



**HAL**  
open science

## Changements de productivité à long-terme dans les hêtraies du Nord de la France

J.F. Dhote, Jean-Daniel Bontemps, Jean-Christophe Hervé, Daniel Rittié,  
Patrick Vallet

► **To cite this version:**

J.F. Dhote, Jean-Daniel Bontemps, Jean-Christophe Hervé, Daniel Rittié, Patrick Vallet. Changements de productivité à long-terme dans les hêtraies du Nord de la France. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2007, hors-série 3, pp.74-80. hal-02590355

**HAL Id: hal-02590355**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02590355>**

Submitted on 15 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Changements de productivité à long terme dans les hêtraies du Nord de la France

Depuis la première mise en évidence en France par Michel Becker, en 1987, jusqu'à la thèse de Jean-Daniel Bontemps (2006), qui a fourni la matière de cet article, notre connaissance des changements de productivité s'est approfondie. Mais si les méthodes d'étude sont aujourd'hui maîtrisées, la causalité du phénomène n'est pas totalement élucidée. Un constat s'impose cependant : il touche au cœur même de notre métier de forestier, et nous contraint à faire évoluer nos méthodes de travail.

La productivité forestière a augmenté au cours du 20<sup>e</sup> siècle, de façon plus ou moins prononcée, dans la plupart des régions d'Europe. En France, après les travaux pionniers réalisés par l'équipe de Michel Becker (INRA Nancy) au cours des années 1980-90, un programme de recherche a été mis en place en 1998 par le LERFoB (UMR INRA-ENGREF), en partenariat avec le GIP-ECOFOR, l'IFN et l'ONF (contrats « Productivité » et ModelFor). Ce programme vise quatre objectifs :

- réaliser un diagnostic étendu des changements à long terme intervenus pour la croissance en hauteur, en diamètre et pour l'infradensité<sup>1</sup>, la combinaison des trois variables donnant accès à la production en biomasse et à la qualité du bois ; décliner l'étude pour les principales essences sociales autochtones, sur toute l'aire géographique où elles représentent un enjeu de production ;
- dans ce but, mettre au point des procédures d'échantillonnage et de modélisation spécifiques, afin de résoudre les principales difficultés méthodologiques : séparer les effets âge et date, contrôler l'effet de la station, combiner données

rétrospectives (analyses de tige) et suivi continu (placettes permanentes) ;

- organiser le recueil des données, leur analyse et leur interprétation de manière à mieux cerner le rôle des facteurs environnementaux évolutifs : climat, concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, dépôts azotés ;

- synthétiser les résultats sous la forme de méthodes nouvelles et d'outils de gestion adaptés à un contexte en évolution (méthodes de caractérisation du milieu, modèles de croissance).

### Aborder le problème par la hauteur dominante

Un aspect très important de ce programme est de travailler sur la hauteur dominante. En effet, dans les peuplements monospécifiques équiennes, la croissance en hauteur dominante est très peu sensible à la compétition : on peut analyser rétrospectivement son évolution et en interpréter directement les caractéristiques au regard des changements environnementaux, sans avoir à se soucier de la sylviculture passée.

Si la hauteur est une variable analytique indispensable, l'acquisition des données reste très coûteuse.

Des valeurs instantanées sont insuffisantes, puisqu'on s'intéresse au changement de niveau des courbes de croissance et à leur déformation au fil du temps : on a besoin d'analyses de tige. Pour décliner l'étude selon les espèces, la fertilité de la station et les régions de production, on doit réaliser des campagnes d'échantillonnage de grande taille. Le partenariat avec l'ONF joue un rôle essentiel pour la réalisation des travaux, aussi bien en amont (appui logistique aux campagnes de terrain) qu'en aval (développement conjoint d'outils de gestion).

### Les hêtraies, modèle d'étude significatif

Le présent article a pour but de présenter les résultats disponibles pour la croissance en hauteur dominante du hêtre, en se focalisant sur le contraste entre Nord-Est et Nord-Ouest, puis de donner quelques éléments sur les conséquences pour la gestion (voir le hors série n° 2 des RDV techniques consacré à la gestion des hêtraies). Des travaux similaires sont en cours d'analyse pour le chêne sessile et l'épicéa commun. Sans anticiper sur leurs résultats, on peut simplement considérer les hêtraies

<sup>1</sup> Infradensité : masse de matière sèche/volume avec écorce [en kg/m<sup>3</sup>]



INRA

Prélèvement standardisé de rondelles pour analyse de tige

comme un modèle d'étude, particulier mais significatif des fortes évolutions à l'œuvre dans les écosystèmes forestiers.

### Méthode d'étude de l'évolution de la croissance en hauteur dans le siècle écoulé

En futaie régulière, l'accroissement courant en hauteur dominante ne dépend que du stade de développement et des facteurs du milieu. Parmi ceux-ci, certains sont stables dans le temps, mais variables entre régions ou stations : nous parlons de facteurs permanents de la production. Les autres ont évolué au cours du temps, et leur effet combiné peut être résumé dans une courbe de dérive de la croissance, indexée par la date. C'est cette courbe de dérive que nous avons cherché à établir pour le siècle écoulé.

#### Recueillir les données pertinentes...

Pour ce faire, la stratégie d'échantillonnage adoptée est basée sur la méthode des couples :

- comparer la croissance passée d'arbres aujourd'hui dominants, issus de futaies régulières pures et appartenant à des générations différentes : nous avons sélectionné des couples de peuplements voisins, « jeunes » et « vieux » ;
- rechercher les deux peuplements d'un couple dans des conditions aussi identiques que possible pour les facteurs permanents de la production que sont la topographie, l'exposition, la pente et le type de sol ; les caractéristiques du milieu (dont humus, flore, échantillons de sol) sont relevées afin de vérifier *a posteriori* la proximité des conditions stationnelles intra-couple et de fournir des co-variables pour l'analyse ;
- couvrir dans chaque région une gamme assez large de fertilités ; la réalisation de cet objectif est conditionnée par la contrainte de trouver côte à côte des futaies régulières pures d'âges différents et de surface suffisante.

Pour le hêtre, 14 couples ont été constitués dans le Nord-Est (Alsace et Lorraine), 15 dans le Nord-Ouest (Normandie et Picardie). La différence d'âge

moyenne est de 75 ans ; dans le Nord-Est, l'âge moyen des jeunes est de 65 ans, celui des vieux de 140 ans ; les peuplements du Nord-Ouest sont plus vieux de 10 ans. Dans chaque peuplement, une placette de 6 ares a été installée selon le protocole standard de Duplat et Tran-Ha (1997) : les arbres de rangs 1, 3 et 5 dans l'ordre des diamètres décroissants ont été abattus, puis débités en une douzaine de rondelles pour comptage des cernes au laboratoire. Les mesures brutes ont été converties en courbes de croissance individuelles, puis en courbes moyennes par peuplement (Bontemps, 2006).

#### ... et les traduire en équation (modèle)

Afin de restituer la chronique des changements de croissance, des modèles originaux ont été construits et ajustés aux données, pour chacune des deux régions (Hervé *et al.*, 2000 ; Bontemps, 2006). Ils ont la forme générale suivante :

$$\Delta H = g(\text{date}) \cdot f(H)$$

Dans cette expression,  $H$  et  $\Delta H$  sont la hauteur dominante et son accroissement ;  $f(H)$  est une fonction de croissance classique décrivant les effets du stade de développement et des facteurs permanents de la production ;  $g(\text{date})$  est une fonction de la date, rendant compte de la dérive à long terme (il s'agit d'une courbe spline cubique, avec un nœud tous les 15 ans) : elle vaut par convention 1 en 1900, qui est donc la référence historique. Différentes formulations ont été testées pour  $f(H)$ , qui possède des paramètres aléatoires variant entre couples et peuplements.

Compte tenu de la forme multiplicative de ces modèles, on considère donc que, quelle que soit la fertilité de la station, les changements intervenus sont les

mêmes en valeur relative (pourcentage d'augmentation par rapport à une date de référence). Cette hypothèse est cohérente avec les observations disponibles.

## Résultats : de fortes tendances, différenciées régionalement

La comparaison des hauteurs des deux générations au même âge (celui des jeunes au moment de la mesure) montre que les jeunes ont poussé systématiquement et nettement plus vite : seuls 2 couples sur 29 font exception. Dans le Nord-Est, à un âge moyen de 65 ans, les jeunes surclassent les vieux de 5,7 m. Dans le Nord-Ouest, à un âge moyen de 75 ans, la différence est de 2,2 m. Cette différence brute est un peu exagérée du fait d'accidents observés dans 7 couples : des ralentissements très marqués de la croissance en hauteur ont affecté certains vieux peuplements dans leur jeunesse. Si on ne tient pas compte de ces peuplements, l'écart est de 4 m dans le Nord-Est, 2,1 m dans le Nord-Ouest, ce qui reste considérable.

Le modèle, ajusté sur chacune des régions, peut être représenté sous la forme d'un indice de croissance : celui-ci consiste en accroissements standardisés, c'est-à-dire débarrassés des effets station et stade de développement. On constate (figure 1) que la vitesse de croissance en hauteur a augmenté au cours du 20<sup>e</sup> siècle, selon un historique irrégulier. La majeure partie de l'accélération s'est produite entre 1950 et 1980, avec des accidents d'origine climatique. On remarque ainsi la dépression prononcée de la décennie 1940, puis un nouvel accès de faiblesse autour de 1990. Ces deux phénomènes coïncident avec

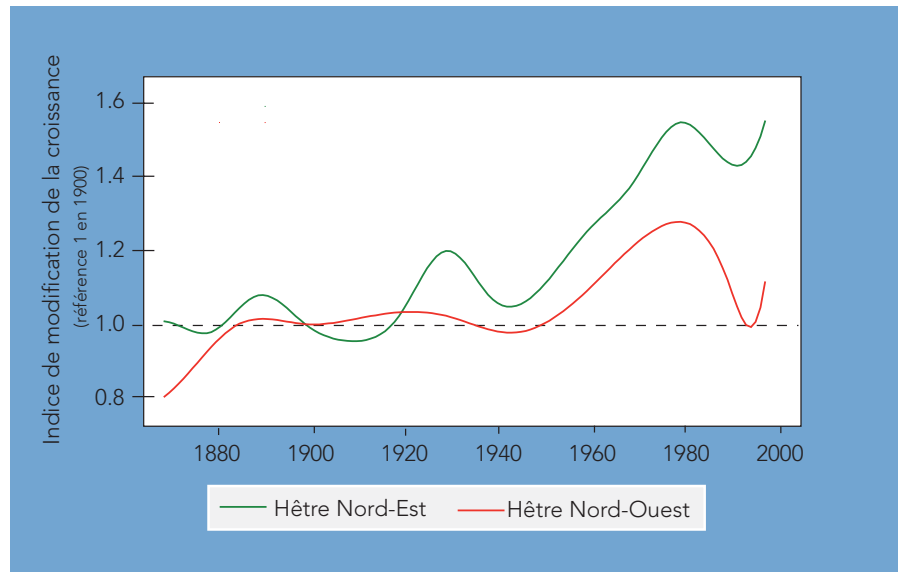


Fig. 1 : courbes de dérive de la croissance en hauteur dominante dans les hêtraies (Nord-Est et Nord-Ouest)

Par exemple, un indice de 1,2 en 1970 dans le Nord-Ouest signifie que la vitesse de croissance en hauteur dominante est en 1970, à hauteur dominante égale, supérieure de 20 % à celle de 1900

des répétitions de sécheresses estivales, auxquelles le hêtre est très sensible. Si l'on considère la dépression centrée autour de 1990 comme un phénomène transitoire, on peut estimer que le niveau actuel de l'indice de croissance est voisin de 1,5 pour le Nord-Est, de 1,25 pour le Nord-Ouest.

Les deux régions présentent des historiques parallèles. Cependant, le niveau de la dérive varie fortement d'une région à l'autre. De 1900 à 2000, l'accélération atteint +50 % dans le Nord-Est, elle est moitié moindre dans le Nord-Ouest. À côté des facteurs globaux souvent invoqués (climat, CO<sub>2</sub> atmosphérique), cela traduit donc l'implication de facteurs du milieu dont le niveau et/ou l'évolution sont régionalisés (exemple des dépôts atmosphériques azotés).

La signification de ces dérives doit être précisée. Une tendance de 50 % sur la vitesse de croissance ne veut pas dire que les peuplements sont maintenant

50 % plus hauts qu'ils ne l'étaient au début du siècle dernier. Compte tenu de la forme du modèle utilisé, elle s'interprète comme une « contraction du temps », c'est-à-dire un raccourcissement de la durée nécessaire pour atteindre un stade donné. À supposer que le diamètre ait été stimulé comme la hauteur (hypothèse plausible au vu des éléments dont nous disposons), ce chiffre implique une réduction potentielle d'un tiers des durées de révolution dans le Nord-Est. Dans le Nord-Ouest, la réduction est d'un cinquième.

## Évolution attendue des hêtraies à maturité d'ici 2100

### Simuler différents scénarios pour éclairer le gestionnaire

Afin de fournir aux gestionnaires de premières indications sur les conséquences pour la gestion des hêtraies, les résultats pour le Nord-Est ont été intégrés dans le modèle de croissance Fagacées, programmé dans la plate-forme de simulation CAP-

**Le modèle de croissance Fagacées dans la plate-forme de simulation CAPSIS**

*Fagacées* est un modèle de croissance pour les peuplements purs et réguliers de hêtre. Il permet de simuler la production des peuplements, la croissance et la morphologie des arbres individuels (hauteur, diamètre, remontée du houppier, volumes). Les entrées contrôlées par l'utilisateur sont les caractéristiques de la station (région de production, indice de fertilité) et la sylviculture (coupes d'éclaircie programmées en manipulant la distribution en classes de diamètre). Le modèle fournit des prévisions à l'échelle du peuplement et sur la révolution complète. *Fagacées* exécute ses simulations à partir d'un peuplement initial, fourni par l'utilisateur (inventaire en classes de diamètre, âge, hauteur dominante et date de naissance) ou bien créé automatiquement selon différentes options (régénération naturelle ou plantation).

**Fonctionnalités :** *Fagacées* appartient à la famille des *modèles d'arbre indépendants des distances*. Il permet d'explorer de manière assez souple des stratégies d'éclaircie variées, quant au matériel sur pied (intensité et rotation des coupes) et à la nature des éclaircies (par le haut, par le bas). Par contre, il ignore la position des arbres dans l'espace et donc les variations locales de la compétition. De ce fait, le modèle est bien adapté aux éclaircies en plein et ne convient pas aux sylvicultures d'arbres objectif très individualisées, du type détournage. Toutefois, nous considérons que ses prévisions pour des régimes d'éclaircies fortes donnent une bonne estimation de l'âge d'exploitabilité qu'on peut escompter sous détournages.

**Calibration et domaine de validité :** *Fagacées* a été calibré à partir de placettes permanentes observées pendant 50 à 120 ans, entre 1880 et aujourd'hui, couvrant la gamme complète des âges au-delà du stade bas perchis (de 30 à 200 ans) et largement dispersées sur toute la moitié Nord de la France. Du point de vue sylvicole, le réseau est constitué d'essais d'éclaircies, les coupes étant en plein et laissant sur pied entre 0,5 et 1 fois le matériel biologique maximal permis par la station. Les stations représentées ont des indices de fertilité répartis dans la moitié supérieure des valeurs possibles. Le modèle est valide sur ce domaine et fournit des prévisions raisonnables au-delà ; il a notamment été testé favorablement pour les régimes d'éclaircies très fortes. La calibration de la croissance en hauteur dominante tient compte des résultats les plus récents sur les variations entre régions pour l'allure des courbes de croissance et les changements de productivité à long terme, ce dernier phénomène étant accessible via la date de naissance du peuplement.

**Réalisation informatique :** *Fagacées* a été programmé par Patrick Vallet sous la forme d'un module spécifique au sein de la plate-forme de simulation CAPSIS 4.1.5, écrite en langage *java*. Ce logiciel, créé et administré par l'INRA (François de Coligny, UMR AMAP, Montpellier ; Coligny *et al.*, 2004 ; <http://coligny.free.fr/>), rassemble dans un même environnement informatique une trentaine de modèles différents.

également imposé à l'indice de croissance de rester fixé à 1 avant 1900 et de se maintenir au niveau actuel de 1,5 au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Compte tenu des quelques projections disponibles dans la bibliographie (Cannell *et al.*, 1998 ; Loustau, 2004), cette seconde hypothèse sous-estimerait la productivité attendue d'ici 2100 dans le Nord-Est de la France, hors phénomènes divergents qui pourraient découler d'événements extrêmes.

Sur une station de très bonne fertilité (hauteur dominante de 35 m à 100 ans en 1950), nous avons considéré une série de générations de hêtraies, installées tous les 20 ans de 1760 à 2020. Deux scénarios sylvicoles ont été comparés : la référence « historique » est un régime d'éclaircies faibles, selon les pratiques usuelles jusqu'aux années 1980. L'alternative « dynamique » est le scénario en éclaircies fortes préconisé par le BT 31 de l'ONF (Duplat et Roman-Amat, 1996) : celui-ci n'a été appliqué qu'aux générations installées à partir de 1960. Le critère d'exploitabilité est dans tous les cas l'atteinte d'un diamètre dominant égal à 60 cm.

**Âge d'exploitabilité, exposition au risque tempête**

Les simulations conduisent aux résultats suivants (les dates mentionnées renvoient au moment où les peuplements sont considérés comme exploitables, non pas à leur date de naissance) :

- sous le scénario « historique », l'âge des peuplements exploitables diminue d'abord lentement de 145 ans en 1900 à 135 ans en 2000, puis plus rapidement pour atteindre 110 ans en 2100 ;
- sous le scénario « dynamique », la maturité commerciale est atteinte à l'âge de 80 ans, et les premiers peuplements issus de ce traitement sont récoltables dès 2040.

SIS (voir encadré ; Vallet, 2005). L'architecture du modèle fait que la dérive avec la date, introduite pour la hauteur, se diffuse sur les autres composantes de la dyna-

mique, notamment la production des peuplements. Cette propriété du modèle est une hypothèse raisonnable, qui sera testée prochainement. Nous avons

■ La hauteur dominante à maturité augmente de 40,5 m (1900) à 41,5 m (2000) puis 42,5 m (2100) pour le scénario « historique » ; elle atteint au maximum 36,5 m pour le scénario « dynamique ». Sur la base des travaux de Bock *et al.* (2005), ces hauteurs dominantes à maturité peuvent être converties en taux de dégâts probables sous forte tempête. Nous avons considéré une vitesse de vent de 130 km/h, une situation de plateau et un sol sans contrainte pour l'enracinement sur 50 cm. On prévoit que la probabilité de dégâts, initialement de 0,29 en 1900, augmente à 0,31 en 2000 puis 0,33 en 2100 si les peuplements restent denses ; elle diminue à 0,24 pour des peuplements conduits rapidement et récoltés à 36,5 m de hauteur. Cette simulation a ignoré les modifications de morphologie individuelle et de rugosité du couvert liées aux éclaircies fortes. En tenant compte de ces facteurs, le différentiel de sensibilité serait moins fort, mais resterait favorable aux sylvicultures rapides, conjointement avec les avantages recherchés en termes de qualité du bois (réduction de l'incidence et de la gravité des contraintes de croissance) et de sensibilité à la sécheresse (réduction de l'indice foliaire).

### Discussion et conclusion

Les résultats rapportés dans cet article, pour le Nord-Est, sont cohérents avec les deux études européennes analogues consacrées au hêtre (Jura Souabe, Danemark). La différence entre régions constitue, quant à elle, un élément original par rapport aux travaux précédents. Dans la compilation européenne de Spiecker *et al.* (1996), de fortes nuances étaient signalées : dérives importantes dans les régions d'Europe moyenne à

forts impacts anthropiques, mais plus modérées voire absentes à la périphérie (Scandinavie, Espagne). Toutefois, les particularités méthodologiques associées à chaque étude de cas empêchaient une interprétation directe, et le grain spatial restait grossier.

Nous ne reprendrons pas ici les discussions méthodologiques autour de la mesure des changements de productivité et de leur interprétation, déjà développées par ailleurs (Dhôte *et al.*, 2000). La méthode que nous avons exposée tire parti de l'ensemble de ces débats, ainsi que des acquis les plus récents en modélisation de la croissance. Elle a fourni des courbes de dérive à long terme dont le niveau est cohérent avec l'état de l'art en écologie fonctionnelle. S'agissant des hêtraies et du fait de la méthode employée, plusieurs arguments *a priori* ou *a posteriori* permettent d'écarter des explications liées à la sylviculture ou à des effets différés des usages anciens des sols.

Sur un plan pratique, les résultats bruts présentés sont directement utilisables pour les hêtraies régulières de la moitié Nord de la France. Le message essentiel à retenir est que les changements de productivité ont une ampleur considérable, qu'ils sont d'ores et déjà capitalisés dans les peuplements en place et que leur conjonction avec des éclaircies fortes va conduire à des réductions, fortes et différenciées entre régions, pour l'âge d'exploitabilité.

Reste à préciser comment chaque facteur intervient dans le changement global. Du point de vue scientifique, on peut envisager un travail d'interprétation, afin de préciser la contribution relative des différents facteurs

environnementaux en évolution. L'ensemble des éléments disponibles sur la question suggère qu'une fertilisation par les dépôts azotés a joué un rôle important, en interaction avec l'élévation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Pour le vérifier, la constitution d'un bilan général des tendances, décliné dans l'espace et pour plusieurs essences, sera très utile. Ce bilan devra être complété par l'acquisition de données historiques et régionalisées sur la nutrition azotée, pour laquelle deux méthodes peuvent être considérées : les rapports isotopiques dans les cernes ( $\delta^{15}\text{N}$ ) et l'analyse de grandes bases de données phytoécologiques par bioindication (Elhani *et al.*, 2005 ; Gégout *et al.*, 2003).

L'effort de bilan et compréhension des changements de productivité profitera aux forestiers, pour l'adaptation des pratiques aux particularités régionales et pour élaborer de nouveaux outils de gestion. Dans un contexte de changements environnementaux, les simulateurs que les forestiers utilisent pour établir leurs préconisations vont évoluer : outre les stratégies de gestion, les scénarios testés devront considérer diverses hypothèses pour le climat, le carbone et l'azote. Cela suppose que les modèles de croissance sachent estimer la réponse des peuplements à ces facteurs, tout en préservant leurs atouts actuels de simplicité et de maniabilité.

Pour y parvenir, une première piste est de revisiter l'approche statistique des liaisons station-production, en combinant modèles de croissance et données climatiques, topographiques et phytoécologiques : plusieurs travaux récents, dont une opération de partenariat



Hêtraie adulte (FD de Compiègne)

J. Piat, ONF

INRA-IFN, en ont montré la faisabilité et l'intérêt pratique (Bergès *et al.*, 2005 ; Pinto, 2006 ; Seynave *et al.*, 2005). Un second enjeu est la construction de méthodes de simulation hybrides, associant la performance des modèles d'ingénierie (modèles dendrométriques) et la généralité des modèles de recherche (modèles de fonctionnement d'écosys-

tèmes). Plusieurs voies sont envisagées : enrichissement des données de milieu en entrée des modèles dendrométriques, modèles hybrides, couplage de modèles ou simulateurs. Une valorisation forestière concrète de ces travaux serait la construction de nouveaux protocoles de description du milieu, qui soient pertinents pour estimer la pro-

duction sous environnement changeant et relativement faciles à appliquer dans un contexte de gestion (variables climatiques, indicateurs de nutrition azotée, procédures de localisation et calcul sous SIG).

**Jean-François DHÔTE**

Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB, UMR1092 INRA/ENGREF), Nancy

**Jean-Daniel BONTEMPS**

LERFoB, Nancy

**Jean-Christophe HERVÉ**

actuellement : Inventaire Forestier National Nogent sur Vernisson

**Daniel RITTIÉ**

LERFoB, Nancy

**Patrick VALLET**

UR Écosystèmes forestiers Cemagref, Nogent/Vernisson

**Remerciements**

Les auteurs remercient Philippe Dormoy, Thierry Barateau, Jérôme Piat, Claudine Richter, Brigitte Pilard-Landau, Myriam Legay et Pierre Duplat (ONF Nancy, Compiègne, Fontainebleau) pour leur intérêt, leur soutien technique et leur expertise apportés à ce travail. Ils remercient également Jean-Luc Dupouey (INRA, EEF, Champenoux) pour son apport à la problématique et sa contribution à l'échantillonnage Nord-Est. Merci enfin à Antoine Cazin, Sébastien Daviller et Vincent Jedele pour la récolte des échantillons et la réalisation des mesures.

## Bibliographie

BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., PICARD J.F., ULRICH E., 1994. Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. *Revue Forestière Française*, vol. 46, n° 4, pp. 335-341

BERGES L., CHEVALIER R., DUMAS Y., FRANC A., GILBERT J.M., 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science*, vol. 62, n° 5, pp. 391-402

BOCK J., VINKLER I., DUPLAT P., RENAUD J.P., BADEAU V., DUPOUEY J.L., 2005. Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999. *Revue Forestière Française*, vol. 57, n°2, pp. 143-158

BONTEMPS J.D., 2006. Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Thèse de Doctorat. Nancy : ENGREF 444 p.

CANNELL, M. G. R., THORNLEY D.C., MOBBS D.C., FRIEND A.D., 1998. UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature. *Forestry*, vol. 71, n° 4, pp. 277-296

COLIGNY F. de, ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-FLEURY S., MEREDIEU C., ORAZIO C., SAINT-ANDRÉ L., 2004. Capsis : Computer-Aided Projection for Strategies In

Silviculture: Open architecture for a shared forest-modelling platform. In Proceedings of the IUFRO Working Party S5.01-04 conference (September 2002) Harrison, British Columbia, Canada, pp. 371-380.

DHÔTE J.F., DUPOUEY J.L., BERGÈS L., 2000. Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises. *Revue Forestière Française*, vol. 52, n° spécial « Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture », pp. 37-48

DUPLAT P., ROMAN-AMAT B., 1996. Sylviculture du Hêtre. *Bulletin Techniquen° 31*, pp. 29-33

DUPLAT P., TRAN-HA M., 1997. Modélisation de la croissance en hauteur dominante du Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) en France : variabilité inter-régionale et effet de la période récente (1959-1993). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 54, n° 7, pp. 611-634.

ELHANI S., GUEHL J.M., NYS C., PICARD J.F., DUPOUEY J.L., 2005. Impact of fertilization on tree-ring delta<sup>15</sup>N and delta<sup>13</sup>C in beech stands : a retrospective analysis. *Tree Physiology*, vol. 25, n° 11, pp. 1437-1446

GÉGOUT J.C., HERVÉ J.C., HOULLIER F., PIERRAT J.C., 2003. Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. *Journal of Vegetation Science*, vol. 14, n° 1, pp. 55-62

HERVÉ J.C., DHÔTE J.F., DUPOUEY J.L., 2000. Évaluation des modifications à long terme de la productivité forestière à l'échelle du peuplement, en vue de l'élaboration d'outils d'aide à la gestion tenant compte de ces modifications. Rapport Final Contrat GIP ECOFOR-INRA n° 99.38, INRA, Nancy (France). 42 p.

LOUSTAU D. (éd.), 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France : quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport Final Projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" Bordeaux-Pierroton : INRA. 137 p.

PINTO P., 2006. Écologie et croissance de *Abies alba* Mill. en peuplements purs et mélangés dans le Massif Vosgien (Nord-Est de la France). Thèse de Doctorat. Nancy : ENGREF. 176 p.

SEYNAVE I., GÉGOUT J.C., HERVÉ J.C., DHÔTE J.F., DRAPIER J., BRUNO E., DUMÉ G., 2005. *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 35, n° 7, pp. 1669-1678

SPIECKER H., MIELIKÄINEN K., KÖHL M., SKOVSGAARD J.P., 1996. Growth trends in European forests: studies from 12 countries. *EFI Research reports*, n° 5. Berlin : Springer 372 p.

VALLET P., 2005. Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers : modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. Thèse de Doctorat. Nancy : ENGREF. 195 p.