



HAL
open science

Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises.

Jean-François Dhôte, Laurent Bergès, Jean-Luc Dupouey

► To cite this version:

Jean-François Dhôte, Laurent Bergès, Jean-Luc Dupouey. Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises.. *Revue forestière française*, 2000, 52 (Spécial), pp.37-48. 10.4267/2042/5405 . hal-03443539

HAL Id: hal-03443539

<https://hal.science/hal-03443539v1>

Submitted on 23 Nov 2021

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.

MODIFICATIONS À LONG TERME, DÉJÀ CONSTATÉES, DE LA PRODUCTIVITÉ DES FORÊTS FRANÇAISES

J.-F. DHÔTE – J.-L. DUPOUEY – L. BERGÈS

Les changements de la productivité des forêts à moyen et long terme (20 à 150 ans) peuvent être étudiés à différentes échelles spatiales : le peuplement, le massif, la région. Les problèmes posés, les données et méthodes employées, les causes possibles sous-jacentes diffèrent selon l'échelle. Par exemple, si l'on s'intéresse au niveau régional et qu'on l'aborde par des données du type Inventaire forestier national (IFN), une augmentation de l'accroissement courant en volume de la ressource peut reposer simultanément sur un grand nombre de facteurs : augmentation des surfaces, enrichissement des taillis-sous-futaie, transformation en futaie par enrésinement, amélioration génétique, modifications sylvicoles (fertilisation...) ou environnementales. Nous nous intéressons ici à l'échelle du peuplement. Le problème est de détecter l'existence de changements graduels de la productivité sur le long terme (50 à 150 ans) et d'en mesurer l'importance. Le résultat recherché est une courbe de tendance, fonction de la date, qui décrit le taux de modification de la productivité par rapport à un niveau de référence historique.

On appelle productivité la capacité de production d'un peuplement d'une essence donnée, sur une station donnée, dans des conditions sylvicoles standard et constantes. D'un point de vue forestier, l'unité de mesure la plus pertinente est l'accroissement courant en volume. Comme celui-ci est généralement difficile à mesurer (hormis dans des placettes permanentes), on considère selon les cas les estimateurs indirects suivants : croissance radiale d'arbres dominants, croissance en hauteur dominante et en surface terrière des peuplements. Le choix de ces estimateurs, outre ses motivations pratiques, peut se justifier grâce à la théorie dendrométrique de la production des peuplements réguliers (Houllier, 1991).

PROBLÉMATIQUE ET HISTORIQUE

La mise en évidence formelle des causes expliquant les changements de productivité sort du cadre de cet article. Toutefois, l'idée *a priori* qu'on peut se faire de cette causalité est importante. Elle conditionne, en partie, les plans d'échantillonnage à adopter, la nature et la portée des conclusions qu'on peut en tirer. Historiquement, les premiers travaux de Michel Becker (synthèse dans Becker *et al.*, 1994), à la fin des années 1980, avaient pour but de rechercher des origines lointaines au

phénomène de dépérissement du Sapin dans les Vosges, grâce à la méthode dendrochronologique. La technique de standardisation utilisée alors permet de mettre en évidence une augmentation très forte, depuis 1850, de l'accroissement radial du Sapin. Ces résultats ont ensuite été confirmés pour plusieurs essences feuillues et résineuses, dans diverses régions de France (Becker *et al.*, 1994 et 1995 ; Badeau *et al.*, 1996), puis d'Europe (Spiecker *et al.*, 1996). Plusieurs méthodes d'analyse des données ont donné des résultats convergents : indices dégagés des effets-âge, méthode "à âge constant", analyse de la variance (Dupouey *et al.*, 1992).

Quatre catégories de causes possibles ont été envisagées pour expliquer ces tendances, en tout ou partie :

- des artefacts liés au déséquilibre des plans d'échantillonnage et à la méthode de reconstruction rétrospective (représentativité dans le passé des arbres actuels...) ;
- des évolutions graduelles d'origine purement sylvicole (intensification des coupes, accélération des régénérations) ;
- la reconstitution lente et progressive de la fertilité des sols après une longue période d'exploitation intensive (taillis à courte rotation, prélèvements de litière...) ;
- le changement des facteurs environnementaux (climat, concentration en CO₂, apports d'azote atmosphérique...).

De manière générale, c'est dans la perspective des changements environnementaux liés aux activités humaines qu'on cherche à établir les courbes de changement de la productivité en fonction de la date. Par le choix de plans d'échantillonnage appropriés, on s'efforce donc de minimiser l'impact des autres facteurs (par exemple en atténuant l'effet de la "station" par le biais d'une moyenne) ou d'estimer leur contribution propre (par exemple, en faisant des comparaisons futaie/taillis-sous-futaie : Badeau *et al.*, 1995).

Une quinzaine de laboratoires européens ont abordé la question des changements de productivité (Spiecker *et al.*, 1996). Nous en retenons deux types d'analyses, procédant de méthodes différentes :

- étude des changements de croissance par des **méthodes rétrospectives**, c'est-à-dire la dendrochronologie (croissance radiale) et l'analyse de tige (croissance en hauteur) ; ces travaux portent toujours sur des accroissements mesurés au niveau de l'arbre ;
- étude de la productivité au cours du siècle, **au niveau du peuplement**, dans des réseaux de placettes permanentes ; comparaison avec des valeurs de référence issues de tables de production ; certains de ces travaux comparent la productivité de deux générations successives sur un même site.

Plusieurs études de liaisons station-production ont également abordé la question. Dans ces travaux, on observe souvent qu'une part importante de la variabilité de l'indice de fertilité est liée à l'âge actuel des peuplements (Gilbert et Chevalier, 1994 ; Bergès, 1998). Comme le calcul de l'indice de fertilité sert précisément à filtrer l'effet de l'âge courant sur la hauteur, cet effet résiduel de l'âge actuel reflète, si les modèles de croissance utilisés sont corrects, la structure de la population échantillonnée : dans des conditions écologiques données, les peuplements aujourd'hui vieux sont moins productifs que les peuplements jeunes. Le même constat d'une relation décroissante entre âge actuel et indice de fertilité est apparent dans trois études récentes des hêtraies domaniales en Normandie, Picardie, Lorraine (Arnal et Drouineau, 1997 ; Seynave, 1999 ; Contesse, 2000). Précisons d'emblée que ce type d'observations instantanées ne suffit pas, à lui seul, pour démontrer l'existence d'une modification tendancielle de la productivité : en effet, si l'on travaille sur des peuplements surannés, au-delà de l'âge d'exploitabilité minimal et usuel, il est facile de montrer que les plus vieux peuplements restant sur pied sont nécessairement moins productifs (les autres ont été récoltés et ont disparu).

TROIS TYPES DE DONNÉES

Le tableau I (ci-dessous) récapitule les caractéristiques, atouts et faiblesses de trois types de données possibles pour aborder le problème : l'accroissement radial (carottes de sondage et analyse dendrochronologique), l'accroissement en hauteur (analyse de tige), l'accroissement des peuplements en surface terrière (placettes permanentes).

Tableau I **Présentation, qualités et défauts des 3 types de données possibles pour l'étude des changements de productivité à long terme**

Variable	Accroissement radial	Accroissement en hauteur dominante	Accroissement en surface terrière
Méthode	Dendrochronologie	Analyse de tige	Placettes permanentes
Objets mesurés	Un échantillon d'arbres dominants		Peuplement
Type de mesure	Rétrospective		En continu
Possibilités de plans d'échantillonnage dans l'espace			
Largeur (amplitude)	Très bonne (grands effectifs, plans stratifiés/milieu)	Idem "radial", mais charge de mesure lourde (contrainte)	Médiocre (on est contraint par l'existant)
Grain	Placettes de quelques ares	Placettes de 6 ares	Placettes de 0,2-1 ha
Possibilités de plans d'échantillonnage dans le temps			
Largeur (amplitude)	100-200 ans	100-200 ans	70-100 ans (selon disponibilité)
Grain	1 an	1 à 10 ans selon méthode	3 à 10 ans
Forme du plan (âge, date)	En triangle (manquent les très vieux arbres d'il y a longtemps)		En parallépipède
Qualités et défauts des plans d'échantillonnage pour le thème changements à long terme			
Pertinence peuplement	Moyenne (risque de tendances sylvicoles)	Meilleure que "radial", mais cf. ligne suivante	Excellente
Biais de l'échantillon quand on remonte dans le passé	Probable, non chiffré	Probable, mais moins fort que radial, non chiffré	Sans objet
Possibilité de filtrer une tendance sylvicole	Tendance possible, filtrage impossible	Tendance possible mais faible, filtrage impossible	Filtrage facile par modélisation
Qualité de la séparation âge-date	Manquent vieux arbres du passé		Aléatoire (dépend de l'existant)
Qualité de la séparation âge-station	Bonne, sauf récolte plus précoce sur bonnes stations		Aléatoire (dépend de l'existant)
Rapidité de collecte des données	Excellente	Bonne	Très lente!!!

Avec les méthodes rétrospectives, on peut récolter en un court laps de temps des données très riches, assises sur des plans d'échantillonnage robustes. Notamment, il est possible d'obtenir une assez bonne indépendance entre l'âge et les caractéristiques écologiques de la station, mais aussi de viser de larges effectifs garants de la sûreté des conclusions. Toutefois, lorsqu'il s'agit de reconstituer la croissance en hauteur par analyse de tige (soit en mesurant les distances inter-verticillaires, ou entre cicatrices de bourgeons, soit en comptant les cernes sur une dizaine de rondelles par arbre), la lourdeur de la mesure limite pratiquement ces avantages. Les deux méthodes souffrent de défauts voisins :

— les très vieux arbres du passé ont disparu, ce qui fait que les plans d'échantillonnage dans le plan âge-date sont en forme de triangle (la gamme d'âges est maximale pour les dates récentes, elle se rétrécit au fur et à mesure qu'on remonte dans le temps) ; toutefois, cet inconvénient peut être contourné par le recours à des modèles de croissance robustes et à des méthodes statistiques appropriées ;

— ces méthodes reposent sur des mesures d'arbres dominants ; or, la quantité importante pour les applications forestières est la production du peuplement ; s'agissant de la croissance en hauteur dominante, on sait qu'elle est d'une part très peu sensible à la sylviculture, d'autre part étroitement reliée à la production en volume (loi de Eichhorn, 1904), ce qui fait de l'analyse de tige une méthode *a priori* plus solide que le carottage (dans ce cas, on peut toujours suspecter une tendance purement sylvicole, par exemple une intensification des coupes d'éclaircie, dont nous avons montré l'effet sur la croissance en diamètre des arbres dominants : Dhôte, 1997) ; il est donc nécessaire de savoir convertir les accroissements en diamètre ou en hauteur ainsi mesurés en accroissements du peuplement (en surface terrière ou volume) ;

— dans les deux cas, les méthodes rétrospectives présupposent que les arbres dominants que l'on sélectionne aujourd'hui ont toujours représenté de la même manière, dans le passé, le peuplement dont ils sont issus. Par exemple, on sélectionne N arbres bien représentatifs des 100 plus gros arbres par hectare, **aujourd'hui**, et on fait l'hypothèse qu'ils l'ont toujours été depuis l'origine du peuplement. Cette hypothèse très forte permet de dire que la courbe mesurée rétrospectivement (par carottage ou analyse de tige) est, du début à la fin, un bon indicateur du peuplement dans son ensemble. Le recours à cette hypothèse repose sur le constat classique, en foresterie, selon lequel il y a une très forte conservation des rangs sociaux, du moins dans des futaies régulières (voir Pardé, 1981). Cette conservation des rangs sociaux est en effet très forte, mais elle n'est pas absolue. Statistiquement, on peut même dire qu'il est nécessaire que les 100 plus gros arbres par hectare d'aujourd'hui n'aient pas toujours été les 100 plus gros dans le passé. Cela crée un biais qu'il faudrait au minimum évaluer, pour connaître le risque de conclusions erronées induit par les méthodes rétrospectives. Une telle évaluation est possible, en se servant de placettes permanentes avec arbres numérotés. Une première étude de cette question a été réalisée par Duquesnay *et al.* (1999).

Pour porter un diagnostic sûr à propos des changements de productivité à long terme, il faut donc compléter les données rétrospectives par des mesures de production en continu et à l'échelle du peuplement. C'est là que réside l'utilité des réseaux de placettes permanentes. On a en effet accès à une information sur une surface de l'ordre de 0,2 à 1 hectare, et les méthodes d'inventaire permettent de connaître à chaque instant le stock sur pied, les récoltes en éclaircie et les pertes par chablis ou mort liée à la compétition. Ces méthodes sont appliquées, depuis plus d'un siècle, par la plupart des instituts de recherche européens, avec des protocoles qui sont restés remarquablement stables sur une durée aussi longue. Un autre avantage de ces réseaux est qu'ils comportent généralement des sites où plusieurs sylvicultures sont comparées. Grâce aux méthodes de modélisation qui ont beaucoup progressé au cours des vingt dernières années (Houllier *et al.*, 1991), il est aujourd'hui possible de séparer plus nettement les contributions respectives de l'âge, de la qualité de la station et de la sylviculture à la production des peuplements. Ces acquis nous permettent

Les changements climatiques et la situation de la forêt française

aussi d'introduire dans les analyses l'effet des fluctuations climatiques et de chercher à détecter des tendances longues (Dhôte et Hervé, 2000).

Toutefois, les réseaux de placettes permanentes présentent aussi des défauts, et l'on ne peut pas envisager qu'ils se substituent complètement aux approches précédentes. Évidemment, on est totalement contraint par la structure de l'existant : les espèces, les types de peuplement (plutôt futaie régulière), la distribution des données par rapport à l'âge, à la date et au milieu (région géographique et station). Dans les réseaux Chêne et Hêtre, sur lesquels nous avons beaucoup travaillé, le recul dont nous disposons est de 70 à 100 ans. Systématiquement, des placettes ont été installées en même temps dans des collections de peuplements représentant une large gamme d'âges en futaie régulière (du stade bas perchis à la vieille futaie à régénérer). Après 1935, le flux d'installation s'est tari : à partir des années 1950, la priorité est allée aux essais statistiques de type agronomique, pour étudier la sylviculture. C'est seulement récemment que, grâce au Groupement d'Intérêt scientifique (GIS) Coopérative de Données pour la Modélisation de la Croissance, un nouvel effort a été fait pour la création de réseaux bien distribués dans l'espace. Il s'ensuit que les données disponibles, en France, pour aborder les changements à long terme, ont des structures "en parallélépipède", dans le plan [âge - date] : une large gamme d'âges observée de 1930 à aujourd'hui, mais un trou dans les jeunes peuplements actuels (20 à 80 ans).

Tableau II **Évolution de l'accroissement annuel en surface terrière d'arbres dominants observée dans diverses études en France**
(Becker *et al.*, 1994, 1995; Badeau *et al.*, 1996; Bergès, 1998; Lebourgeois, 1999)

Région	Espèce	Période	Changement de croissance sur toute la période
Jura	Sapin	1850-1988	+ 350 % (+ 140 % en largeur)
Vosges	Sapin	1850-1986	+ 160 %
Vosges	Épicéa	1850-1988	+ 300 %
Vosges	Hêtre	1850-1990	+ 90 %
Lorraine (plateaux calcaires) .	Hêtre (futaie)	1910-1991	+ 115 % (+58 % en largeur)
Lorraine (plateaux calcaires) .	Hêtre (taillis-sous-futaie)	1910-1991	+ 56 % (+ 34 % en largeur)
Lorraine (plateau lorrain) . . .	Hêtre	1860-1992	+ 120 %
Lorraine (plateau lorrain) . . .	Chêne pédonculé	1850-1987	+ 55 %
Lorraine (plateau lorrain) . . .	Chêne sessile	1850-1987	+ 90 %
Lorraine et Alsace	Chêne sessile	1924-1993	+ 87 % (+34 % en largeur)
Centre et Pays de Loire	Chêne sessile	1924-1993	+ 75 % (+ 34 % en largeur)
Pays de Loire	Pin laricio de Corse	1921-1991	+ 50 %
Pyrénées	Pin à crochets	1850-1992	+ 75 % (+ 35 % en largeur)

RÉSULTATS SUR LA CROISSANCE RADIALE

La méthode consiste à récolter des mesures d'accroissement radial par carottage d'arbres dominants, puis à séparer, dans les données, deux effets principaux : l'effet de l'âge courant du cerne ("vieillessement") et l'effet de la date de formation du cerne. Ce dernier peut être décomposé lui-même, d'une part en signaux de haute et moyenne fréquence (fluctuations d'une année à la suivante ou crises décennales), d'autre part une courbe de tendance longue à l'échelle du siècle.

Pour pouvoir séparer ces deux effets, on doit disposer de cernes du même âge cambial (ou âge courant : nombre de cernes compté depuis la moelle) formés à des dates différentes. On obtient cela en échantillonnant des peuplements d'âges variés. De plus, il faut éviter un trop fort biais d'échantillonnage "âge-station" : en effet, si les arbres vieux sont majoritairement sur mauvaise station, et vice versa, l'effet âge se confond partiellement avec l'effet station, ce qui biaise les courbes de tendances avec la date. Certaines études ont très nettement évité ce biais en échantillonnant une même gamme d'âges dans quelques types de station bien représentés (Badeau *et al.*, 1995).

Les résultats obtenus en France sont synthétisés dans le tableau II (p. 41). Ces chiffres sont d'une telle ampleur qu'on doit s'interroger sur de possibles artefacts liés aux méthodes employées. Nous avons déjà évoqué plus haut le problème de la représentativité passée des arbres actuels. Mais une autre question est de savoir comment convertir des accroissements radiaux d'arbres dominants en production du peuplement. Nos analyses sur la croissance et la production des futaies de Hêtre ou de Chêne nous laissent penser que c'est faisable techniquement. Toutefois, nous avons montré que la vitesse de croissance radiale des arbres dominants (ou les 100 plus gros par hectare) est influencée par la sylviculture (Dhôte, 1997 et 1999). Pour appliquer des règles de conversion entre largeur des cernes de dominants et accroissement en surface terrière du peuplement, on doit s'assurer que l'intensité des éclaircies n'a pas connu de tendance longue majeure. Intuitivement, nous pensons que cette condition est remplie dans les futaies régulières domaniales de Chêne sessile ; par contre, plusieurs études menées récemment à l'ONF montrent que la densité actuelle des hêtraies est assez faible (Arnal et Drouineau, 1997 ; Seynave, 1999 ; Contesse, 2000), probablement sous l'effet d'éclaircies plus fortes au cours des 20 dernières années. Cependant, on peut rappeler que les augmentations de croissance observées pour ces essences ont eu lieu pour leur plus grande part avant cette période d'éclaircies plus fortes.

RÉSULTATS SUR LA CROISSANCE EN HAUTEUR DOMINANTE

Le travail sur la hauteur dominante offre en principe plus de garanties : grâce à un siècle d'expérimentation sylvicole, on sait que la croissance en hauteur dominante réagit très peu à la sylviculture, tant qu'on reste dans un cadre de futaie régulière et que l'intensité des éclaircies n'est pas excessive ; de plus, en cas de reconstruction rétrospective (analyse de tige), on peut estimer que les problèmes de biais sont nettement moins forts que pour le diamètre (mais ce biais reste, lui aussi, à étudier).

Dans la plupart des cas, on dispose de données instantanées. Il s'agit alors, tout simplement, de récolter des données d'âge et de hauteur, avec une seule valeur instantanée par peuplement (on ignore la courbe qui a conduit à ce point). Cette situation est générale dans les études de liaisons station-production. On est aussi dans ce cas lorsqu'on analyse des jeux de données du type IFN (Elfving *et al.*, 1996). Grâce à un faisceau de courbes hauteur-âge soigneusement établi par ailleurs, on estime pour chaque peuplement un indice de fertilité (hauteur à un âge de référence). Cet indice montre souvent une forte corrélation négative avec l'âge actuel. Par exemple, dans un travail consacré aux liaisons station-production dans des futaies régulières de Chêne sessile âgées de

80 à 180 ans (Bergès, 1998), l'âge actuel explique 25 % de la variabilité de l'indice de fertilité, contre 50 % pour les facteurs du milieu. Le plan d'échantillonnage étant robuste (pas de biais âge-station), on peut affirmer que l'effet-âge actuel reflète bien une augmentation de la fertilité entre générations. Son ampleur est considérable : dans des conditions écologiques similaires, les peuplements âgés aujourd'hui de 80 ans auraient un indice de fertilité (hauteur estimée à 100 ans, d'après le modèle de Duplat et Tran-Ha, 1997) supérieur de 10 m à celui des peuplements de 180 ans.

Toutefois, le fait de travailler sur des données instantanées entraîne des incertitudes. La hauteur que nous mesurons aujourd'hui reflète tous les événements accumulés depuis le stade du semis. Ainsi, il est probable que le démarrage juvénile de la croissance est influencé par la rapidité des régénérations : il peut donc y avoir une composante strictement sylvicole dans les relations âge-fertilité observées sur des données instantanées, en dehors de toutes considérations liées aux changements globaux. Skovsgaard et Henriksen (1996) insistent particulièrement sur le rôle possible de la sylviculture dans les tendances constatées. Toutefois, on peut penser que les effets sylvicoles sur la croissance en hauteur sont sensibles surtout dans la phase juvénile (outre la régénération déjà mentionnée, les méthodes d'installation ont évolué sur le long et parfois le moyen terme ; cf. Pin maritime dans les Landes).

Une autre difficulté est liée aux accidents météorologiques : les tempêtes, verglas, neiges lourdes peuvent causer des bris de cimes. Dans ce cas, la hauteur absolue subit une réduction brutale et elle est durablement affectée, même si sa vitesse de croissance reprend ensuite une allure normale. La probabilité qu'un peuplement ait subi de tels dommages augmente évidemment avec l'âge, et cela contribue à l'écart entre jeunes et vieux peuplements.

Pour contourner ces deux difficultés, on peut travailler non pas sur des valeurs instantanées, mais sur des courbes de croissance en hauteur. Par exemple, J.-M. Gilbert et R. Chevalier (1994) ont étudié le différentiel de croissance en hauteur entre des plantations de Pin laricio dont les âges différaient de 30 ans. Pour cela, ils ont utilisé la méthode des couples, en comparant des paires de peuplements jeunes-vieux contigus et en vérifiant l'identité des conditions écologiques intra-couple. Une étude similaire est en cours pour le Hêtre en Lorraine-Alsace. Actuellement, l'étude européenne la plus précise sur cette question est celle de Untheim (1996), consacrée au Hêtre et à l'Épicéa dans le Jura Souabe. Grâce à un échantillonnage soigneux (une trentaine de placettes par essence, dans un seul type de station) et par la méthode à âge constant, il a obtenu des effets très significatifs d'augmentation avec la date, aussi bien pour la hauteur dominante que pour son accroissement. De 1920 à 1990, les hêtraies de 50 ans ont ainsi vu leur hauteur passer de 18,6 à 21,1 m (+ 14 %), tandis que l'accroissement courant en hauteur augmentait de 0,32 à 0,40 m/an (+ 26 %) ; pour l'Épicéa de 30 ans, sur la même période, la hauteur passait de 15,7 à 19,8 m (+ 26 %), l'accroissement courant de 0,49 à 0,63 m/an (+ 30 %). Précisons que ces chiffres sont issus de régressions simples avec la date, par classes d'âge courant, sans faire une modélisation complète à partir des données. L'ensemble de résultats fournis suggère qu'on pourrait obtenir, par une meilleure modélisation, des chiffres d'augmentation de l'accroissement en hauteur à la fois plus cohérents entre classes d'âge et plus forts que les valeurs données ci-dessus.

RÉSULTATS SUR LA CROISSANCE EN SURFACE TERRIÈRE OU EN VOLUME DES PEUPELEMENTS

Pour évaluer une tendance à long terme au niveau peuplement, on peut utiliser des placettes permanentes, observées sur une période longue. Les réseaux du Sud de l'Allemagne ont été utilisés dans ce but par Pretzsch (1996) et les accroissements en volume mesurés ont été comparés aux valeurs fournies par des Tables de Production construites entre 1948 et 1967. Des résultats saisissants ont ainsi été obtenus : l'accroissement mesuré récemment surclasse en moyenne celui des

Tables de Production de + 100 à + 150 % pour l'Épicéa commun, le Pin sylvestre et le Chêne (sessile), + 50 % pour le Hêtre.

La difficulté vient du fait que les Tables de Production elles-mêmes ne sont souvent pas des instruments assez précis pour aborder ce type de problème. D'abord, il est parfois difficile de savoir précisément comment elles ont été construites : un simple lissage graphique ou statistique de données observées ne suffit pas à faire un bon modèle. S'il s'agit de constituer une référence solide en matière de production, la qualité d'une Table dépend aussi de la distribution des données de base par rapport aux facteurs âge, station, sylviculture, sans oublier la date, et de la manière dont ces sources de variabilité ont été utilisées dans la modélisation. Plusieurs travaux récents ont ainsi montré que la Table de Pardé (1962) pour le Chêne sessile sous-estime fortement la croissance en hauteur et en volume au stade adulte (Duplat et Tran-Ha, 1997 ; Dhôte *et al.*, 2000). De plus, on entre dans une Table grâce à l'indice de fertilité basé sur la hauteur. Or, nous venons de voir que la hauteur incorpore aussi une tendance avec la date. Cette tendance est certainement présente dans les données utilisées et dans les courbes ajustées, mais de manière non explicite et dans des proportions inconnues.

Même si l'inexactitude des références utilisées par Pretzsch contribue certainement aux chiffres très élevés qu'il a obtenus, tout indique qu'il faudrait revoir complètement les modèles de production. Il semble fructueux de refaire une analyse combinée des croissances en hauteur et en surface terrière, en modélisant les effets conjoints de l'âge, du milieu et de la sylviculture et en testant la présence d'un effet supplémentaire de la date (sous la forme d'une courbe de tendance). Une analyse préliminaire a été engagée dans nos laboratoires, pour la croissance en surface terrière des peuplements de Chêne sessile dans la moitié Nord de la France (Dhôte et Hervé, 2000). À partir de 35 placettes réparties dans les forêts domaniales de Bellême, Blois, Tronçais et Champenoux, nous avons pu estimer des courbes de tendance qui viennent corriger un modèle de production classique, le tout étant ajusté simultanément. Ces courbes, que nous avons autorisées à varier entre forêts, montrent des évolutions de grande ampleur pour la productivité des peuplements. À l'exception de Bellême, qui présente un historique complexe (baisse de la productivité de 1930 à 1960, puis augmentation), l'accroissement en surface terrière toutes choses égales par ailleurs (y compris la sylviculture) est en forte augmentation. À Champenoux et Tronçais, le niveau d'accroissement actuel serait supérieur de 30 à 50 % à celui de 1930, selon les modèles considérés. Les mêmes valeurs semblent devoir s'appliquer au volume.

CONCLUSIONS

Menées à l'origine dans un contexte d'inquiétude liée au dépérissement des forêts, les analyses dendroécologiques réalisées dans plusieurs pays européens ont montré l'existence d'importantes augmentations de productivité au cours des cent cinquante dernières années. Ces résultats ont suscité un grand étonnement, aussi bien chez les chercheurs eux-mêmes que chez les praticiens forestiers. Logiquement, la prudence a conduit à incriminer d'abord toute une série d'artefacts. Toutefois, la quasi-totalité des travaux réalisés ensuite, par des méthodes variées, ont confirmé la généralité du phénomène (Spiecker *et al.*, 1996).

Quatre sujets au moins continuent d'être controversés ou incomplètement décrits, qui ont d'importantes conséquences pour les applications à la gestion et à la politique forestières :

— Si la productivité des forêts est bien en augmentation, il convient encore de mieux chiffrer l'intensité du phénomène à l'échelle de la parcelle, en utilisant des indicateurs classiques de la productivité (croissance en hauteur dominante, en surface terrière et en volume). Nos premières analyses menées sur les chênaies montrent une très forte augmentation de l'accroissement en surface terrière depuis 1930, mais suggèrent aussi une certaine différenciation du processus entre

régions. Beaucoup de travail reste à faire pour confirmer et élargir ces premiers diagnostics. Pour cela, une information précieuse devrait être apportée, d'une part par l'analyse et la modélisation de la croissance en hauteur dominante, déclinée pour plusieurs essences et par régions, d'autre part en tâchant de dresser un tableau cohérent à partir des trois sources de données possibles (dendrochronologie, analyses de tige, surface terrière dans les réseaux permanents).

— La qualité du bois formé (anatomie, chimie) s'est-elle aussi modifiée ? En particulier, les changements constatés de croissance en dimension se traduisent-ils par des changements équivalents de croissance en biomasse ? Bergès *et al.* (2000) et Guilley (2000) ont montré que la densité du bois de Chêne sessile était restée stable ou avait augmenté au cours du dernier siècle. Aucune donnée n'est encore disponible sur les changements éventuels de composition chimique du bois (taux de carbone, rapport cellulose/lignine...). Ces changements, s'ils existent, pourraient avoir des conséquences importantes sur les propriétés écologiques et technologiques du matériau bois.

— Quelles sont les causes des tendances passées ? Une meilleure compréhension de ces dernières est nécessaire pour prédire ce que pourraient être les évolutions futures de la productivité. Par exemple, on voudrait pouvoir mieux séparer les contributions de trois facteurs environnementaux qui ont connu de fortes évolutions depuis un siècle : la concentration atmosphérique en CO₂ (+ 25 % depuis 1900 ; la plupart des expériences menées en serre sous CO₂ élevé montrent une stimulation importante de l'accroissement des jeunes arbres), les dépôts azotés (en forte augmentation depuis 1950 ; on observe couramment des dépôts supérieurs à 15 kg/ha/an en forêt), le réchauffement du climat (augmentation rapide de la durée de la saison de végétation en Europe de l'Ouest, de plus d'une dizaine de jours au cours des trente dernières années). Une approche possible est la modélisation de l'impact de ces différents changements environnementaux, séparément ou en combinaison. Les simulations actuelles conduisent le plus souvent à des changements de productivité très en deçà de ceux réellement observés. Les connaissances écophysologiques sur les interactions entre facteurs écologiques et leurs effets à long terme sont encore insuffisantes. Une autre voie de recherche explorée consiste à travailler dans des zones géographiques où les effets de certains facteurs peuvent être exclus. Ainsi, on observe de fortes augmentations de croissance dans les forêts boréales ou en zones de montagne, où les dépôts azotés sont faibles (Dupouey *et al.*, 1998). Finalement, les causes des changements de productivité sont encore très mal connues (synthèse récente dans Karjalainen *et al.*, 1999).

— Quels sont les risques associés à cette plus forte productivité ? Les tempêtes de décembre 1999 sont venues rappeler la sensibilité exacerbée des peuplements de grande hauteur. En outre, on peut aussi craindre que la fertilisation passive des forêts (CO₂ et apports d'azote) ne provoque des déséquilibres nutritifs, surtout sur des sols pauvres. Les travaux de Duquesnay (1998) montrent ainsi une diminution de la concentration foliaire en phosphore et une forte baisse des rapports Mg/N et Ca/N, au cours des vingt-cinq dernières années, dans des hêtraies lorraines.

Malgré les incertitudes, sur lesquelles nous avons volontairement insisté dans cet article, nous estimons que les changements de productivité devraient dès maintenant devenir un élément important dans l'élaboration de stratégies de gestion (sylviculture, aménagement forestier). En particulier, il est possible de réfléchir dès maintenant, à partir des éléments positifs disponibles et malgré les zones d'incertitude scientifique qui subsistent : même si nous ne connaissons pas encore très bien les causes des changements de productivité, il n'en demeure pas moins que la très forte fertilité des jeunes peuplements est une donnée objective, que chaque nouvelle étude vient confirmer. On ne peut plus imaginer ce que vont devenir les forêts en reproduisant simplement ce qu'elles ont été jusqu'ici...

Au niveau de la parcelle, les travaux sur la définition des régimes d'éclaircie, l'estimation de la possibilité et le choix des termes d'exploitabilité reposent largement sur l'expérience passée : pour le Chêne sessile, par exemple, on imagine d'intensifier la sylviculture pour garantir que le diamètre-objectif de 70 cm sera atteint à 180 ans (Jarret, 1996). Il est probable que la seule augmentation de

productivité (passive, d'un point de vue forestier) va déjà profondément modifier la situation. Nous allons chiffrer prochainement cette nouvelle donne, en faisant l'hypothèse que le niveau de productivité sera simplement maintenu à son niveau actuel dans le futur.

Au niveau de la forêt va se poser le problème des stratégies possibles de renouvellement des peuplements. Alors que les aménagistes de certains massifs rencontrent déjà des difficultés pour régénérer à un rythme convenable (débouchés, facilité d'obtention de la régénération, impact paysager...), ils vont devoir s'habituer à intégrer dans leur planification le fait que les jeunes peuplements seront mûrs à des âges sans doute bien inférieurs à ce qu'on constate aujourd'hui (réduction probable d'au moins un tiers pour l'âge d'exploitabilité). L'adaptation à cette contrainte va certainement demander plus qu'un simple toilettage des méthodes actuelles : sur le plan des objectifs, une articulation plus délicate des fonctions dans l'espace (production pour le marché, vieillissement, conservation, esthétique etc...) ; sur le plan technique, une meilleure utilisation des outils quantitatifs maintenant disponibles (systèmes d'informations géographiques, relations station-production, modèles de croissance, optimisation écologique ou économique de la sylviculture) ; sur le plan organisationnel, un impératif de communication et d'implication des divers utilisateurs de la forêt, afin d'obtenir un minimum de consensus social sur les stratégies de régénération.

Jean-François DHÔTE
Laboratoire d'Étude
des Ressources Forêt-Bois
UMR INRA-ENGREF 1092
14, rue Girardet
F-54042 NANCY CEDEX

Jean-Luc DUPOUEY
Équipe Phytoécologie forestière
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Laurent BERGÈS
Unité de recherches
Écosystèmes forestiers et Paysages
CEMAGREF
Domaine des Barres
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON

BIBLIOGRAPHIE

- ARNAL (M.), DROUINEAU (S.). — Évaluation de la productivité et réalisation de normes de sylviculture Chêne et Hêtre en Normandie. — Nancy : ENGREF, 1997. — 80 p. (Mémoire stage de fin d'études FIF).
- BADEAU (V.), DUPOUEY (J.-L.), BECKER (M.), PICARD (J.-F.). — Long-term growth trends of *Fagus sylvatica* L. in northeastern France. A comparison between high and low density stands. — *Acta Oecologica*, vol. 6, 1995, pp. 571-583.
- BADEAU (V.), BECKER (M.), BERT (D.), DUPOUEY (J.-L.), LEBOURGEOIS (F.), PICARD (J.-F.). — Long-term growth trends of trees : ten years of dendrochronological studies in France. In : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mieliäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 167-181.
- BECKER (M.), BERT (G.D.), BOUCHON (J.), PICARD (J.-F.), ULRICH (E.). — Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du XIX^e siècle. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 4, 1994, pp. 335-341.

- BECKER (M.), BERT (G.D.), BOUCHON (J.), DUPOUEY (J.-L.), PICARD (J.-F.), ULRICH (E.). — Long-term changes in forest productivity in northeastern France : the dendroecological approach. *In* : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 143-156.
- BERGÈS (L.). — Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. — Nancy : ENGREF, 1998. — 348 p. (Thèse de Doctorat).
- BERGÈS (L.), DUPOUEY (J.-L.), FRANC (A.). — Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the XIXth century. — *Trees*, vol. 14, 2000, pp. 398-408.
- CONTESSE (E.). — Proposition d'itinéraires sylvicoles pour les futaies régulières de Hêtre en Picardie. — Nancy : ENGREF ; Compiègne : ONF, 2000. — 46 p. + annexes (Mémoire de fin d'études FIF).
- DHÔTE (J.-F.). — Compétition entre classes sociales chez le Chêne sessile et le Hêtre. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2 spécial "Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers. Avancées récentes et conséquences sylvicoles", 1999, pp. 309-325.
- DHÔTE (J.-F.). — Effets des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulières de Hêtre ou de Chêne sessile. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° 6, 1997, pp. 557-578.
- DHÔTE (J.-F.), HATSCH (E.), RITTIÉ (D.). — Forme de la tige, tarifs de cubage et ventilation de la production en volume chez le Chêne sessile. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 57, 2000, pp. 121-142.
- DHÔTE (J.-F.), HERVÉ (J.-C.). — Changements de productivité dans quatre forêts de Chêne sessile depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 57, 2000, pp. 651-680.
- DUPLAT (P.), TRAN-HA (M.). — 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, 1997, pp. 611-634.
- DUPOUEY (J.-L.), BECKER (M.), BERT (D.), CADEL (G.), LEFÈVRE (Y.), PICARD (J.-F.), THIMONIER (A.). — Évolution récente des sols, de la végétation et de la productivité des forêts de montagne. — *Écologie*, vol. 29, n° 1-2, 1998, pp. 341-349.
- DUPOUEY (J.-L.), DENIS (J.-B.), BECKER (M.). — A new method of standardization for examining long-term trends in tree-ring chronologies. *In* : Tree rings and environment, Proceedings International Dendrochronological Symposium, Ystad (SW), 3-9/9/1990. — *Lundqua Report*, vol. 34, 1992, pp. 85-88.
- DUQUESNAY (A.). — Changements de la composition foliaire et de la productivité des hêtraies dans le quart Nord-Est de la France entre 1970 et 1995. — Université de Nancy I, 1998. — 222 p. + annexes (Thèse de Doctorat).
- DUQUESNAY (A.), DUPOUEY (J.-L.), LE TACON (F.), CLÉMENT (A.), ULRICH (E.). — Foliar nutrient changes of beech (*Fagus sylvatica* L.) in northeastern France between 1969 and 1997. — *Tree Physiology*, vol. 20, 1999, pp. 13-22.
- EICHHORN (F.). — Beziehungen zwischen Bestandeshöhe und Bestandsmasse. — *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*, 80, 1904, pp. 45-49.
- ELFVING (B.), TEGNHAMMAR (L.), TVEITE (B.). — Studies on growth trends of forests in Sweden and Norway. *In* : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 61-70.
- GILBERT (J.-M.), CHEVALIER (R.). — Relations milieu-production du Pin laricio. Étude de la croissance en hauteur. — *Informations techniques du CEMAGREF*, 96, 2, 1994, 8 p.
- GUILLEY (E.). — La Densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) : élaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra- et inter-arbres ; origine et évaluation non-destructive de l'effet arbre ; interprétation anatomique du modèle proposé. — Nancy : ENGREF ; Champenoux : INRA, 2000. — 190 p. (Thèse de Doctorat Sciences forestières et Sciences du bois).
- HOULLIER (F.). — Analyse et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : applications à la gestion des ressources forestières. — Université Claude Bernard-Lyon I, 1991. — 75 p. (Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à diriger les Recherches).
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- JARRET (P.). — Sylviculture du Chêne sessile. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 31, 1996, pp. 21-28.
- KARJALAINEN (T.), SPIECKER (H.), LAROUSSINIE (O.) Eds. — Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe. — *European Forest Institute Proceedings*, vol. 27, 1998, 286 p.
- LEBOURGEOIS (F.), BECKER (M.), CHEVALIER (R.), DUPOUEY (J.-L.), GILBERT (J.-M.). — Height and radial growth trends of Corsican pine in western France. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 30, 2000, pp. 712-724.
- PARDÉ (J.). — Table de production pour les forêts de Chêne rouvre de qualité tranchage du secteur ligérien. — *Notes techniques forestières*, n° 11, 1962. — Nancy : ENEF - Station de Recherches. — 6 p.

- PARDÉ (J.). — De 1882 à 1976/1980 : les places d'expérience de sylviculture du Hêtre en forêt domaniale de Haye (Meurthe-et-Moselle). — *Revue forestière française*, vol. XXXIII, n° spécial "Sylvicultures en futaies feuillues", 1981, pp. 41-64.
- PRETZSCH (H.). — Growth trends of forests in Southern Germany. *In* : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 107-132.
- SEYNAVE (I.). — Proposition de scénarios sylvicoles pour les futaies régulières de Hêtre en Lorraine. — Nancy : ONF – Direction régionale Lorraine, 1999. — 80 p. (Document interne).
- SKOVSGAARD (J.P.), HENRIKSEN (H.A.). — Increasing site productivity during consecutive generations of naturally regenerated and planted Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *In* : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 89-98.
- SPIECKER (H.), MIELIKÄINEN (K.), KÖHL (M.), SKOVSGAARD (J.P.) Eds. — Growth trends in European forests. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — 372 p. (EFI Research Report n° 5).
- THIMONIER (A.). — Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990. Rôle possible des apports atmosphériques. — Université Paris XI-Orsay, 1994. — 177 p. + annexes (Thèse de Doctorat).
- UNTHEIM (H.). — Has Site Productivity changed ? A case study in the Eastern Swabian Alb, Germany. *In* : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 133-146.

MODIFICATIONS À LONG TERME, DÉJÀ CONSTATÉES, DE LA PRODUCTIVITÉ DES FORÊTS FRANÇAISES (Résumé)

Plusieurs études européennes récentes ont montré que la croissance des arbres et la production des peuplements forestiers sont en forte augmentation depuis 150 ans. Nous proposons ici une revue critique des méthodes employées : analyses rétrospectives de la croissance radiale par la méthode dendroécologique, de la croissance en hauteur par analyse de tige ; suivi en continu de la production des peuplements grâce à des réseaux de placettes permanentes. Les atouts et faiblesses de ces méthodes sont discutés, dans la perspective des études sur l'effet des changements environnementaux (CO₂, apports d'azote, climat) sur la dynamique des forêts. Les premiers diagnostics précis à l'échelle de la parcelle commencent à être disponibles, indiquant une productivité actuelle supérieure de 50 % environ à celle constatée au début du siècle. Des incertitudes subsistent dans quatre domaines : la généralisation des constats, obtenus jusqu'ici pour quelques essences et régions, et rarement au niveau du peuplement ; les changements simultanés pour la qualité du bois ; la compréhension du rôle des changements environnementaux ; l'évaluation des risques écologiques associés à la forte productivité. Quoi qu'il en soit, nous estimons que les forestiers devraient dès maintenant intégrer dans leurs réflexions l'accélération des cycles de production (révolutions plus courtes, offre de bois accrue, effort de régénération à intensifier, contribution des forêts aux politiques "effet de serre"...).

LONG TERM CHANGES OBSERVED IN THE PRODUCTIVITY OF FRENCH FORESTS (Abstract)

Several recent European studies have shown that tree growth and stand yield have strongly increased over the past 150 years. In this article, we propose a critical review of the methods used : retrospective analyses of radial growth (dendroecology) or height growth (stem analyses) ; continuous observation of stand yield using permanent plot networks. The advantages and drawbacks of each method are compared, in the light of studies on the effect of environmental changes (CO₂, nitrogen inputs, climate) on forest dynamics. The first accurate diagnoses at stand level are beginning to be available, and indicate that today's stand productivity is 50 % higher than at the beginning of this century. Major research areas now are : 1) to generalise the observations to other species and regions, especially at the stand-level ; 2) to evaluate the concomitant changes in wood quality ; 3) to better understand the role of environmental changes ; 4) to evaluate the associated ecological risks. In any case, we believe that forest managers should take this accelerated growth into consideration (shorter rotations, increased wood supply, intensified regeneration, forest contribution to policies to mitigate "greenhouse effects", etc.).
