

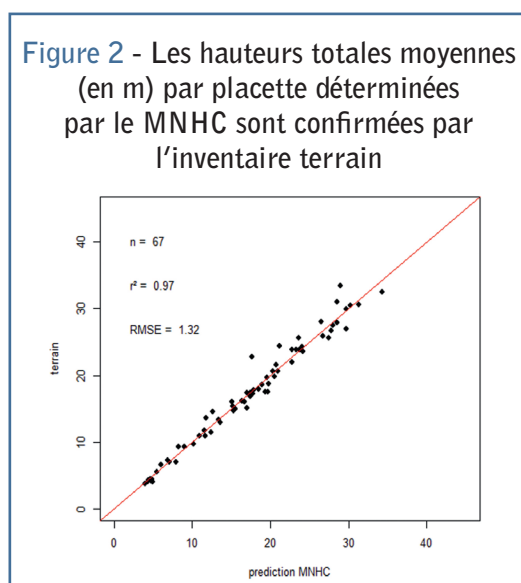
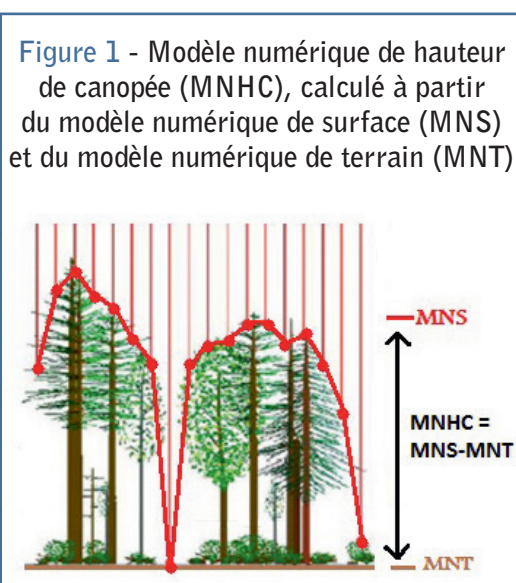
Quels outils pour estimer les stocks de carbone du pin maritime dans les Landes ?

¹ Telespazio France, Aérocampus 1 route de Cénac, 33360 Latresne



Par Lucie Rupil et Amélie Castro, CNPF-CRPF Nouvelle-Aquitaine, Jean-Charles Samalens, Telespazio¹

L'estimation des stocks de carbone des forêts de pin maritime des Landes de Gascogne est mieux connue grâce à la modélisation et aux travaux du CRPF Nouvelle-Aquitaine.



Dans le cadre du programme européen *Life Forest CO₂* (2016-2019), une première phase réalisée en collaboration avec la société Telespazio France a validé une méthode innovante d'estimation des stocks de carbone sur pied en utilisant des images 3D stéréoscopiques¹. Dans un deuxième temps, le bilan carbone du pin maritime pour différents itinéraires sylvicoles est calculé en combinant l'utilisation d'un modèle de croissance et d'un logiciel de quantification de la séquestration carbone.

Détermination des stocks de carbone sur pied à partir d'un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) sur une forêt de pin maritime

Le MNHC est un modèle calculé à partir de données altimétriques et géoréférencées produites par corrélation entre plusieurs images aériennes. Les données brutes du MNHC

sont des hauteurs de canopée correspondant à une différence entre des altitudes du relief (calculées à partir d'un modèle numérique de surface) et des altitudes du terrain (calculées par un modèle numérique de terrain, *figure 1*). Ces hauteurs peuvent alors être associées à une hauteur totale de l'arbre ou à une hauteur de végétation du sous-bois par exemple.

À partir de ces données, il est dans un premier temps nécessaire d'extraire des variables dendrométriques, ici des hauteurs totales des arbres, à l'aide d'un modèle statistique pour estimer par la suite des volumes de bois puis les convertir en stocks de carbone.

Une campagne de mesures en forêt (*encadré p. 39*) a été réalisée afin de définir le meilleur modèle statistique de prédiction des hauteurs totales des arbres à partir des données du MNHC. L'inventaire forestier a permis de comparer au même endroit les hauteurs modélisées par le MNHC avec des hauteurs mesurées sur le terrain.

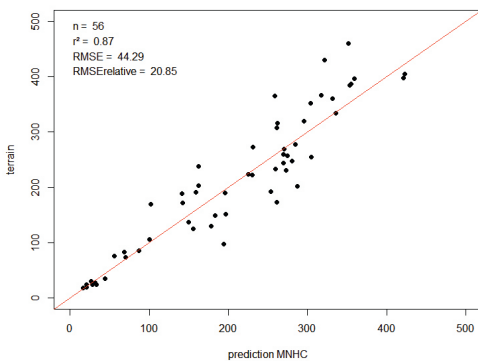
¹ Relatif à un stéréoscope : instrument optique de représentation du relief du terrain à partir de photos aériennes. *Vocabulaire forestier*, p.483. Éditions CNPF-IDF.

Une campagne de mesures

L'inventaire forestier a été réalisé au domaine des Agreux (Fondation Jacques et Françoise Lescouzères, Retjons, Landes), sur environ 650 ha de forêt de pin maritime en futaie régulière, dont les âges sont connus.

- ➡ 72 placettes d'environ 400 m² inventoriées réparties dans toutes les classes d'âge, soit 1 placette pour 10 ha
- ➡ 6 jours de mesures terrain à 2 opérateurs
- ➡ Plusieurs paramètres relevés :
 - le point GPS du centre de la placette ;
 - les hauteurs et circonférences des 10 arbres les plus proches du centre ;
 - la densité ;
 - la fraction de trouée (estimation visuelle du couvert) ;
 - la hauteur moyenne du sous-bois.

Figure 3 - Validation des résultats de volume total prédits à partir du MNHC (en m³/ha) avec ceux calculés à partir des données de terrain.



Le modèle utilisé est le modèle de Bouvier¹ qui intègre 3 variables : hauteurs (H), variance de la hauteur et fraction de trouées (FT).

$$\text{Vol} = b_0 \times H^{b_1} \times \text{var}(H)^{b_2} \times \text{FT}^{b_3}$$

Les constantes du modèle (b_0 , b_1 , b_2 et b_3) ont été calibrées avec les volumes calculés par la formule du volume total pour le pin maritime issue du projet EMERGE², en intégrant les hauteurs et diamètres mesurés sur le terrain.

¹ Bouvier M. et al., 2015. *Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LIDAR data*, Remote Sensing of Environment, 156, p. 322-334.

² Deleuze C. et al., 2014. *Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station*. Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 44, p. 22-32.

+ TECHNIQUE

Le modèle retenu (qui se base sur le calcul du 95^e percentile de la distribution des hauteurs) assure une très bonne corrélation entre les hauteurs prédites par le MNHC et les hauteurs mesurées sur le terrain (figure 2, $r^2 = 0,97$) avec une erreur standard du modèle de 1,3 m, comparable à l'erreur de mesure terrain.

La deuxième étape consiste à estimer des volumes à partir d'un modèle (encadré + technique) intégrant uniquement des hauteurs totales moyennes prédites par le MNHC et la fraction de trouées. Le modèle, une fois calibré, donne des valeurs de volume total de peuplement avec une erreur de 20 % (figure 3, $r^2 = 0,87$, pour des peuplements dont le volume total est < à 500 m³/ha).

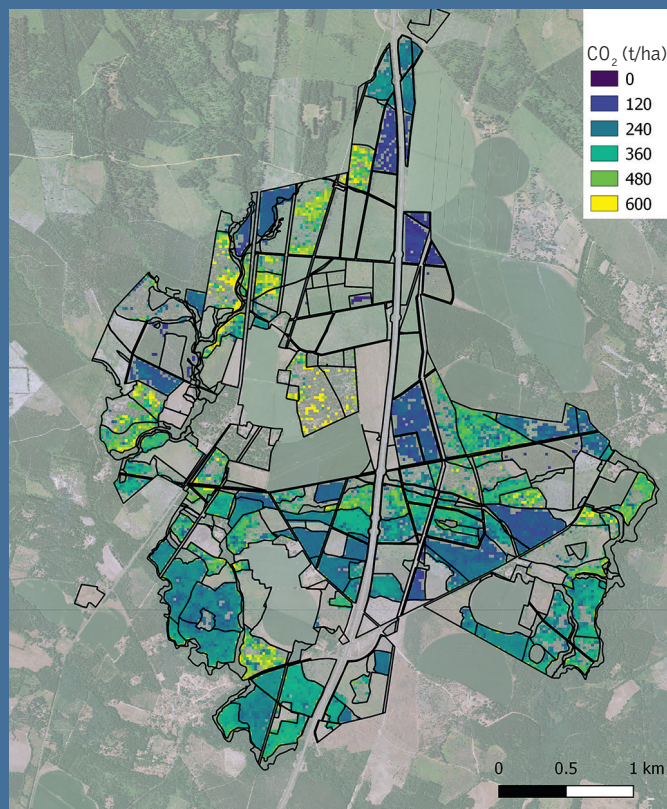
Des cartographies de volume, de biomasse et de stocks de carbone peuvent être produites à l'échelle de la propriété forestière par

blocs de 400 m² (correspondant à la surface d'une placette d'inventaire, figure 4 page 40) ou agrégées par unité de gestion forestière (à l'échelle du peuplement).

Le MNHC utilisé ici, issu de photographies aériennes, présente quelques contraintes pour l'estimation des volumes de bois et des stocks de carbone. Il n'est utilisable que pour des peuplements réguliers de plus de 5 ans. Il reste peu performant pour des peuplements hétérogènes ou en sous-densité, pour lesquels il est difficile d'estimer la fraction de trouées avec précision. Bien que la période d'acquisition des photographies aériennes soit de 4 ans, le modèle peut être ajusté pour tenir compte de la croissance des arbres en intégrant les coupes réalisées entre les prises de vue.

Ce système reste néanmoins bien adapté à une essence comme le pin maritime, dont la sylviculture se caractérise par des

Figure 4 - Cartographie des stocks de carbone dans la biomasse aérienne du pin maritime (en tCO₂/ha) par bloc de 400 m² sur le domaine des Agreaux.



La réalisation d'une estimation des stocks de carbone comprenant l'achat de la dalle du MNHC, le temps d'inventaire forestier et la prestation de traitement des données est accessible à des tarifs allant de 20 à 80 €/ha selon la surface à couvrir (contact : jean-charles.samalens@telespazio.com).

peuplements réguliers et homogènes. Les limites d'actualisation et d'exhaustivité des peuplements inventoriés peuvent être levées efficacement en produisant un MNHC à partir d'images acquises par drone, une alternative efficace à l'échelle de la propriété forestière.

Modélisation du bilan carbone en forêt de pin maritime pour plusieurs itinéraires sylvicoles

Le bilan carbone des peuplements de pin maritime en futaie régulière est modélisé à l'aide du logiciel gratuit CO2Fix². L'utilisateur peut simuler l'évolution dans le temps des stocks de carbone en forêt et dans les produits bois et les comparer selon plusieurs itinéraires sylvicoles.

Le logiciel quantifie, chaque année, les stocks de carbone dans trois compartiments :

- **la biomasse** (tronc, aiguilles, racines et branches) ;
- **le sol** en tenant compte des données climatiques et des taux d'apport de carbone provenant de la biomasse ;
- **les produits bois** en renseignant le devenir des produits issus de la coupe ainsi que leur transformation en fin de vie (recyclage, mise en décharge, incinération).

Pour estimer la séquestration du carbone dans la biomasse, des données de croissance sont nécessaires. Les modélisations de croissance du pin maritime selon différents itinéraires ont été réalisées en utilisant la plateforme Capsis³ de simulation de croissance des arbres et le modèle de croissance PP3⁴ adapté au pin maritime des Landes de Gascogne.

Quatre itinéraires sylvicoles sont étudiés pour le pin maritime à partir des itinéraires post tempête proposés dans le rapport « État des connaissances techniques, Massif des Landes de Gascogne » du CRPF Aquitaine de 2015 (tableau 1).

Comparaison des bilans carbone des 4 itinéraires étudiés sur 100 ans

Les itinéraires sylvicoles n'ont pas la même durée de révolution, ce qui entraîne des difficultés pour comparer leur niveau de stock sur une durée donnée.

La comparaison des bilans carbone de différentes sylvicultures repose sur la valeur moyenne des stocks de carbone sur une durée de simulation choisie (les valeurs de

² Logiciel développé lors du projet CASFOR financé par le programme INCO-DC de l'Union européenne et mené par l'institut néerlandais Alterra.

³ Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., Coligny F. de, *Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling*, *Annals of Forest Science*, (2012) 69:221-233.

⁴ Meredieu C., 2002 - *Intégration dans Capsis d'un modèle de croissance du pin maritime développé par l'Inra*.

Tableau 1 - Caractéristiques des itinéraires sylvicoles étudiés pour le pin maritime en classe de fertilité moyenne ($H_0 = 23,5$ m à 40 ans).

Pour l'itinéraire Biomasse Bois énergie, l'arbre entier est récolté, contrairement aux autres itinéraires où seul le tronc est prélevé. Chaque éclaircie (E1, E2,...) prélève 30 % du volume du peuplement.

	Densité initiale (tiges/ha)	Éclaircies (E)				Coupe rase
		E1	E2	E3	E4	
Longue révolution	1 250	15 ans	20 ans	26 ans	33 ans	60 ans
Standard	1 250	15 ans	20 ans	27 ans	32 ans	44 ans
Courte révolution	1 250	15 ans	22 ans	-	-	35 ans
Biomasse BE (Bois énergie)	1 250	-	-	-	-	13 ans

Figure 5 - Évolution des stocks de carbone dans la biomasse (en tC/ha) sur 100 ans pour 4 itinéraires du pin maritime

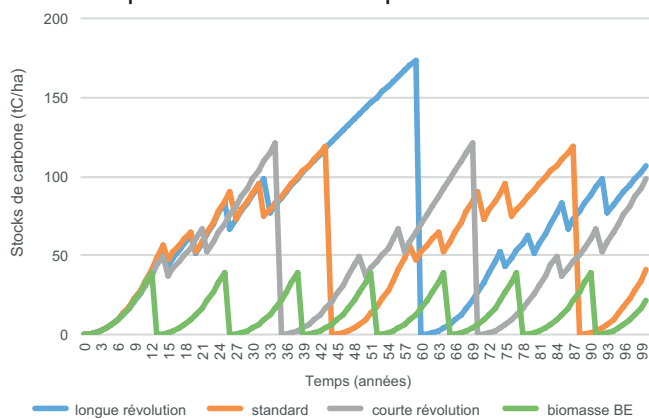
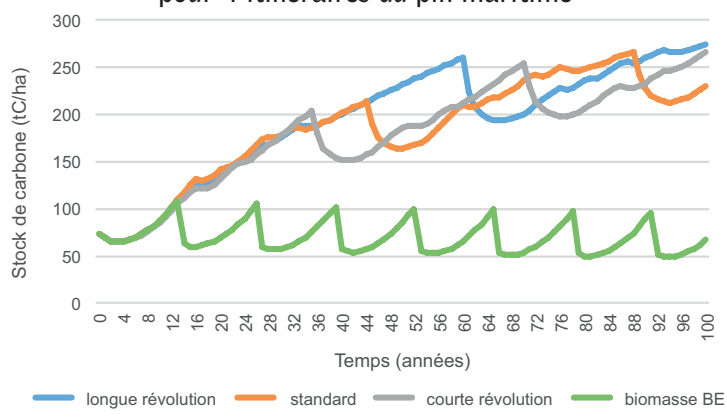


Figure 6 - Évolution des stocks de carbone total : dans la biomasse, le sol et les produits bois (en tC/ha) sur 100 ans pour 4 itinéraires du pin maritime



stock sont additionnées chaque année puis divisées par la durée totale).

En considérant uniquement **le bilan carbone dans la biomasse** des peuplements de pin maritime, l'itinéraire qui stocke le plus de carbone sur 100 ans est l'itinéraire Longue révolution du fait d'une plus longue durée de révolution (voir figure 5 et tableau 2). Cependant, cet itinéraire est aussi celui qui présente une exposition aux risques la plus élevée (non pris en compte par le calculateur).

En considérant cette fois-ci **le bilan carbone total** (dans la biomasse, le sol et les produits), les itinéraires Standard et Courte révolution

montrent des stocks de carbone relativement similaires à l'itinéraire Longue révolution (tableau 2 et figure 6).

► Pour des itinéraires plus dynamiques comme les itinéraires Standard ou Courte révolution, la fréquence plus élevée des prélèvements et la récolte majoritaire de bois d'œuvre (dont les durées de vie des produits sont les plus longues) favorisent davantage l'effet de prolongation du stockage du carbone dans les produits bois.

L'évolution du stock de carbone pour l'itinéraire Biomasse BE est très différente (figure 6). On observe une diminution du stock dans le temps liée à :

Tableau 2 - Stocks moyens de carbone dans les différents compartiments étudiés (biomasse, sol et produits bois) sur 100 ans (en tC/ha) pour 4 itinéraires du pin maritime

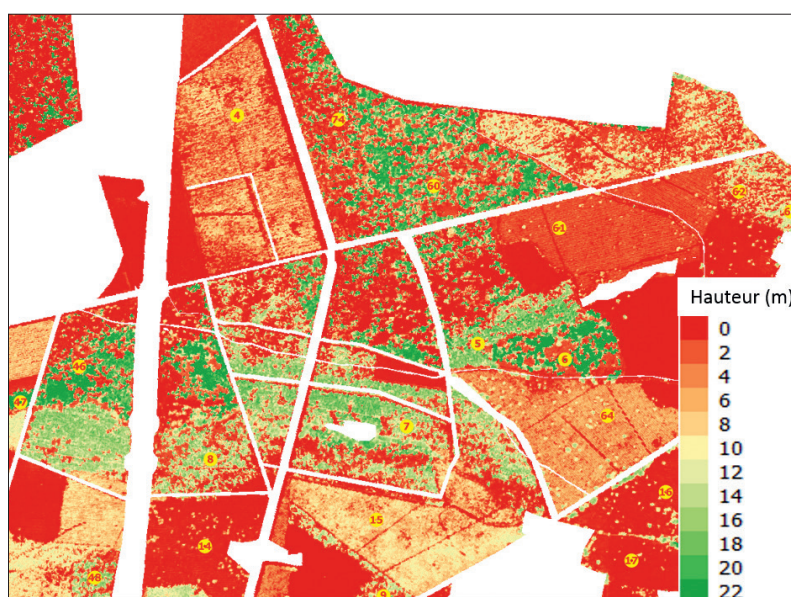
	Stocks moyens de carbone sur 100 ans (en tC/ha)		
	Biomasse	Biomasse + sol	Biomasse + sol + produits bois
Longue révolution	71,6	134,2	193,2
Standard	54,3	117,6	184,5
Courte révolution	47,4	111,0	178,9
Biomasse BE	12,7	65,7	68,7

À retenir

www.cnpf.fr/n/valoriser-le-stockage-du-carbone-en-foret/n:2501
www.cnpf.fr/n/le-carbone-forestier-en-nouvelle-aquitaine/n:3485

Une méthode innovante d'évaluation des stocks de carbone dans des peuplements de pin maritime à partir de données issues de corrélation d'images aériennes donne des résultats avec une précision de 80 % par rapport à ceux issus d'inventaire forestier. Une analyse des bilans carbone du pin maritime comparés pour 4 itinéraires définit l'itinéraire Standard comme le plus optimal en termes de stockage carbone en forêt et dans les produits bois.

Mots-clés : pin maritime, stocks de carbone, itinéraires sylvicoles, modèle de croissance, Modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC).



Modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) sur une partie du Domaine des Agreaux (40) et localisation des placettes d'inventaire.

- ▣ l'exportation de la totalité de la biomasse aérienne induisant une diminution progressive du stock du carbone dans le sol,
- ▣ la production de bois énergie qui ne permet pas de prolonger le stockage du carbone dans les produits.

Le logiciel CO2Fix est un outil intéressant pour faire des comparaisons de bilan carbone entre différents types de sylviculture. Les résultats absolus sont quant à eux à utiliser avec précaution du fait de l'intégration des accroissements courants annuels en volume dans le calcul des stocks de carbone, paramètres présentant de grandes variabilités et l'absence de prise en compte de l'effet du travail du sol (coupe

rase, travaux de préparation) sur la variation des stocks de carbone dans le sol.

Malgré les réserves émises sur les calculs, l'itinéraire standard du pin maritime paraît être un bon compromis en termes de bilan carbone, entre stockage du carbone sur pied, fréquence des renouvellements des peuplements et approvisionnement à la filière en bois de qualité, plus favorable à l'effet de substitution.

L'itinéraire standard du pin maritime paraît être un bon compromis en termes de bilan carbone.

Ce premier travail pourrait être enrichi par une analyse des effets de substitution des produits bois récoltés et par l'utilisation d'un modèle de croissance se basant sur des processus éco-physiologiques qui tient compte des impacts du changement climatique. ■

Cet article est extrait de

Forêt-entreprise

La revue technique des forestiers

Éditée par le CNPF-IDF, Forêt-entreprise est l'auxiliaire indispensable de tous les forestiers et professionnels de la forêt. Dans un langage clair et accessible, Forêt-entreprise présente les techniques les plus performantes, bénéficiant des récentes découvertes de la recherche testées sous le contrôle rigoureux des ingénieurs du CNPF, en collaboration avec l'ensemble des partenaires forestiers. Vous y trouverez également des éclairages sur les attentes de la société concernant la forêt, les actualités et les principales manifestations forestières, des conseils de lecture, les expérimentations des Ceteq et groupes de progrès de la forêt privée.

Contact : foretentreprise@cnpf.fr

POUR NE RIEN MANQUER DE L'ACTUALITÉ FORESTIÈRE : ABONNEZ-VOUS !

Retrouvez-nous sur foretpriveefrancaise.com

NOUVEAU :
Forêt-entreprise à l'heure du numérique !




Téléchargez gratuitement l'application



« Librairie des forestiers »



« Librairie forestière » sur Play Store version Android 4.0 et suivantes

Avec l'application , retrouvez votre revue directement sur iPhone, iPad, Smartphone ou tablette. Sur votre ordinateur par le lien : <http://www.bit.ly/1Q95gxU>

BON DE COMMANDE

À retourner au CNPF-IDF - 47 rue de Chaillot- 75116 Paris
Tél : 01 47 20 68 39 - Fax : 01 47 23 49 20 - idf-librairie@cnpf.fr

Nom/ Prénom
Adresse
Code postal Commune
Tél..... courriel.....

Abonnement offre découverte Forêt-entreprise - 1 an - 32 €

Étudiant : 40 €

Abonnement à Forêt-entreprise (6 numéros par an)

Votre abonnement débutera à partir du numéro suivant la date de votre souscription.

France : 49 € **Étranger : 62 €** **Remise spéciale Ceteq et groupes de progrès: 3< €**

60,72 € étranger non assujéti à la TVA indiquez-nous votre n° d'identifiant

Abonnement numérique Forêt-entreprise 9 €

Chèque bancaire ou postal à l'ordre de "agent comptable CNPF"

Code IBAN : FR76 1007 1750 0000 0010 0066 428 SWIFT (BIC) : TRPUFRP1