
DES HÊTRAIES QUI POUSSENT DE PLUS EN PLUS VITE : VERS UNE FORTE DIMINUTION DE LEUR ÂGE D'EXPLOITABILITÉ ?

**JEAN-DANIEL BONTEMPS - PATRICK VALLET - JEAN-CHRISTOPHE HERVÉ
DANIEL RITTIÉ - JEAN-LUC DUPOUEY - JEAN-FRANÇOIS DHÔTE**

Au cours des 15 dernières années, de nombreuses études ont montré que la productivité forestière avait fortement augmenté depuis 150 ans, dans la plupart des régions d'Europe (Spiecker *et al.*, 1996). Cette évolution a d'abord été mise en évidence, de façon fortuite, par des études dendroécologiques qui recherchaient des origines lointaines aux dépérissements forestiers de la décennie 1980 (travaux de l'équipe de M. Becker à Nancy, synthèse dans Becker *et al.*, 1994). Les chiffres obtenus par cette méthode étaient très élevés : de l'ordre de + 100 % d'augmentation de l'accroissement radial entre 1890 et 1990 dans le cas de Hêtres en futaie régulière en Lorraine (Badeau *et al.*, 1995).

Quatre catégories de causes ont été invoquées pour expliquer l'existence et l'importance de ces dérives de l'accroissement :

- des artefacts méthodologiques, liés aux plans d'échantillonnage et au caractère principalement rétrospectif des méthodes employées (revue critique dans Dhôte *et al.*, 2000) ;
- des évolutions d'origine sylvicole (intensification des coupes d'éclaircie, amélioration générale des pratiques : Cannell *et al.*, 1998) ;
- une reconstitution progressive de la fertilité, faisant suite à une longue période d'exploitation intensive des peuplements et des sols (Glatzel, 1999) ;
- les changements globaux des facteurs environnementaux (concentration atmosphérique en CO₂, dépôts azotés, réchauffement climatique ; Cannell, 1999).

Avec le recul et l'accumulation de résultats convergents obtenus par diverses méthodes, un consensus s'est fait sur l'existence du phénomène. De fortes incertitudes subsistent cependant, en ce qui concerne les causes et la répartition géographique du phénomène (Karjalainen *et al.*, 1999), et les hypothèses d'évolution dans le futur. D'autre part, la mesure précise de la tendance à l'échelle du peuplement, nécessaire pour tirer des conclusions quant à la gestion des ressources forestières, fait encore défaut. Les indications fournies jusqu'à présent par des approches dendroécologiques concernaient l'accroissement radial d'arbres individuels, ce qui est insuffisant pour caractériser la production du peuplement entier.

Le présent article est consacré à ce dernier problème, et s'articule en deux volets : quantifier les changements de productivité à l'échelle du peuplement, dans les hêtraies régulières domaniales du Nord-Est de la France ; intégrer ces résultats dans un modèle de croissance, et explorer par simulation les conséquences sur l'âge d'exploitabilité des hêtraies.

Nous avons mis au point une méthode destinée à quantifier le phénomène, en limitant l'influence des artéfacts et des facteurs endogènes mentionnés plus haut. En premier lieu, nous avons mis l'accent sur la croissance en hauteur dominante, utilisée depuis longtemps comme un indicateur de la production en volume (loi de Eichhorn ; Assmann, 1970). Elle présente l'avantage, par rapport à la croissance radiale, d'être peu sensible à la sylviculture (Lanner, 1985), du moins tant qu'on reste dans la gamme des éclaircies couramment pratiquées au cours du XX^e siècle. Bien que ce comportement général souffre quelques exceptions, notamment chez les Pins (McFarlane *et al.*, 2000 ; Meredieu, 1998), nos précédentes analyses ont confirmé sa validité dans des essais d'éclaircie en hêtraie suivis depuis 1882 (Dhôte et de Hercé, 1994). Sans avoir à connaître exactement la sylviculture pratiquée, on a donc pu envisager de rechercher des changements de rythme de croissance par une méthode rétrospective consistant à reconstituer par analyse de tiges puis comparer la croissance passée d'arbres appartenant à des peuplements d'âges actuels différents. Le contexte des changements de productivité nécessite également de redéfinir les concepts et les méthodes d'étude et d'échantillonnage de la croissance en hauteur. En particulier, on ne peut plus utiliser l'indice de fertilité classique (hauteur à un âge de référence), qui est soumis à la dérive qu'on cherche à mettre en évidence. Pour contrôler la fertilité, nous avons ainsi été amenés à définir une méthode d'échantillonnage spécifique, basée sur des couples de peuplements jeunes-vieux sur stations identiques, et à concevoir une modélisation originale pour l'analyse des données recueillies (Hervé *et al.*, 2000).

Malgré son intérêt, la croissance en hauteur dominante a encore été peu étudiée, en tant qu'indicateur des changements de productivité. En France, l'étude de Gilbert et Chevalier (1994) fait exception. De même, les contributions restent peu nombreuses dans le reste de l'Europe (Sterba, 1995 ; Elfving et Tegnhammar, 1996 ; Elfving et Nystrom, 1996 ; Unthheim, 1996 ; Pretzsch, 1999). Le recueil des données est lourd, et nous avons en l'occurrence tiré parti d'une campagne d'analyse de tiges menée par l'ONF en 1998 et 1999, dans le but d'établir un système de référence pour la croissance en hauteur du Hêtre dans la partie Nord de la France (aucune donnée de référence n'existait jusqu'à présent en France pour cette essence).

La croissance radiale a été échantillonnée en parallèle, puis modélisée de façon similaire. Cela offrait un double intérêt : pouvoir comparer les tendances à long terme dans chacune des composantes de la croissance (et éventuellement détecter une tendance sylvicole), et tirer des conclusions sur l'évolution de la croissance en volume.

PEUPELEMENTS ET DONNÉES D'ÉTUDE

Plan d'échantillonnage - choix des peuplements

L'hypothèse d'invariance de la croissance en hauteur des arbres dominants, pour une large gamme de densités de peuplements, nous permet d'étudier les changements de cette croissance au cours du XX^e siècle, sans connaître précisément la sylviculture pratiquée, et sans en tenir compte. On peut ainsi constituer, de façon rétrospective, un échantillon de données croisant suffisamment bien l'âge et la date, ce qui était à la fois indispensable pour séparer ces deux effets et impossible à obtenir par une autre méthode.

Notre démarche a été de comparer la croissance présente et passée d'arbres aujourd'hui dominants, et appartenant à des générations différentes, c'est-à-dire d'âges actuels différents. Pour que cette comparaison inter-génération soit interprétable en termes de changements de productivité, il fallait contrôler l'effet station, c'est-à-dire assurer que les comparaisons se fassent à fertilité constante. Ce que nous appelons ici fertilité recouvre les facteurs écologiques permanents de la production : topographie, exposition, pente, type de sol, etc.

Nous n'avons pas utilisé pour cela l'indice de fertilité classique, puisque celui-ci se confond avec la hauteur des peuplements, et intègre donc les évolutions de vitesse de croissance que nous cherchions à mettre en évidence. Notre méthode a été de choisir des peuplements associés en couples, les deux peuplements d'un couple étant d'âges actuels différents, mais installés sur une même station, tel que cela pouvait être apprécié aujourd'hui grâce à une caractérisation écologique du milieu. En pratique, nous avons imposé aux peuplements d'un même couple :

- d'être à proximité, dans la même forêt (en pratique, distants en moyenne de 100 à 200 mètres, jamais de plus de 500 mètres) ;
- d'être en même position topographique ;
- de présenter le même cortège floristique ;
- d'être installés sur le même type de sol.

Une même démarche (couples de peuplements et contrôle de la station) avait été mise en œuvre par Gilbert et Chevalier (1994) pour rechercher des tendances à long terme sur la croissance en hauteur dominante du Pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France.

Par ailleurs, on a essayé de varier, autant que possible, les conditions de station entre les différents couples de l'échantillon, de façon à couvrir une large gamme de fertilité. Il s'agissait d'une condition secondaire, qui a cependant été bien satisfaite, comme on a pu le vérifier *a posteriori*.

Chaque couple devait associer deux peuplements d'âges différents : un vieux (âge > 100 ans) et un jeune (âge < 100 ans), en assurant une différence d'âge entre les deux de l'ordre de 50 ans ou plus.

Dans un plan de ce type, l'âge des vieux peuplements fixe la limite de temps au-delà de laquelle on ne pourra pas remonter. De ce point de vue, il est souhaitable que l'âge des vieux soit assez élevé. Il convient cependant de ne pas dépasser l'âge normal d'exploitabilité (150-180 ans dans le cas du Hêtre), pour ne pas risquer d'inclure, dans l'échantillon, des peuplements ayant eu une histoire trop particulière.

La différence d'âge entre les jeunes et les vieux peuplements permet de diminuer la corrélation entre âge et date, et ainsi d'estimer plus précisément chacun des deux effets. Cependant, les jeunes ne doivent pas être trop jeunes, pour assurer un nombre suffisant de points de comparaison. Une gamme d'âge commune suffisamment longue entre les jeunes et les vieux est également nécessaire pour détecter d'éventuelles interactions entre âge et date (effet de la date dépendant de l'âge). À cet égard, notre plan d'échantillonnage est (obligatoirement) incomplet : s'il permet la comparaison directe de la croissance des jeunes d'aujourd'hui à la croissance des jeunes du début du siècle (les vieux d'aujourd'hui), une telle comparaison directe n'est pas possible entre les vieux d'aujourd'hui et les vieux d'hier (ces derniers ne faisant pas partie de l'échantillon !).

Ces considérations nous ont guidés dans le choix des limites d'âges indiquées ci-dessus. Ces limites doivent permettre *a priori* l'observation directe de changements dans la vitesse de croissance en hauteur, tout au long du XX^e siècle d'une part, et pour des peuplements d'âge compris entre 0 et 60-70 ans d'autre part.

Quatorze couples de peuplements ont ainsi été constitués en forêt domaniale (tableau I, p. 126), soit 29 peuplements au total, l'un des couples étant en fait un triplet associant un vieux peuplement, un jeune et un très jeune (il s'agissait de profiter d'une opportunité se présentant sur le terrain).

À ce stade, l'ONF a recherché des peuplements pouvant satisfaire aux conditions, participé aux prospections et pris à sa charge l'abattage et l'exploitation des arbres retenus.

TABEAU I Localisation et âge * des peuplements de l'échantillon

Couple	Département	Forêt	Âge jeune	Âge vieux	Âge vieux – âge jeune
1.....	54	Haye	72	136	64
2.....	54	Haye	66	137	71
3.....	54	Haye	58	144	86
5.....	57	Hesse	63	157	94
4.....	57	Sarrebouurg	53	108	55
6.....	57	Lemberg	84	142	58
7.....	57	Mouterhouse	53	132	79
8**	57	Goendersberg	46-33	183	137
9.....	52	Morimond	55	123	68
10.....	67	La Petite-Pierre	39	122	83
11	68	FC Fislis	89	168	79
12	88	Ban d'Uxegney	75	122	47
13	88	Sainte-Hélène	65	131	66
14	88	Fraize	83	152	69
Moyenne			64,4	139,8	75,4
Écart-type			14,4	19,3	21,0

* Âge du peuplement en 1998 = médiane des nombres de cernes comptés à 0,30 m sur les 3 arbres de chaque placette, ramené à 1998 (i.e. diminué de 1 pour les peuplements exploités fin 1999 : couples 8, 9, 11 et 14).

** Triplet vieux – jeune – très jeune.

Placettes et mesures

Selon une procédure classique en France pour l'étude rétrospective de la hauteur dominante (Duplat et Tran-Ha, 1997), nous avons installé dans chaque peuplement une placette de 6 ares, dans laquelle ont été repérés et abattus le plus gros hêtre, le 3^e plus gros et le 5^e plus gros. Une partie des placettes a été exploitée durant l'hiver 1998-1999, l'autre partie en fin d'année 1999.

Dans chaque placette et pour chacun des 3 arbres échantillons, la hauteur totale a été mesurée, une première rondelle a été découpée à 0,30 m du sol, une deuxième à 1,30 m, puis d'autres à des hauteurs précisément mesurées : dans les vieux peuplements, environ tous les 4 m dans la partie basse de la tige et tous les 2 m dans la partie haute ; dans les jeunes, environ tous les 2 m sur toute la tige. Les rondelles ont ensuite été transportées au laboratoire, pour comptage des cernes.

La lecture des cernes étant particulièrement difficile dans le cas du Hêtre (cernes peu marqués, cernes manquants, faux cernes), le décompte ne peut en effet être réalisé avec exactitude que dans les conditions de laboratoire : chaque rondelle a été passée au rabot, puis au scalpel et à la craie, les cernes ont ensuite été décomptés à la loupe binoculaire. Des années caractéristiques (cernes très fins ou très larges) ont été progressivement définies et utilisées comme contrôle (repérage de cernes manquants ou faux cernes). La procédure a été répétée sur au moins deux rayons, voire plus si nécessaire. Dans les cas les plus difficiles, tout un secteur de la rondelle a dû être examiné.

À partir des nombres de cernes comptés sur chaque rondelle, une courbe de croissance en hauteur dominante de la placette a été construite, en faisant une moyenne des 3 arbres selon une procédure décrite dans Hervé *et al.* (2000).

Outre le comptage des cernes sur l'ensemble des rondelles, la rondelle à 1,30 m a fait l'objet d'une mesure des largeurs de cerne sur banc optique, le long de 4 rayons repérés selon deux axes orthogonaux. À partir de ces mesures, le rayon quadratique moyen à chaque date a été calculé, d'où l'on tire enfin la largeur de cerne correspondante (Bontemps, 2002). Comme pour la hauteur, on a construit une courbe de croissance radiale moyenne par placette.

MODÉLISATION DU CHANGEMENT DE PRODUCTIVITÉ

Comparaison des deux générations au même âge

La comparaison des hauteurs et diamètres des jeunes et des vieux peuplements au même âge (celui des jeunes au moment de la mesure), présentée dans le tableau II (ci-dessous), montre que les jeunes ont effectivement poussé plus vite que les vieux, en hauteur comme en diamètre.

À un âge moyen de 65 ans, l'écart moyen en hauteur dépasse 5 mètres. Cet écart est un peu exagéré du fait de ralentissements temporaires très marqués de la croissance en hauteur qui ont

TABLEAU II
Comparaison des hauteurs/diamètres
des jeunes et des vieux peuplements au même âge

Dpt	Forêt	Âge comparaison	Hauteur jeune (m)	Hauteur vieux (m)	H jeune – H vieux (m)	Diamètre jeune (cm)	Diamètre vieux (cm)	D jeune – D vieux (cm)
54	Haye	72	27,7	21,7	5,9	40	25	15
54	Haye	66	27,2	22,0	5,2	40	26	14
54	Haye	58	26,0	23,8	2,2	32	30	2
57	Hesse	63	26,2	14,4	11,8 *	32	24	8
57	Sarrebourg	53	27,1	23,5	3,6	35	10	25
57	Lemberg	84	37,3	29,8	7,5*	48	30	18
57	Mouterhouse	53	26,6	23,1	3,5	29	26	3
57	Goendersberg	47	20,9	13,6	7,3 *	27	14	13
52	Morimond	56	22,1	19,3	2,8	25	19	6
67	La Petite Pierre	39	19,8	12,9	6,9*	20	7	13
68	FC Fislis	90	32,6	25,5	7,1	43	28	15
88	Ban d'Uxegney	75	24,7	22,3	2,4	25	28	-3
88	Sainte-Hélène	65	20,9	14,9	6,0	24	13	11
88	Fraize	84	26,7	23,6	3,1	36	33	3
	Moyenne	64,64	26,1	20,7	5,4	33	22	11
	Écart-type	14,44	4,7	4,8	2,7	8	8	7

* Différence augmentée par un ralentissement temporaire marqué de la croissance des vieux.

affecté certains vieux peuplements dans leur jeunesse. Si on ne tient pas compte de ces quatre peuplements, l'écart est supérieur à 4 mètres, ce qui reste considérable. La croissance en diamètre s'est également fortement accélérée.

Méthode de modélisation

La croissance en hauteur et en diamètre des arbres dominants s'est donc accélérée au cours du XX^e siècle dans les hêtraies régulières du Nord-Est. Pour restituer la chronique de ces changements, des modèles pour les accroissements en hauteur et en rayon (largeur des cernes) ont été construits et ajustés aux données. Pour les accroissements en hauteur, le modèle est de la forme :

$$\Delta H = R \cdot g_h(\text{date}) \cdot f_h(H),$$

où H et ΔH sont respectivement la hauteur et l'accroissement en hauteur, R est un paramètre dépendant de la fertilité de la station, $f_h(H)$ une fonction de croissance classique rendant compte de l'effet du stade de développement sur la croissance, et $g_h(\text{date})$ une fonction de la date, rendant compte des variations de croissance dans le temps. $g_h(\text{date})$ peut prendre différentes formes (linéaire, quadratique, spline cubique), mais vaut toujours 1 en 1900.

La construction du modèle est exposée en détail dans Hervé *et al.* (2000). Un modèle de forme similaire (largeur de cerne fonction du rayon, de la station et de la date) a été construit pour la croissance radiale (Bontemps, 2002).

Les choix de modélisation (nature des variables, composition des différents effets, formes mathématiques) ont des conséquences importantes en ce qui concerne le principal résultat attendu, à savoir l'identification de la courbe de tendance $g_h(\text{date})$. En d'autres termes, nous ne disposons pas d'un outil de mesure direct de la tendance ; nous pouvons seulement, parmi les observations historiques de la croissance, extraire une tendance conjointement aux autres effets qui influent simultanément, la fertilité de la station et le stade de développement de l'arbre. Ainsi, notre estimation de la tendance est contingente à l'ensemble des choix de modélisation. À cet égard, trois aspects doivent être plus particulièrement soulignés :

- Les changements de vitesse de croissance sont mesurés à taille identique ; pour la hauteur par exemple (c'est aussi le cas pour la croissance radiale), l'évolution endogène de la croissance au cours de la vie de l'arbre est représentée ici à travers $\Delta H \propto f_h(H)$; c'est donc la taille de l'arbre H qui détermine sa vitesse de croissance. Par contraste, les travaux pionniers de Becker *et al.* (1994) reposaient sur une évolution endogène modélisée en fonction de l'âge du cerne. Pour écrire notre modèle, nous avons fait l'hypothèse que, d'un point de vue physiologique, il est pertinent de considérer l'évolution endogène de la croissance comme dépendant de la taille plutôt que de l'âge. Le caractère général de cette formulation a été suggéré par von Bertalanffy (1973) : la croissance est alors analysée comme la combinaison de processus de synthèse (anabolisme) et de dégradation (catabolisme), auxquels s'ajoutent éventuellement d'autres facteurs, et qui peuvent à leur tour être reliés aux dimensions de l'organisme (rôle des surfaces d'échanges, et de la taille des compartiments notamment). Deleuze (1996) a fait observer qu'en dépit de la formulation relativement compliquée des modèles à base écophysio-logique, le phénomène de croissance pouvait toujours se traduire sous une forme récurrente, dans laquelle l'accroissement est fonction de la taille. Les équations de croissance en hauteur fondées sur un bilan de carbone couplé à la théorie du pipe-model (par exemple Valentine, 1985 ; Meng *et al.*, 1997) sont de même nature.

Outre les motivations théoriques, un test direct de la validité de cette hypothèse est fourni par les quatre vieux peuplements de notre échantillon qui, après avoir traversé une longue période

de stagnation, ont repris ensuite une vitesse de croissance conforme à leur hauteur d'alors. Une expression qui ferait intervenir l'âge ne pourrait rendre compte de ce type de comportement.

Dans un contexte où la croissance s'est accélérée, ce choix peut avoir des conséquences importantes, car des arbres de même âge, mais appartenant à des générations différentes, ont des tailles très dissemblables (les plus jeunes étant donc plus gros à âge identique). Lorsqu'on opère une comparaison de la croissance à âge égal, on occulte cette différence de stade de développement, lequel est supposé conditionner l'accroissement. On risque ainsi de voir une partie de l'effet du stade de développement se reporter sur celui de la date.

- La fertilité de la station intervient sous la forme d'un paramètre unique, R , et multiplicativement par rapport au modèle "endogène" (la forme et la hauteur de l'asymptote des courbes de hauteur ne dépendent pas de la station). Ce paramétrage n'a pas été choisi *a priori*, mais après analyse de diverses formules, et c'est celui qui s'est avéré rendre compte de la manière la plus efficace des données observées.
- Les trois effets — station, date et stade de développement — se composent de manière multiplicative. Cela signifie que le changement relatif (x %) associé à l'un ou l'autre des facteurs est indépendant du niveau des autres facteurs (il n'y a pas d'interactions entre âge et date, ou entre date et station...). Ce type de modèle interdit par construction des phénomènes du type "limitation-saturation", dans lesquels la forme de la réponse à un facteur dépend du niveau d'un autre facteur (Thornley, 1976). Nous n'excluons pas *a priori* de telles réponses, mais elles sont plus difficiles à tester et ne pourront rigoureusement l'être qu'en accumulant des données analogues. Dans le jeu de données présenté ici, il ne semble pas y avoir d'interaction entre l'âge, la fertilité de la station et la tendance séculaire.

Des accélérations rapides, récentes et irrégulières dans le temps

L'ajustement des modèles a été réalisé selon une méthode décrite dans Hervé *et al.* (2000). En considérant des accroissements standardisés, c'est-à-dire débarrassés des effets station et stade de développement (cf. figures 1 et 2, pp. 130-131), on constate que les vitesses de croissance en hauteur et en diamètre ont augmenté d'une façon très parallèle, d'environ 50 % entre 1900 et 2000, à un rythme accéléré mais irrégulier. La majeure partie de l'augmentation s'est produite entre 1950 et 1980, avec des interruptions d'origine vraisemblablement climatique. On remarque notamment la dépression prononcée de la décennie 1940-1950, puis un nouvel accès de faiblesse autour de 1990. Ces deux phénomènes coïncident avec des répétitions de sécheresses estivales, dont les effets sur la croissance du Hêtre sont bien documentés dans le Nord-Est de la France (Dhôte, 1994 ; Picard, 1995 ; Badeau, 1995 ; Bouriaud, 2003).

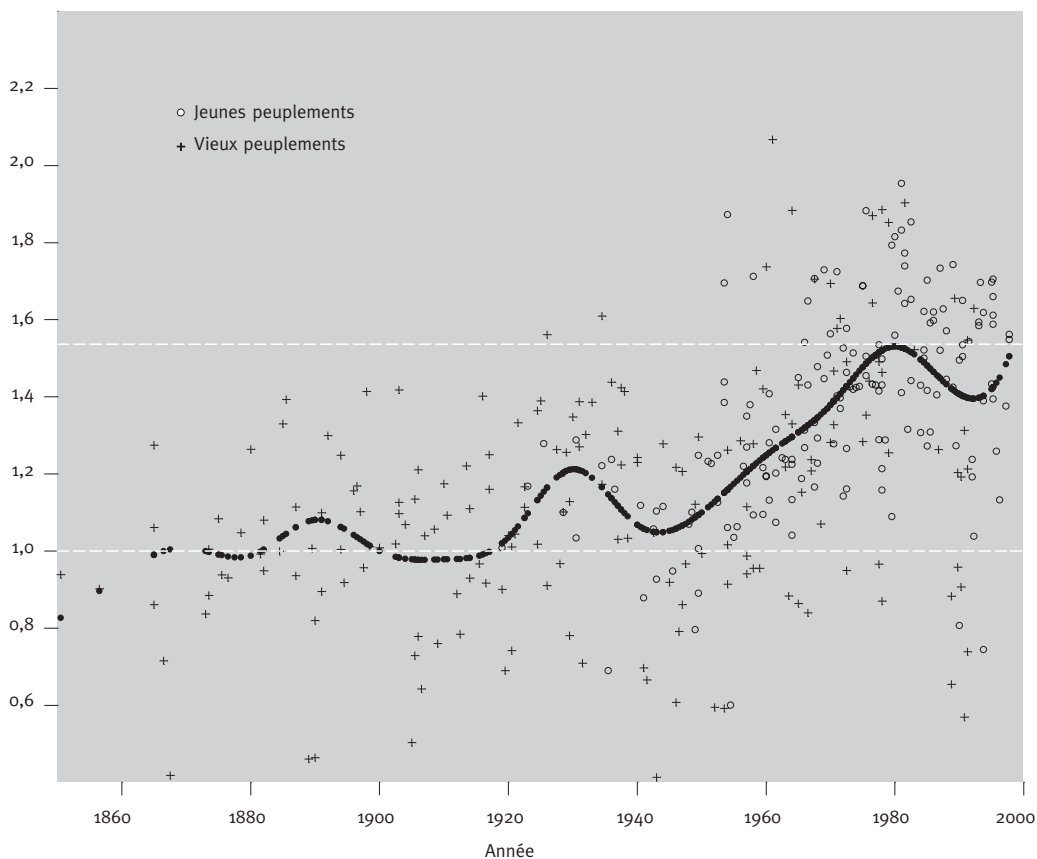
On relève également que les accroissements des jeunes et des vieux peuplements sont relativement bien "mêlés" pendant leur période commune (1940-2000), ce qui tend à confirmer l'hypothèse d'absence d'interaction entre l'âge et la date.

Signification des changements constatés

Cette augmentation de 50 % sur un siècle, observée à tous les niveaux de fertilité et à taille identique, vaut aussi bien pour la hauteur que pour le diamètre. Étant donné la forme des modèles utilisés, ce changement de vitesse de croissance s'interprète comme une "contraction du temps" : tout se passe 1,5 fois plus vite en 2000 qu'en 1900, dans chacune des composantes de la croissance. On peut donc en déduire que le même taux de changement a affecté la croissance en volume, du moins en ce qui concerne les arbres dominants. Si la productivité se maintenait à l'avenir au niveau atteint en 2000, alors les mêmes tailles seraient atteintes en un tiers

FIGURE 1

**ACCROISSEMENTS EN HAUTEUR CORRIGÉS DES EFFETS
FERTILITÉ ET STADE DE DÉVELOPPEMENT EN FONCTION DE LA DATE,
STANDARDISÉS AU NIVEAU 1 EN 1900,
AVEC UN MODÈLE D'EFFET DATE REPRÉSENTÉ PAR UNE SPLINE CUBIQUE**



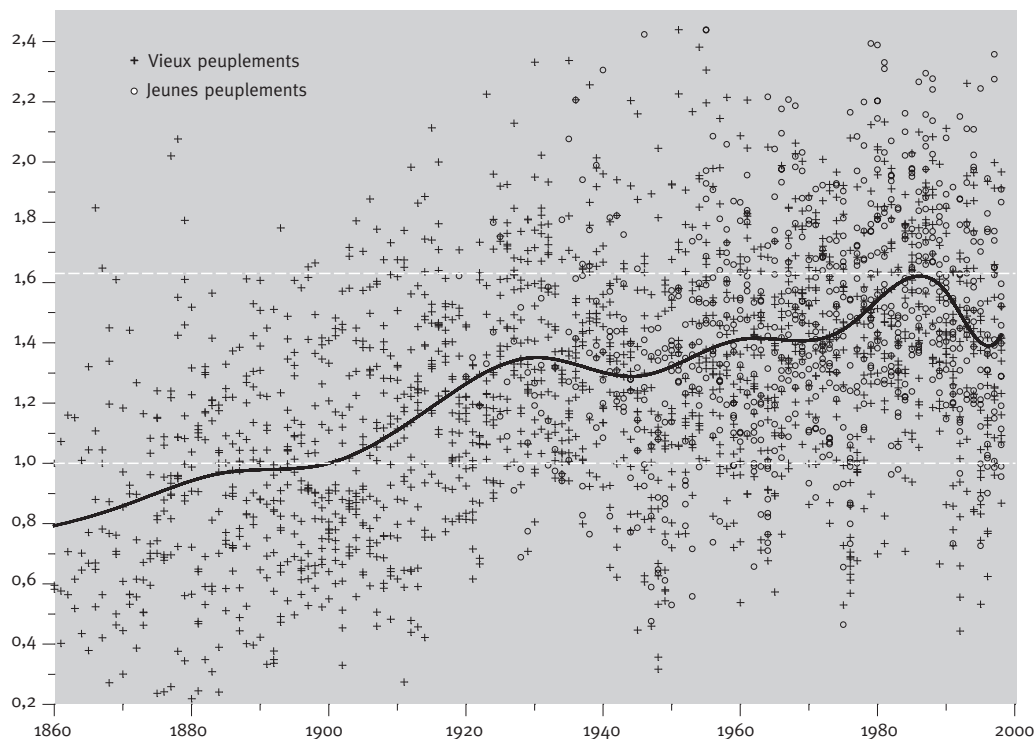
de temps en moins. Par exemple, sur une station où l'on récoltait en 1950 des hêtraies de 40 m de hauteur et 60 cm de diamètre à 150 ans, la génération-fille sera mûre à 100 ans, à critères inchangés.

Ce faisant, on suppose qu'il n'y a pas eu de modification de la forme des tiges pendant la même période. Une telle modification nous paraît très improbable et, si elle a eu lieu, elle n'a pu être que de faible amplitude. À ce propos, signalons qu'une étude de plusieurs centaines de fiches de cubage de Chêne sessile, conduite à partir des archives de notre laboratoire, n'a pas permis de détecter une modification de la forme sur la période 1930-1980 (Loustau, 2004).

Ces conclusions supposent que les changements que nous avons observés sur les dominants s'appliquent bien à l'ensemble du peuplement. Cet aspect reste à étudier. Pour ce faire, nous comptons utiliser les dispositifs permanents d'étude de la production, installés entre les années 1880 et 1940. Ces réseaux, d'une trentaine de placettes environ, existent pour les principales essences sociales de la moitié Nord de la France (Hêtre, Chêne sessile, Sapin, Épicéa commun, Pin sylvestre). Grâce à des inventaires réguliers, tous les 5 ans en moyenne, on y connaît la production sur une période de 60 à 100 ans qui recouvre une large partie du XX^e siècle.

FIGURE 2

**LARGEURS DE CERNE CORRIGÉES DES EFFETS
FERTILITÉ ET STADE DE DÉVELOPPEMENT EN FONCTION DE LA DATE,
STANDARDISÉES AU NIVEAU 1 EN 1900,
AVEC UN MODÈLE SPLINE CUBIQUE DE LA DATE**



SIMULATION DE SCÉNARIOS SYLVICOLES

Méthode de simulation

Les simulations qui suivent ont été réalisées sous le logiciel CAPSIS (de Coligny *et al.*, 2004), à l'aide du modèle de croissance *Fagacées* développé par J.-F. Dhôte. Par rapport à la description initiale du modèle (Dhôte, 1995), le module de croissance en hauteur dominante a été remplacé par les résultats de l'étude présentée ci-dessus, les autres composantes du modèle étant inchangées. La programmation du modèle dans la plate-forme CAPSIS a été réalisée par P. Vallet en 2002-2003.

Nous avons fait les deux hypothèses suivantes :

- la productivité du peuplement suit le rythme imposé par la croissance en hauteur dominante ;
- le niveau de productivité (valeur de la correction en fonction de la date) est supposé constant jusqu'en 1900 (niveau 1), puis il augmente de façon quadratique jusqu'à 1,5 en 2000. Il reste fixé à 1,5 au-delà de 2000.

La structure du modèle *Fagacées* a rendu cette opération très commode. En effet, l'ensemble de la dynamique est piloté par la croissance en hauteur dominante. Celle-ci détermine directement l'accroissement en surface terrière du peuplement, qui est ensuite désagrégé (ou réparti) entre les arbres. Ces deux étapes ne font intervenir ni l'âge, ni l'indice de fertilité. Ainsi, sans qu'on ait besoin de recalibrer l'ensemble du modèle, le changement de + 50 % sur la croissance en hauteur dominante entre 1900 et 2000 se diffuse sur l'ensemble des lois de croissance.

Pour la simulation, nous avons considéré une station de bonne fertilité (hauteur dominante de 32,5 m à 100 ans en 1950), déclinée pour deux générations installées respectivement en 1850 et 1950. Ces situations correspondent aux futaies mûres qui sont récoltées aujourd'hui et aux jeunes futaies en pleine productivité. La hauteur dominante de 25 m est atteinte à 68 ans pour la génération née en 1850, contre 52 ans pour celle née en 1950.

À ces peuplements, nous avons appliqué deux scénarios sylvicoles différant essentiellement par la densité résiduelle des peuplements après coupe :

- un scénario dit "historique", correspondant à des peuplements denses, évoluant entre les normes N1 et N2 de Pardé-Oswald (Oswald, 1982) ; ces peuplements se rapprochent de nos placettes permanentes anciennes, traitées en éclaircies modérées ; dans ce scénario, 11 éclaircies sont pratiquées entre le stade Ho = 14 m et la récolte finale.

- un scénario dit "dynamique", suivant les préconisations de Duplat et Roman-Amat (1996) ; ici, on compte deux dépressages précoces, puis 7 éclaircies entre le stade Ho = 14 m et la récolte finale.

Dans les deux cas, les éclaircies sont de nature mixte : on associe un léger prélèvement par le haut, qui affecte très peu la population des 100 plus gros par hectare, avec un prélèvement par le bas. La rotation des éclaircies est adaptée à l'intensité des coupes et à la vitesse de croissance. Son minimum est de 6 ans (scénario dynamique, jeune génération, vers 30 ans), son maximum de 15 ans (scénario historique, vieille génération, vers 150 ans).

TABEAU III Principales statistiques de peuplement simulées par le modèle *Fagacées* pour deux générations décalées de 100 ans
 ayant subi le scénario "historique" (Oswald, 1982) en haut
 ou le scénario "dynamique" (Duplat et Roman-Amat, 1996) en bas
 Sont renseignés : la hauteur dominante (Ho), le nombre de tiges (N), la surface terrière (G)
 et le diamètre dominant (Do)

Génération	Stade	Âge (ans)	Ho (m)	N (/ha)	G (m ² /ha)	Do (cm)
Scénario "historique"						
Installation 1850	1 ^{re} éclaircie	36	14,5	2 100	21,7	18,5
	Récolte	150	41	145	37,5	59
Installation 1950	1 ^{re} éclaircie	30	14,9	2 060	21,2	18,8
	Récolte	123	41,4	143	36	59
Scénario "dynamique"						
Installation 1850	1 ^{re} éclaircie	36	14,5	1 457	18,3	18,7
	Récolte	108	34,2	78	21,4	59
Installation 1950	1 ^{re} éclaircie	30	14,9	1 489	17,9	18,7
	Récolte	87	35,3	80	22	59

Résultats de simulation

Pour qualifier les scénarios, nous utilisons l'indice de densité relative RDI, fondé sur l'idée de Reineke (1933) : il exprime le rapport à la densité limite au-delà de laquelle commence l'auto-éclaircie (mortalité naturelle due aux trop fortes densités). Pour le scénario "historique", l'indice RDI avoisine 0,8 au stade perchis-jeune futaie, puis diminue graduellement vers 0,6 à l'âge de la récolte (ce qui signifie qu'on passe de 80 % à 60 % du matériel sur pied maximal permis par la station). Pour le scénario "dynamique", l'indice RDI évolue autour de 0,6 dans le jeune âge, pour diminuer ensuite vers 0,3 à l'âge de récolte. Le tableau III (p. 132) récapitule les étapes initiale (première éclaircie) et finale (récolte) de chaque scénario, la récolte étant déclenchée quand le diamètre dominant atteint 60 cm.

Si l'on compare les deux générations, à **ylviculture donnée**, on constate que l'âge d'exploitabilité baisse de 21 à 27 ans (soit - 18 à - 19 %). Le fait que nous ne retrouvons pas la diminution attendue d'un tiers pour l'âge d'exploitabilité s'explique facilement : la génération 1850 a traversé tout le XX^e siècle, et elle a donc bénéficié d'une stimulation pendant les deux derniers tiers de sa vie. Son indice de productivité moyen est 1,15, toujours avec une valeur de référence 1 en 1900 ; celui de la génération 1950 est de 1,43 (+ 24 %). Pour cette même génération, les accroissements moyens, à l'âge de récolte, sont de 0,34 m/an pour la hauteur et de 2,4 mm/an pour le rayon (+ 22 à 23 % par rapport à la génération 1850).

Si l'on compare ensuite les deux scénarios, **pour une même génération**, l'âge d'exploitabilité diminue de 36 à 42 ans (- 28 à 29 %) entre les modalités "historique" et "dynamique". Par conséquent, si une forte intensification des éclaircies entraîne bien un raccourcissement des révolutions, le changement de productivité — passif du point de vue forestier — assurerait à lui seul, par simple remplacement des générations, les deux tiers de l'effet recherché.

Nous pouvons maintenant envisager la combinaison des deux évolutions : une matérialisation des changements de productivité lorsqu'on passe d'une génération à la suivante ; l'application, à la seule jeune génération, des normes de sylviculture intensive qui sont préconisées aujourd'hui pour le Hêtre. Cette comparaison est sans doute la plus pertinente du point de vue de l'aménagiste, amené à gérer ensemble des collections de peuplements d'histoires différentes. Dans ce cas, on constate une réduction très forte de l'âge d'exploitabilité, qui passe de 150 à 87 ans (- 42 %), tandis que la hauteur finale atteinte diminue de 41 à 35 m. La combinaison de ces deux données est importante :

- la transition sylvicole permet de récolter plus tôt des arbres à cernes beaucoup plus larges (3,4 contre 2 mm pour la génération 1850), ce qui améliore la qualité (chez le Hêtre) et la rentabilité ;

- elle permet d'évoluer vers des peuplements moins hauts, et donc oriente la ressource vers une moindre sensibilité au risque de chablis ; toutefois, pour quantifier précisément ce second avantage, il faudrait tenir compte simultanément de la plus forte prise au vent dans les peuplements fortement éclaircis (Bock *et al.*, 2005) ; plusieurs analyses menées suite à la tempête de 1999 montrent une sensibilité accrue en fonction de la proximité et de l'intensité des coupes (synthèse dans Dhôte, 2005).

Si l'on raisonne au niveau d'un massif, la transition des vieux peuplements denses aux jeunes peuplements fortement éclaircis supposerait que l'on adapte très rapidement les pratiques d'aménagement : sous les hypothèses considérées, la génération 1950 sera mûre en 2040. En pratique, si l'on part en 2000 d'une forêt équilibrée en âges et aménagée à 150 ans, et qu'on souhaite l'amener vers une structure aussi homogène que possible en 2060 (aménagée à 90 ans), il faudrait diminuer l'âge d'exploitabilité de 20 ans tous les 20 ans, et doubler les surfaces mises en régénération pendant la phase de transition. Cette première estimation rudimentaire mérite-

rait d'être affinée, mais elle permet au moins de situer l'importance des efforts à consentir par les gestionnaires.

Les hêtraies ayant été durement touchées par la tempête Lothar, notamment dans le Nord-Est, une étude prospective de la ressource a été réalisée par l'AFOCEL (Deleuze *et al.*, 2002). Ce travail préconisait, pour atténuer le déficit de disponibilité d'ici 2030, de diminuer l'âge moyen des coupes de régénération et d'augmenter les récoltes en coupes d'amélioration. Ces deux conseils correspondent exactement à la situation de transition que nous venons de décrire. On pourrait envisager de prolonger la prospective AFOCEL en exploitant les résultats du présent travail (intensification des coupes d'éclaircies et matérialisation du changement de productivité chez les jeunes générations) et en utilisant le modèle *Fagacées* pour actualiser l'inventaire IFN de la ressource lorraine.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Sur la mesure des changements de productivité

Les tendances mises en évidence sur la croissance en hauteur et la croissance radiale de la strate dominante atteignent un niveau élevé (+ 50 % sur la vitesse de croissance par rapport à 1900). Il est cependant moitié moindre que celui généralement rapporté par la méthode dendro-écologique, appliquée aux futaies de Hêtre du Nord-Est (Badeau *et al.*, 1995). De ce point de vue, une différence importante avec notre étude est que la méthode dendroécologique utilisait la croissance individuelle en surface terrière comme variable de réponse, et la modélisait en fonction de l'âge. La méthode que nous avons utilisée assure un résultat plus stable : le raccourcissement de la durée de production ne dépend pas de l'unité de mesure (diamètre ou surface), lorsque l'effet endogène est basé sur la taille elle-même. Cela nous permet de souligner l'intérêt d'une modélisation appropriée, pour réaliser correctement une séparation, qui demeure délicate, des deux principaux effets en jeu : celui, biologique, du stade de développement des peuplements et la tendance à long terme recherchée.

Des biais liés aux plans d'échantillonnage sont également possibles. À cet égard, la procédure d'échantillonnage fondée sur des couples de peuplements apporte une garantie supplémentaire : elle permet d'éviter une éventuelle liaison entre l'âge des peuplements et la fertilité des stations (au désavantage des plus vieux). La recherche des couples de peuplements d'âges adéquats ayant été basée sur une première inspection visuelle, il est possible que nous ayons introduit un biais tendant à minimiser la tendance séculaire. En effet, les couples comprenant un jeune peuplement à croissance très rapide ou, à l'inverse, un vieux peuplement ayant connu une croissance très lente ont pu être écartés car ne présentant pas, *a priori*, une différence d'âge suffisante. *A posteriori*, on peut cependant constater que l'écart d'âge entre peuplements d'un même couple varie entre 47 et 94 ans avec un maximum de 137 ans, pour un objectif initial de 50 ans et plus (tableau I, p. 126), signe que des situations diverses ont pu être échantillonnées. La comparaison couple à couple des écarts de hauteur entre les deux générations va également dans ce sens (tableau II, p. 127).

Le principe du biais lié à la méthode rétrospective elle-même est exposé dans Dhôte *et al.* (2000). En ce qui concerne la croissance radiale, une étude expérimentale de ce biais a été entreprise, sur des hêtraies observées pendant 90 ans, par Dupouey et Dhôte (2000). Elle a montré que les reclassements sociaux en cours de vie engendrent de légers biais sur l'accroissement (écart entre les 100 plus gros arbres par hectare en fin de révolution et les 100 plus gros à des dates antérieures), dont l'ampleur reste généralement inférieure à 5 %. Concernant la crois-

sance en hauteur, le biais analogue doit être encore plus faible, compte tenu de la plus forte homogénéité de cette variable en futaie régulière.

Enfin, rappelons que les tendances présentées ici valent pour les hêtraies du Nord-Est. Elles ne préjugent pas du niveau de productivité atteint aujourd'hui sur le reste du territoire ni pour d'autres essences, dans un contexte où, en France, le nombre d'études menées en dehors d'un grand quart Nord-Est est encore très restreint [à cet égard, l'étude de Lebourgeois *et al.* (2000) sur la croissance radiale et en hauteur de plantations de Pin laricio dans l'Ouest français est à mentionner].

Pour resituer nos résultats par rapport à d'autres régions européennes, l'étude de Untheim (1996) menée dans les hêtraies du Jura souabe a montré, par la méthode à âge constant, que la hauteur dominante des peuplements de 70 ans était passée de 23 à 26,7 m entre 1923 et 1993, tandis que la croissance radiale était aussi fortement stimulée. Skovsgaard et Henriksen (1996) ont montré, sur deux essais danois de comparaison plantation-régénération naturelle du Hêtre avec connaissance de la génération précédente, que la hauteur dominante ramenée à l'âge de 100 ans avait augmenté de 3,5 à 3,9 m entre la génération 1820-1920 et la génération 1920-1990, et ceci sans effet manifeste de la technique d'installation. Ces résultats sont très proches de celui que nous obtenons.

Il faut encore souligner la nécessité d'intégration d'études sur la densité du bois aux approches sur la productivité, à double but d'étude de changements de la qualité du bois et pour atteindre une évolution de la productivité en biomasse. Les analyses antérieures sur le Chêne sessile (Bergès *et al.*, 2000) ne laissaient pas présager un changement de densité qui puisse modifier les résultats obtenus sur l'évolution de la croissance. Pour compléter nos résultats sur le Hêtre, nous venons également d'effectuer une analyse de la densité du bois, sur la base du même échantillon Nord-Est. Elle conduit à un constat identique.

Rôle de la sylviculture dans les changements de productivité

Dans les discussions sur l'origine des changements de productivité, il a été abondamment question de l'implication de facteurs sylvicoles. Par exemple, Cannell *et al.* (1998), pour des plantations résineuses britanniques en évolution sylvicole rapide entre 1930 et 1970, considéraient que seule une moitié de l'augmentation de productivité pouvait être imputée aux changements environnementaux, le reste étant attribué au progrès technique (matériel génétique, techniques d'installation).

Le contexte sylvicole des hêtraies régulières domaniales de l'Est de la France est resté très stable. La régénération naturelle assure une très forte parenté génétique entre les générations successives, mais aussi entre peuplements sélectionnés à proximité l'un de l'autre. Il n'y a pas eu de façons interventionnistes visant à modifier intentionnellement la fertilité. Il paraît très peu probable que la conduite des régénérations ait évolué entre 1850 et 1930 (dates moyennes de naissance des deux générations) de manière telle que la croissance en hauteur juvénile en ait été affectée ; l'observation des couples de courbes, dans leur phase initiale, confirme cette hypothèse.

Dans les hêtraies, il a été mis en avant qu'une intensification des éclaircies, concernant plus spécialement les jeunes peuplements, aurait pu expliquer une accélération récente de la croissance radiale. Une telle explication ne semble pas devoir s'appliquer au-delà des 20 dernières années (Polge, 1973, 1981). Or la présente étude montre que l'essentiel de l'accélération s'est produit entre 1950 et 1980, et concerne aussi bien les jeunes que les vieux peuplements.

Le fait de disposer, sur un même échantillon, de la croissance en hauteur et diamètre permet de compléter l'argumentation. Il a été bien vérifié que, dans des peuplements réguliers de Hêtre, la hauteur dominante n'est pratiquement pas affectée, dans une large gamme d'intensité des éclaircies. De plus, en cas d'éclaircies très fortes, l'effet attendu serait plutôt inverse de celui que nous constatons (ralentissement léger et temporaire de la croissance en hauteur) : voir l'effet dépressif de surfaces terrières extraordinairement faibles dans l'expérience danoise de Totterup (Bryndum, 1987).

Face à une différence de fertilité entre jeune et vieille générations, on pourrait aussi invoquer l'arrêt de pratiques appauvrissantes anciennes (ramassage du petit bois, prélèvements de litière et de végétation du sous-bois), qui étaient encore courantes au XIX^e siècle en France mais ont disparu progressivement depuis, et qui n'auraient pas laissé de traces visibles, lors de notre échantillonnage, dans le type de station actuel. On aurait alors affaire à un processus de reconstitution progressive de la fertilité, qui ne s'accorde pas très bien avec l'historique irrégulier mis en évidence par les courbes de tendance au cours du XX^e siècle.

Il semble donc qu'aucun facteur sylvicole ne puisse expliquer le changement de croissance observé. De plus, comme les jeunes et les vieux peuplements sont installés sur des stations aujourd'hui identiques, seules des causes exogènes peuvent avoir joué.

Origine environnementale des changements de productivité

La communauté scientifique n'est pas encore parvenue à un consensus suffisant sur le rôle respectif des divers facteurs environnementaux, dans les changements de productivité déjà constatés. Parmi ceux dont l'évolution passée ou future est avérée, trois sont plus particulièrement mis en avant, avec de possibles interactions :

— l'évolution du taux de **CO₂** atmosphérique et celle des **dépôts atmosphériques azotés**, ces deux facteurs jouant un rôle de fertilisant ; les effets physiologiques supplémentaires (fermeture partielle des stomates sous CO₂ élevé) ont en outre un impact sur la consommation d'eau (Tyree et Alexander, 1993) ;

— l'augmentation des **températures** globales, avec des effets positifs ou négatifs via la phénologie, la longueur de la saison de végétation (Fabian et Menzel, 1999 ; Chuine et Beaubien, 2001), le métabolisme général (photosynthèse, respiration) et la dégradation du bilan hydrique (Loustau, 2004).

Compte tenu de la complexité de ce tableau, l'argumentation pour dégager le rôle respectif des facteurs repose simultanément sur des campagnes d'observation spécifiques (régions où l'un des facteurs peut être neutralisé ; Dupouey *et al.*, 1998) et sur des modèles de fonctionnement d'écosystèmes, dont les prédictions sont confrontées aux observations historiques de la productivité forestière. Il y a des progrès réguliers pour la caractérisation des facteurs, l'étude de leurs effets directs et la performance des modèles.

Plusieurs travaux récents, à partir de méthodologies différentes, conduisent à réévaluer à la hausse l'influence probable des dépôts azotés sur la croissance des forêts tempérées européennes. À titre d'illustration, on peut citer :

— le projet Recognition, achevé en 2002, dont on peut retenir le rôle principal qu'auraient pu jouer ces dépôts sur la croissance au XX^e siècle (communiqué de presse paru en août 2002 sur le site du European Forest Institute à l'adresse : www.efi.fi/news/2002/nitro). Ces résultats concernent des essences résineuses sur un gradient latitudinal en Europe du Nord. Ils s'appuient sur des simulations effectuées avec plusieurs modèles de croissance des peuplements à base de

processus écophysologiques, dans lesquels sont introduits les scénarios historiques d'évolution des différents facteurs ;

— des études corrélatives, mettant en relation niveaux de croissance et de dépôts azotés. Pour le Hêtre par exemple, l'étude de Braun *et al.* (1999) conduite dans le nord de la Suisse identifie un lien positif entre dépôts azotés et croissance en diamètre. Il s'agit dans ce cas de mesures réalisées dans un grand nombre de placettes permanentes suivies depuis une vingtaine d'années.

Les données s'améliorent aussi sur le plan climatique. Suite au travail de collecte et d'homogénéisation de séries climatiques longues réalisé par Météo-France, il est aujourd'hui établi que les températures ont connu une augmentation significative au cours du siècle dernier en France, davantage marquée sur les minimales que les maximales (Moisselin *et al.*, 2002), avec pour conséquence un rallongement de la période de végétation. L'évolution de la pluviosité, quant à elle moins évidente, semble plutôt positive.

Parmi les travaux de synthèse, retenons celui de Cannell *et al.* (1998). Deux modèles très complets de fonctionnement d'écosystèmes (Edinburgh Forest Model et Hybrid Model) révélaient un comportement proche pour des plantations d'Épicéa de Sitka en Écosse, lorsqu'il était tenu compte des évolutions connues pour le CO₂, la température et les dépôts azotés. L'augmentation de productivité en volume attendue (Edinburgh Forest Model) était, à âge constant, de 38 % pour la période 1900-1990. Ce chiffre n'est pas trop éloigné de nos résultats.

Notre diagnostic sur l'évolution de la productivité est en phase de systématisation : dans un premier temps au Hêtre dans les secteurs normand et picard dont les analyses sont en cours, puis au Chêne sessile pour lequel un échantillonnage vient d'être réalisé dans quatre régions (Normandie, Val de Loire, Allier et Alsace-Lorraine). S'agissant d'essences résineuses, nous disposons d'un premier échantillon de peuplements d'Épicéa commun dans le Nord-Est. À terme, on aura donc un aperçu plus global sur l'organisation spatiale et la structuration historique de ces tendances. En parallèle à l'acquisition des données de croissance, nous avons généralisé celle de données concernant les facteurs du milieu (analyses de sol, climat). On peut espérer que la confrontation des tendances identifiées avec ces descripteurs écologiques pourra contribuer à mieux cerner certaines influences, dans le cadre d'un diagnostic spatial étendu.

Conséquences des changements observés pour la sylviculture

Pour réfléchir aux conséquences sylvicoles des changements de productivité, nous avons fait deux hypothèses et choisi une situation particulière.

L'idée que la tendance à long terme calibrée pour la hauteur dominante s'applique à la productivité des peuplements reste une hypothèse à tester. Les importantes bases de données en cours de recueil (méthodes rétrospectives) ou historiques (placettes permanentes mesurées en continu) forment un matériel abondant pour valider le comportement du modèle. *A priori*, nous sommes plutôt confiants quant à la solidité de cette première hypothèse. Ainsi, une analyse préliminaire de la productivité des placettes permanentes en chênaie (Dhôte et Hervé, 2000) avait montré qu'on pouvait faire une estimation directe des changements à long terme à l'échelle du peuplement. De plus, il est encourageant d'observer ici un même taux d'accélération pour le diamètre et la hauteur, ainsi que des historiques relativement concordants.

La seconde hypothèse consiste à dire que la productivité va se maintenir à son niveau actuel au cours du XXI^e siècle. Il est aujourd'hui difficile de dire si cette spéculation pêche par optimisme, ou par prudence, ou est raisonnable.

Répondre à cette question suppose :

- d'y voir plus clair sur le mécanisme des causes à l'œuvre pendant le siècle écoulé (voir paragraphe précédent) ;
- de disposer de scénarios réalistes pour l'évolution future de ces facteurs ;
- d'être capable d'anticiper la réponse des écosystèmes à ces scénarios.

Les équipes françaises associées dans le projet CARBOFOR (Loustau, 2004) viennent de proposer de telles simulations, en combinant des scénarios de changement climatique et des modèles à base écophysologique. Pour les forêts du Nord de la France (hêtraies et chênaies, modèle CASTANEA : Dufrene *et al.*, 2005), elles prévoient une poursuite de l'augmentation de la production ligneuse d'ici 2100, plus accentuée dans le Nord-Est que dans le Nord-Ouest. Ces projections sont cependant basées sur des évolutions du climat moyen, et ne tiennent pas compte de la possible augmentation, en fréquence comme en intensité, des événements climatiques extrêmes qui pourraient bouleverser ces tendances.

Enfin, la situation particulière qui a servi d'exemple était une station fertile et nos prédictions valent pour les hêtraies du Nord-Est. Il serait hasardeux d'extrapoler à d'autres régions ou à d'autres stations les valeurs brutes d'âges d'exploitabilité que nous mentionnons. Cela dit, étant donné la forme du modèle et son interprétation (le changement de productivité s'apparente à une contraction du temps, il est identique quelle que soit la fertilité), on peut généraliser aux hêtraies du Nord-Est les conclusions qualitatives de l'étude. Les forestiers doivent se préparer à une réduction de l'âge d'exploitabilité des hêtraies, à critères inchangés. Cette réduction sera très forte (jusqu'à 40 %) et la transition très rapide (entre 2000 et 2050) s'ils mettent réellement en œuvre, dans les perchis et jeunes futaies, les régimes d'éclaircies fortes actuellement recommandés. Une adaptation drastique des hypothèses et pratiques d'aménagement semble aujourd'hui nécessaire, en programmant la transition sur 50 ans.

Même si des inconnues subsistent quant aux scénarios d'évolution, pour le XXI^e siècle, des facteurs environnementaux et de leur effet sur la productivité, une part importante de l'accélération des années 1950-80 est d'ores et déjà capitalisée dans les jeunes futaies en place. Dès lors, on devrait évaluer sérieusement les risques pris si la gestion ne suit pas le rythme constaté sur le terrain (régénérations différées, coupes d'amélioration trop faibles). Dans cette hypothèse, on doit s'attendre à gérer des peuplements très productifs (à un niveau jusqu'ici inconnu), trop denses, dans lesquels par conséquent le diamètre objectif sera atteint tardivement. Dans ce cas, la hauteur moyenne des peuplements évoluera dans une gamme de plus en plus risquée, comme l'a démontré la tempête Lothar (Bock *et al.*, 2005). En un sens, on peut même dire que celle-ci aura un peu relâché la pression, en obligeant à exploiter beaucoup de peuplements âgés. Cependant, les tendances de fond demeurent et devraient devenir un élément majeur de la planification.

Jean-Christophe HERVÉ
Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois
UMR INRA/ENGREF 1092
— Actuellement —
INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
Échelon de Nancy
14, rue Girardet
CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(jcherve@nancy.ifn.fr)

**Jean-Daniel BONTEMPS – Patrick VALLET
Daniel RITTIÉ – Jean-François DHÔTE**
Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois
UMR INRA/ENGREF 1092
14, rue Girardet
CS 14216
F-54042 NANCY CEDEX
(bontemps@engref.fr) (vallet@engref.fr)
(rittié@nancy.inra.fr) (dhôte@nancy.inra.fr)

Jean-Luc DUPOUEY
Écologie et Écophysologie forestières
UMR INRA-UHP 1137
INRA
F-54280 CHAMPENOUX
(dupouey@nancy.inra.fr)

Remerciements

Les auteurs remercient les équipes techniques de l'INRA et de l'Office national des Forêts qui ont contribué à la prospection et au recueil des données nécessaires, en particulier Philippe Dormoy, Thierry Barateau et Claudine Richter. Ils remercient également Pierre Duplat, pour avoir facilité la mise en œuvre du projet et pour ses analyses avisées sur l'ensemble du travail. L'étude a bénéficié d'un soutien financier du GIP-ECOFOR, Convention 99.38 "Productivité des forêts en France".

BIBLIOGRAPHIE

- ASSMANN (E.). — The principles of forest yield study. — Pergamon Press, 1970. — 506 p.
- BADEAU (V.). — Étude dendroécologique du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. — Nancy : Université Henri Poincaré, 1995. — 224 p. + ann. (Thèse de Doctorat).
- 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. 16, n° 5, 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. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Editors. — EFI ; Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 133-148.
- 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.
- 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 nineteenth century. — *Trees*, vol. 14, n° 7, 2000, pp. 398-408.
- BERTALANFFY (L. von). — Théorie générale des systèmes. — Paris : Dunod, 1973. — 296 p.
- BOCK (J.), VINKLER (I.), DUPLAT (P.), RENAUD (J.-P.), BADEAU (V.), DUPOUEY (J.-L.). — Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 2, 2005, pp. 143-158.
- BONTEMPS (J.-D.). — Analyse de la croissance radiale dans des hêtraies régulières du Nord-Est de la France. Évolution de la vitesse de croissance au cours du XX^e siècle. — Nancy : ENGREF, 2002. — 22 p. (Mémoire de DEA Biologie forestière).
- BOURIAUD (O.). — Analyse fonctionnelle de la productivité du Hêtre : influences des conditions de milieu, de la structure du peuplement et du couvert, effets de l'éclaircie. — Nancy : ENGREF, 2003. — 318 p. (Thèse de Doctorat).
- BRAUN (S.), RIHM (B.), SCHINDLER (C.), FLÜCKIGER (W.). — Growth of mature beech in relation to ozone and nitrogen deposition : an epidemiological approach. — *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 116, n° 1-2, 1999, pp. 357-364.
- BRYNDUM (H.). — Buchendurchforstungsversuche in Dänemark. — *Allgemeine Forst- u. Jagd-Zeitung*, vol. 158, n° 7-8, 1987, pp. 115-121.
- CANNELL (M.G.R.). — Relative importance of increasing atmospheric CO₂, N deposition and temperature in promoting European forest growth. *In* : Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe / T. Karjalainen, H. Spiecker, O. Laroussinie Editors. — EFI Proceedings, n° 27, 1999, pp. 25-41.
- CANNELL (M.G.R.), THORNLEY (J.H.M.), MOBBS (D.C.), FRIEND (A.D.). — UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO₂ and temperature. — *Forestry*, vol. 71, n° 4, 1998, pp. 277-296.
- CHUINE (I.), BEAUBIEN (E.). — Phenology is a major determinant of temperate tree distributions. — *Ecology Letters*, vol. 4, n° 5, 2001, pp. 500-510.
- COLIGNY (F. de), ANCELIN (P.), CORNU (G.), COURBAUD (B.), DREYFUS (P.), GOREAUD (F.), GOURLET-FLEURY (S.), MEREDIEU (C.), ORAZIO (C.), SAINT-ANDRÉ (L.). — 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. — 2004. — pp. 371-380.

- DELEUZE (C.). — Pour une dendrométrie fonctionnelle : essai sur l'intégration de connaissances éco-physiologiques dans les modèles de la production ligneuse. — Lyon : Université Lyon-I, 1996. — 305 p. (Thèse de Doctorat).
- DELEUZE (C.), THIVOLLE-CAZAT (A.), PAIN (O.), SERGENT (Y.). — Étude ressource - Le Hêtre en Lorraine après la tempête de 1999. Rapport 1^{er} tranche Contrat DRAF-Lorraine. — Charrey-sur-Saône (France) : AFOCEL, 1999. — 69 p.
- DHÔTE (J.-F.). — Définition de scénarios d'éclaircie pour le Hêtre et le Chêne. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 106-110.
- DHÔTE (J.-F.). — Hypotheses about competition for light and water in even-aged common beech (*Fagus sylvatica* L.). — *Forest Ecology and Management*, vol. 69, n° 1-3, 1994, pp. 219-232.
- DHÔTE (J.-F.). — Implications of forest diversity for the resistance to strong winds. In : *Forest Diversity and Function : Temperate and Boreal Systems* / M. Scherer-Lorenzen, Ch. Körner, E.D. Schulze Editors. — Berlin : Springer Verlag, 2005. — pp. 291-307 (Ecological Studies ; 176).
- DHÔTE (J.-F.), DUPOUEY (J.-L.), BERGÈS (L.). — Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises. — *Revue forestière française*, vol. LII, n° spécial "Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture", 2000, pp. 37-48.
- DHÔTE (J.-F.), HERCÉ (E. de). — Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre. — *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1994, pp. 1782-1790.
- 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, n° 7, 2000, pp. 651-680.
- DUFRENE (E.), DAVI (H.), FRANÇOIS (C.), LE MAIRE (G.), LE DANTEC (V.), GRANIER (A.). — Modelling carbon and water cycles in a Beech forest. Part I : model description and uncertainty analysis on modelled NEE. — À paraître dans *Ecological Modelling*, 2005.
- DUPLAT (P.), ROMAN-AMAT (B.). — Sylviculture du Hêtre. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 31, 1996, pp. 29-33.
- 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, n° 7, 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.), DHÔTE (J.-F.). — Impact des changements de statut social sur l'estimation des tendances à long terme de la croissance radiale. pp. 34-45. In : 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 / J.-C. Hervé, J.-F. Dhôte, J.-L. Dupouey. — Rapport final Contrat GIP ECOFOR-INRA n° 99.38. — Nancy : INRA, 2000. — 45 p.
- ELFVING (B.), NYSTROM (K.). — Yield capacity of planted *Picea abies* in northern Sweden. — *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 11, 1996, pp. 38-49.
- ELFVING (B.), TEGNHAMMAR (L.). — Trends of tree growth in Swedish forests 1953-1992. An analysis based on sample trees from the National Forest Inventory. — *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 11, n° 1, 1996, pp. 26-37.
- FABIAN (P.), MENZEL (A.). — Changes in phenology of trees in Europe. In : *Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe* / T. Karjalainen, H. Spiecker, O. Laroussinie Editors. — EFI Proceedings, 27, 1999, pp. 43-51.
- GILBERT (J.-M.), CHEVALIER (R.). — Relations milieu-production du Pin laricio. Étude de la croissance en hauteur. — *Informations techniques du CEMAGREF*, 96, note 2, 1994, pp. 1-8.
- GLATZEL (G.). — Historic forest use and its possible implications to recently accelerated forest growth in Central Europe. In : *Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe* / T. Karjalainen, H. Spiecker, O. Laroussinie Editors. — EFI Proceedings, 27, 1999, pp. 65-74.
- HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.), DUPOUEY (J.-L.). — 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. — Nancy : INRA, 2000. — 45 p.

- HERVÉ (J.-C.), DHÔTE (J.-F.), DUPOUEY (J.-L.). — Évolution de la vitesse de croissance en hauteur dominante au cours du XX^e siècle dans les hêtraies régulières du Nord-Est. pp. 1-33. *In* : 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 / J.-C. Hervé, J.-F. Dhôte, J.-L. Dupouey. — Rapport final Contrat GIP ECOFOR-INRA n° 99.38. — Nancy : INRA, 2000. — 45 p.
- KARJALAINEN (T.), SPIECKER (H.), LAROUSSINIE (O.) Editors. — Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe. — *European Forest Institute Proceedings*, 27, 1999, 286 p.
- LANNER (R.M.). — On the insensitivity of height growth to spacing. — *Forest Ecology and Management*, vol. 13, 1985, pp. 143-148.
- 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, n° 5, 2000, pp. 712-724.
- LOUSTAU (D.) Éd. . — Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisaton, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final Projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" et Convention GIP ECOFOR n° 3/2001. — Bordeaux-Pierroton : INRA, juin 2004. — 137 p. À paraître.
- MACFARLANE (D.W.), GREEN (E.J.), BURKHART (H.E.). — Population density influences assessment and application of site index. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 30, n° 9, 2000, pp. 1472-1475.
- MENG (F.-R.), MENG (C.H.), TANG (S.), ARP (P.A.). — A new height growth model for dominant and codominant trees. — *Forest Science*, vol. 43, n° 3, 1997, pp. 348-354.
- MEREDIEU (C.). — Croissance et production du Pin laricio (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* (Poiret) Maire) : élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la prévision de caractéristiques des arbres et du bois. — Université Claude Bernard, Lyon-1, 1998. — 250 p. + annexes (Thèse de Doctorat).
- MOISSELIN (J.-M.), SCHNEIDER (M.), CANELLAS (C.), MESTRE (O.). — Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. — *La Météorologie*, n° 38, 2002, pp. 45-56.
- OSWALD (H.). — Silviculture of oak and beech high forests in France. *In* : Broadleaves in Britain / D.C. Malcolm, J. Evans, P.N. Edwards Editors. — Loughborough (UK), 1982. — pp. 31-39.
- PICARD (J.-F.). — Évolution de la croissance radiale du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant lorrain. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 52, 1995, pp. 11-21.
- POLGE (H.). — État actuel des recherches sur la qualité du bois de Hêtre. — *Bulletin technique de l'ONF*, n° 4, 1973, pp. 13-22.
- POLGE (H.). — Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du Hêtre. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, n° 4, 1981, pp. 407-423.
- PRETZSCH (H.). — Waldwachstum im Wandel. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 118, 1999, pp. 228-250.
- REINEKE (L.H.). — Perfecting a stand density index for even-aged forests. — *Journal of Agricultural Research*, 46, 1933, pp. 627-638.
- 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 Editors. — EFI ; Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 89-98.
- SPIECKER (H.), MIELIKÄINEN (K.), KÖHL (M.), SKOVSGAARD (J.P.). — Growth trends in european forests. — EFI ; Berlin : Springer Verlag, 1996. — 372 p.
- STERBA (H.). — Forest decline and increasing increments : a simulation study. — *Forestry*, vol. 68, n° 2, 1995, pp. 153-163.
- THORNLEY (J.H.M.). — Mathematical models in plant physiology. — London (UK) : Academic Press, 1976. — 318 p.
- TYREE (M.T.), ALEXANDER (J.D.). — Plant water relations and the effect of elevated CO₂ : a review and suggestions for future research. — *Vegetatio*, vol. 104-105, n° 1, 1993, pp. 47-62.
- UNTHEIM (H.). — Has site productivity changed ? A case study in the eastern Swabian Alb, Germany. *In* : Growth trends in european forests / H. Spiecker, M. Köhl, J.P. Skovsgaard Editors. — EFI ; Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 133-148.
- VALENTINE (H.T.). — Tree-growth models : derivations employing the pipe-model theory. — *J. theor. Biol.*, 117, 1985, pp. 579-585.

**DES HÊTRAIES QUI POUSSENT DE PLUS EN PLUS VITE : VERS UNE FORTE DIMINUTION DE LEUR ÂGE D'EXPLOITABILITÉ ?
(Résumé)**

L'article relate une étude des changements de productivité intervenus dans les hêtraies régulières du Nord-Est de la France entre 1900 et 2000. L'étude est basée sur la comparaison rétrospective de la croissance de deux générations, structurées en 14 couples de peuplements associant un jeune et un vieux, séparés par 75 ans en moyenne et situés à proximité l'un de l'autre, dans la même forêt sur la même station. Dans chaque peuplement, trois arbres dominants ont été abattus, dont la croissance en hauteur a été reconstituée par analyse de tige et la croissance radiale mesurée à 1,30 m. La jeune génération a connu une croissance nettement supérieure, la hauteur dominante à 65 ans surclassant de plus de 4 m celle des vieux peuplements adjacents. Une modélisation originale des données a permis d'estimer la courbe de tendance de l'accroissement au cours du XX^e siècle. Il apparaît que l'essentiel de l'accélération s'est produit entre 1950 et 1980. Intégrée dans le simulateur de croissance de peuplements forestiers *Fagacées*, cette tendance a été utilisée pour comparer deux régimes d'éclaircies, appliqués à deux générations nées en 1850 et 1950. Les simulations montrent une très forte réduction de l'âge d'exploitabilité, pour un même diamètre dominant-objectif de 60 cm : sur station équivalente, la vieille génération conduite en éclaircies faibles est mûre à 150 ans, contre 90 ans pour la jeune ayant subi des éclaircies fortes.

INCREASINGLY RAPID BEECH GROWTH – CAN OPTIMAL HARVEST AGE BE SIGNIFICANTLY REDUCED ? (Abstract)

The article describes a study on changes in productivity in even-aged beech groves located in North Eastern France between 1900 and 2000. The study is based on a retrospective comparison of growth of two generations, structured as 14 pairs of stands that combine a young and an old, 75 years apart on average and located close to one another in the same forests and site types. Three dominant trees were felled in each of these stands. Their growth was reconstructed by analysing the stem and measuring radial increments at 1.3 metres. Growth of the young generation was significantly higher, with dominant height at the age of 65 considerably outperforming (by more than 4 m) the old, adjacent stands. A unique model was used to estimate a regression curve for incremental growth during the 20th century. It would seem that the acceleration occurred essentially between 1950 and 1980. This trend was incorporated into the *Fagacées* forest stand growth simulator and used to compare two thinning schemes applied to two generations born in 1850 and 1950. The simulations show a very considerable decrease in optimal harvest age for a given target dominant diameter (60 cm). At equivalent sites, the old generation treated under the moderate thinning scheme was mature at 150 years of age, as against 90 years for the young generation that had undergone heavy thinning.
