forte variabilité des végétaux ligneux rencontrés (ajoncs, bruyère, callune, bourdaine), la relation obtenue pourrait sans doute être améliorée en travaillant par espèce, plutôt qu'en les regroupant dans le groupe d'espèces Ligneux bas.

Néanmoins, les relations restent significatives et d'excellente qualité ; cela indique que les relevés floristiques associés à des mesures de hauteur moyenne et des notations de recouvrement permettent d'estimer correctement les stocks de carbone de sous-bois dans les peuplements de Pin maritime.

Afin que les inventaires réalisés par l'IFN puissent éventuellement servir d'indicateurs de stock de carbone en sous-bois, il serait donc nécessaire de compléter les actuelles mesures de recouvrement par des estimations de hauteur moyenne ; il conviendrait aussi d'affiner les notations de recouvrement réalisées habituellement par 1/4.

## 5. Conclusion

Cet échantillonnage de sites en fonction du type de Landes a permis d'accroître la connaissance que nous avons des stocks de carbone dans les sous-bois forestiers des peuplements de Pin maritime des Landes de Gascogne âgés entre 25 et 35 ans. La valeur calculée est en moyenne de  $1.75 \text{ tC ha}^{-1}$ , avec une gamme allant de  $0.75$  à  $4.12 \text{ tC ha}^{-1}$ . Nous avons mis en évidence que l'indice volumique utilisé ici présente un fort intérêt potentiel pour estimer la valeur moyenne du stock de carbone dans la biomasse aérienne du sous-bois, au sein d'une classe d'âge de peuplements de Pin maritime. Cet indice repose sur des notations de recouvrement par espèce et de hauteur moyenne, simples à obtenir sur le terrain. Il sera intéressant d'une part de résoudre les difficultés rencontrées pour la strate de ligneux haut de plus de 2 m et d'autre part pour les ligneux de moins de 2 m d'accroître la précision de la relation établie en travaillant par espèce. Outre les questions liées à l'estimation et la gestion des stocks de carbone, ces résultats riches d'information sur la quantité de biomasse du sous-bois pourront profiter aux études et aux organismes (ARDFCI) visant à caractériser les risques d'inflammabilité en milieu forestier.

Compte tenu de la variabilité rencontrée pour un même type de Landes, il serait intéressant d'élargir l'échantillonnage à des sites d'âges différents mais également conduits selon des scénarios sylvicoles contrastés en terme de fréquence et d'intensités des interventions pour tester les relations établies ici.

## Références

Armand D., Etienne M., Legrand C., Maréchal J. et Valette JC. 1993. Phytovolume, phytomasse et relations structurales chez quelques arbustes méditerranéens. *Ann.Sci. For.* 50: 79-89.

Demounem R. et Legigan P. 1988. *Les Landes et l'homme*. Centre d'animation du Graoux (Ed.), Belin-Beliet, France. 144 p.

Dupouey J.-L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J.-F., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S. et Nys C. 2000. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Rev.For.Fr.* LII (n° special) : 139-154.

Timbal J et Caze G. 2005. Inventaire des habitats forestiers du site-pilote du bassin-versant du Canteloup (40). 52 pp. Consulté le 14/10/05 [http://www.pierroton.inra.fr/IEFC/activites/FORSEE/rapports/FORSEE\\_Aquitaine.C4.flore.pdf](http://www.pierroton.inra.fr/IEFC/activites/FORSEE/rapports/FORSEE_Aquitaine.C4.flore.pdf)

Valentini R. and his collaborateurs. 2000. Respiration as the main determinant of carbone balance in European forests. *Nature*, vol 404, 20 april.