



**HAL**  
open science

## Evolution de la productivité des hêtraies régulières du Nord de la France au cours du XXe siècle

Jean-Daniel Bontemps, Jean-Christophe Hervé, Jean-François Dhôte

► **To cite this version:**

Jean-Daniel Bontemps, Jean-Christophe Hervé, Jean-François Dhôte. Evolution de la productivité des hêtraies régulières du Nord de la France au cours du XXe siècle. Séminaire de l'Ecole Doctorale RP2E, Jan 2005, Nancy, France. pp.107-114. hal-00816231

**HAL Id: hal-00816231**

**<https://hal.science/hal-00816231>**

Submitted on 20 Apr 2013

**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.

## EVOLUTION DE LA PRODUCTIVITE DES HETRAIES REGULIERES DU NORD DE LA FRANCE AU COURS DU XX<sup>E</sup> SIECLE

J.-D. Bontemps, J.-C. Hervé, J.-F. Dhôte

Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (UMR 1092 INRA-ENGREF),  
14 rue Girardet, 54000 Nancy

**Résumé.** Le thème de l'évolution de la productivité des forêts est abordé dans le contexte de la hêtraie, conduite en futaie régulière dans sa zone de production (moitié Nord de la France). L'étude se fonde sur des données rétrospectives de croissance en hauteur dominante et de croissance radiale. La croissance de deux générations de peuplements, associés en couples de même fertilité, est comparée puis modélisée, de façon à extraire le signal à long-terme recherché. On discute ensuite l'amplitude de cette évolution, et les facteurs environnementaux qui peuvent en être à l'origine.

### PROBLEMATIQUE

On entend par productivité au sens forestier, la production courante en volume d'un peuplement [1]. La détection d'une évolution de la productivité forestière n'est possible que si l'on dispose de données sur la croissance présente et passée des peuplements. Trois sources de données peuvent être utilisées à cette fin (Spiecker, dans [2]). Les deux premières reposent sur des archives déjà constituées, en provenance des inventaires forestiers nationaux, ou des réseaux de placettes permanentes de suivi de la production des organismes de recherche et/ou de gestion forestière. Une troisième solution consiste à reconstituer rétrospectivement la croissance des peuplements, c'est à dire à acquérir les données *in situ*, en se fondant sur le fait que la croissance de chaque arbre est mémorisée dans les cernes de croissance. C'est sur cette dernière que reposent nos investigations. La production en volume n'est pas une grandeur aisément accessible (y compris avec les deux premières sources de données mentionnées), et on s'intéresse en pratique aux différentes composantes de la croissance.

Bien qu'étant par définition de même génération, dans un peuplement dit « régulier », les arbres se différencient progressivement selon leur statut social. Certains, plus hauts et plus gros que les autres sont appelés arbres dominants. En France, on définit alors la hauteur dominante comme la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare. Pour un peuplement régulier, la hauteur d'un peuplement est un bon indicateur de sa production (loi de Eichhorn, [3]) : elle présente l'avantage de ne pas dépendre de la densité du peuplement □ donc de la sylviculture □ dans des gammes de densité larges [4]. Ce deuxième aspect est à prendre en considération, dans l'hypothèse où une intensification des pratiques sylvicoles pourrait venir gêner la détection du signal recherché. La croissance en hauteur dominante constitue donc une variable d'étude privilégiée. Afin de vérifier si les tendances observées valent pour la croissance en volume, on s'est également intéressé à la croissance radiale dominante, à hauteur de 1.30m, conventionnelle en foresterie.

## DONNEES ANALYSÉES

### 1. Stratégie d'échantillonnage

La croissance d'un peuplement est un phénomène dépendant largement de son âge. Quand une modification positive de la productivité a lieu, elle se traduit par une déformation progressive des courbes de croissance vers le haut. La date est le support temporel de ce second phénomène historique. Au sens statistique, le problème fondamental de la détection d'une dérive à long-terme repose donc sur la séparation correcte de deux effets jouant dans le même sens sur la croissance, l'âge et la date.

La solution développée par Hervé & al. [5] repose sur la constitution de couples de peuplements de générations différentes, avec un écart d'âge suffisant pour bien séparer âge et date (en pratique d'environ 70 ans), et croissant sur une station de même fertilité. La similarité des stations a été appréciée sur la base des facteurs permanents de la production : topographie, exposition, type de sol, en incluant des relevés floristiques, humiques et pédologiques.

Dans chaque peuplement, on a installé une placette circulaire de 6 ares, dans laquelle 3 arbres dominants (les 1<sup>er</sup>, 3<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> plus gros, sur la base de leur diamètre à 1,30m) ont été échantillonnés. Ainsi définie, la procédure garantit un échantillonnage sans biais de la strate dominante [6].

### 2. Mesures réalisées

En pratique, la croissance en hauteur d'un arbre peut être reconstituée par la technique de l'analyse de tige, qui consiste à effectuer des comptages de cernes sur des rondelles prélevées tout au long de la tige, à des hauteurs fixées à l'avance. Cette approche est destructrice. On sait alors le nombre d'années qui se sont écoulées entre chaque découpe, et en inversant les données, on obtient la courbe de croissance âge - hauteur. S'agissant de la croissance radiale, on procède à des lectures de largeurs de cernes sur banc optique, sur la base de la rondelle à 1.30m.

Des courbes moyennes de croissance en hauteur dominante et en rayon ont ensuite été calculées sur les profils des 3 arbres échantillonnés dans chaque placette.

### 3. Régions d'étude □ échantillons constitués

L'un des objectifs étant d'identifier une éventuelle variabilité du phénomène recherché dans l'espace, l'approche a été régionalisée. Deux régions d'étude ont donc été prospectées : un secteur Nord-Est, comprenant la plaine de Lorraine et les Vosges, dans un triangle Bâle □ Langres □ Sarreguemines, et un secteur atlantique, en Haute-Normandie et Picardie, dans un triangle Paris □ Le Havre □ Arras. Dans chacune d'elles, 14 et 15 couples ont été respectivement constitués, en se restreignant aux seules forêts domaniales, l'idée étant de s'assurer d'une certaine ancienneté et régularité du régime de gestion en futaie régulière. Les principales caractéristiques de ces peuplements sont présentées aux tableaux 1 et 2. En ce qui concerne la croissance radiale dominante, elle n'a pu être analysée que dans la seule la région Nord-Est.

Tableau 1. Principales caractéristiques de l'échantillon atlantique. <sup>1</sup> Coordonnées géographiques dans le système ED50. <sup>2</sup> Age (en années) atteint en 1998 pour les vieux peuplements et en 2003 pour les jeunes. <sup>3</sup> L'écart de hauteur (en m) est la différence entre la hauteur finale atteinte par le jeune peuplement et la hauteur du vieux peuplement du même couple au même âge.

Forêt	Département	Localisation <sup>1</sup>		Age <sup>2</sup>		Ecart d'âge	Ecart de hauteur <sup>3</sup> Jeune □ Vieux
		Nord	Est	Jeune	Vieux		
Compiègne	60	2°55'	49°24'	69	110	41	-0,7
Compiègne	60	2°53'	49°23'	70	144	74	0,9
Compiègne	60	2°57'	49°21'	58	143	85	4,3
Compiègne	60	2°53'	49°19'	74	164	90	5,1
Halatte	60	2°39'	49°17'	49	125	76	0,7
Lyons	27	1°29'	49°23'	98	199	101	3,2
Lyons	27	1°35'	49°27'	95	177	82	0,9
Brotonne	76	0°44'	49°26'	81	146	65	2,8
Brotonne	76	0°40'	49°25'	65	133	68	1,5
Brotonne	76	0°44'	49°27'	140	175	35	-2,4
Verte	76	1°07'	49°30'	88	142	54	4
Eawy	76	1°18'	49°42'	54	136	82	3,2
Arques	76	1°12'	49°53'	51	126	75	5,3
Eu	76	1°33'	49°55'	104	170	66	1,8
Crécy	80	1°50'	50°15'	117	151	34	2,4
<b>Moyenne</b>				80,9	149,4	68,5	2,2
<b>Ecart-type</b>				26,2	23,6	20,0	2,1

Tableau 2. Principales caractéristiques de l'échantillon Nord-Est. <sup>1,3</sup> idem. <sup>2</sup> Age atteint en 1998.

Forêt	Département	Localisation <sup>1</sup>		Age <sup>2</sup>		Ecart d'âge	Ecart de hauteur <sup>3</sup> Jeune □ Vieux
		Nord	Est	Jeune	Vieux		
Haye	54	6° 05'	48° 40'	71	135	64	5,9
Haye	54	6° 05'	48° 40'	65	136	71	5,2
Haye	54	6° 05'	48° 40'	57	142	85	2,2
Sarrebourg	57	7° 00'	48° 44'	52	108	56	3,6
Hesse	57	7° 04'	48° 41'	62	156	94	11,8
Lemberg	57	7° 19'	49° 00'	83	141	58	7,5
Mouterhouse	57	7° 27'	49° 01'	52	131	79	3,5
Goendersberg	57	7° 26'	49° 06'	33-46	183	137	7,3
Morimond	52	5° 42'	48° 03'	55	123	68	2,8
La Petite Pierre	67	7° 19'	48° 54'	38	121	83	6,9
FC Fislis	68	7° 22'	47° 30'	89	168	79	7,1
Ban d'Uxegney	88	6° 24'	48° 09'	74	121	47	2,4
Sainte Hélène	88	6° 40'	48° 18'	64	130	66	6,0
Fraize	88	6° 23'	48° 20'	83	152	69	3,1
<b>Moyenne</b>				63,6	139,1	75,4	5,4
<b>Ecart-type</b>				15	20,2	21,7	2,7

## MODELISATION DU CHANGEMENT DE PRODUCTIVITÉ

### 1. Modèle de croissance en hauteur

La construction du modèle est exposée en détails dans [5]. On modélise classiquement l'accroissement en hauteur en fonction de la hauteur elle-même :

$$\Delta H = S \cdot f_H(H) \Delta t \quad (1)$$

où  $S$  est un paramètre dépendant de la fertilité de la station, et  $f_H$  un modèle de croissance classique, rendant compte de l'effet du stade de développement du peuplement sur la croissance. Parmi plusieurs formes de croissances testées lors de l'ajustement du modèle sur chacun des deux jeux de données, nous avons retenu l'équation de Lundqvist-Matèrn (proposée en 1939 et redécouverte par Lundqvist, [7]). L'hypothèse de l'existence d'un changement de productivité conduit ensuite à introduire un effet de la date :

$$\Delta H = g_H(date) \cdot S \cdot f_H(H) \Delta t \quad (2)$$

où  $g_H$  peut prendre diverses formes : par exemple linéaire, quadratique (pour une tendance accélérée) ou spline cubique (pour rendre compte de fluctuations de la tendance), mais a toujours pour propriété de valoir 1 en 1900. Cette dernière forme s'est dans chaque cas révélée la plus appropriée. La tendance apparaît comme un facteur multiplicatif de la vitesse de croissance et en particulier de l'indice de fertilité. Cela suggère donc un effet relativement simple du changement de productivité (au sens où la forme de la courbe n'est pas modifiée). Cette hypothèse n'a pas été remise en cause lors des ajustements.

### 2. Modèle de croissance radiale

Sur le même principe, on écrit le modèle suivant :

$$\Delta R = LC = g_R(date) \cdot S' \cdot f_R(R) \quad (3)$$

où  $R$  désigne le rayon, les accroissements sont cette fois annuels (et correspondent aux largeurs de cernes  $LC$ ,  $\Delta t = 1$ ),  $g_R$  est un effet de la date, de même nature que pour la modélisation de la croissance en hauteur,  $f_R$  est une fonction de croissance appropriée, et  $S'$  est un paramètre lié à la fertilité de la station. La fonction de croissance qui s'est révélée ici la plus appropriée est de la forme :

$$S' f_R(R) = S' \frac{R^b}{(R+c)}$$

où  $b$  et  $c$  sont des paramètres.

### 3. Cadre de modélisation

D'un point de vue statistique on s'est placé dans le cadre des modèles non-linéaires à effets aléatoires (les fonctions  $f$  sont non-linéaires et les effets aléatoires rendent compte

des différences entre couples : fertilité, climat). L'ajustement repose sur la maximisation de la log-vraisemblance.

Les données de croissance radiale ont une résolution annuelle, et le modèle a pu être ajusté tel que présenté en (3). Concernant la croissance en hauteur, l'analyse de tige fournit des données à résolution pluri-annuelle (couramment 7 à 10 ans). L'ajustement sur des accroissements en hauteur suppose donc une intégration préalable de l'équation (2) par rapport au temps. Au total, on disposait respectivement de 363 et 393 accroissements en hauteur dominante dans les régions Nord-Est et atlantique, et de 2592 accroissements annuels en largeur de cerne (région Nord-Est).

## RESULTATS

### 1. Croissance en hauteur dominante

Une première comparaison brute entre les hauteurs finales atteintes par les jeunes peuplements, et celles des vieux peuplements qui leur sont appariés lorsqu'ils avaient le même âge, se révèle systématiquement en faveur de la jeune génération, plus haute en moyenne de 5.4m dans le Nord-Est ( $p < 10^{-4}$ ) et de 2.2m dans le secteur atlantique ( $p = 7 \cdot 10^{-4}$ ) (voir tableaux 1 et 2). On met donc en évidence une évolution positive de la croissance en hauteur dominante dans ces deux régions, qui semble plus élevée dans le Nord-Est cependant.

Les courbes de tendance issues de la modélisation (voir figures 1 et 2) confirment qu'une dérive positive est venue affecter progressivement la croissance en hauteur des hêtraies régulières au cours du siècle dernier, et ce dans les deux régions échantillonnées. Le caractère irrégulier de cette évolution est perceptible. D'abord faible, elle se traduit ensuite par une nette accélération de la croissance, dès la seconde moitié du siècle. De façon remarquable, le phénomène est commun aux deux régions. Son amplitude est cependant bien différente : alors que l'augmentation de la vitesse de croissance se situe à un niveau proche de 50% dans le Nord-Est (effet date au niveau de 1.5), elle ne dépasse pas 30% dans le secteur atlantique. On remarque par ailleurs deux ralentissements plus ponctuels mais importants, dans les années 1940 et 1990. Ces périodes ont été particulières du point de vue climatique, avec des successions exceptionnelles d'été secs (la décennie 1990 a été la plus chaude du siècle), et expliquent probablement les inflexions observées.

### 2. Croissance radiale dominante dans le Nord-Est

De façon similaire, la croissance radiale de la strate dominante a été affectée par une évolution positive au siècle dernier, qui atteint un niveau de 50% (voir figure 3). On remarque les mêmes ralentissements des années 1940 et 1990, et une inflexion secondaire dans les années 1970.

Cette augmentation de la vitesse de croissance radiale s'est cependant effectuée différemment, puisqu'on identifie dans ce cas deux phases d'augmentation de même ampleur, d'abord sur la période 1900-1930, puis à nouveau dès la seconde moitié du siècle.

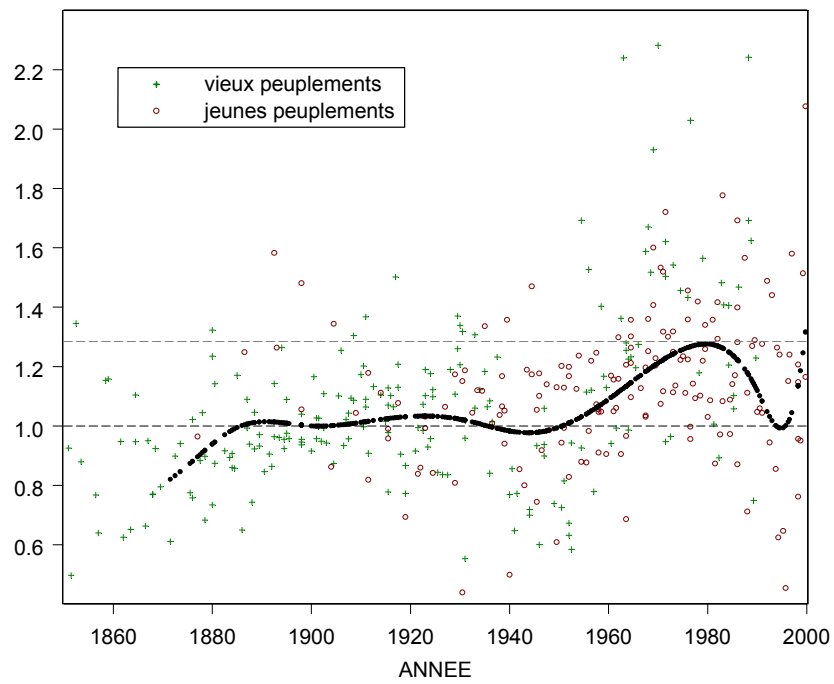


Figure 1. Evolution de la croissance en hauteur dominante dans le secteur atlantique, modélisée par une fonction spline cubique

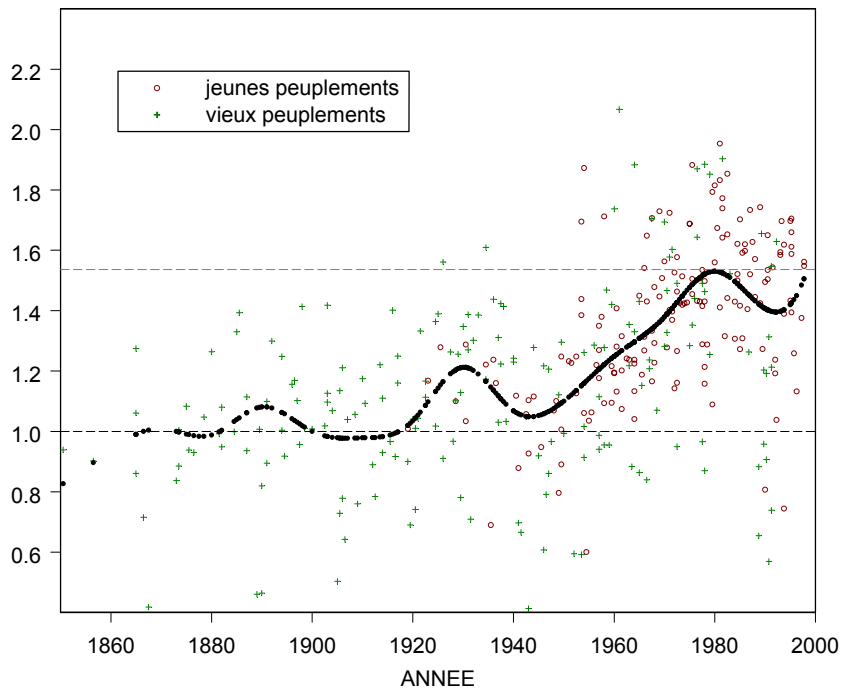


Figure 2. Evolution de la croissance en hauteur dominante dans le secteur Nord-Est

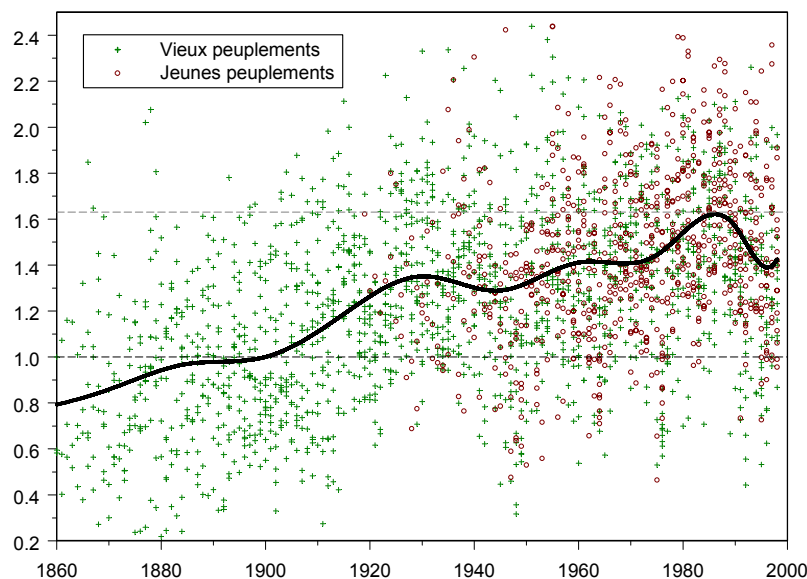


Figure 3. Evolution de la croissance radiale dominante dans le secteur Nord-Est, modélisée par une fonction spline cubique

## DISCUSSION

Au cours de la dernière décennie, le thème des changements de productivité des peuplements forestiers a fait l'objet de nombreux travaux en Europe, concluant généralement dans le sens d'une hausse de la productivité (voir [2]). De telles études ont été conduites en France, majoritairement dans le quart Nord-Est du pays et plus rarement dans la région Centre (une synthèse de résultats est donnée dans Dhôte & al. [1]). Elles ont révélé des tendances semblables, atteignant des niveaux souvent spectaculaires. Ces résultats ont suscité des interrogations sur l'aptitude des méthodes usuellement mises en œuvre à pouvoir séparer correctement les différents effets, et ont conduit à se replacer dans un cadre méthodologique plus rigoureux (par exemple, [8]). C'est donc dans un double contexte que se replacent nos études : asseoir un diagnostic précis, non seulement sur l'existence d'une évolution de la productivité, mais aussi sur l'ampleur du phénomène au plan quantitatif, et systématiser le diagnostic à l'échelle du territoire, en sortant du seul contexte Nord-Est. De ce point de vue, il est manifeste que la productivité des hêtraies régulières du Nord du pays a fortement évolué, et de façon inégale sur le territoire. Le sens des chiffres annoncés doit être précisé : le niveau atteint par l'effet date s'interprète exclusivement en terme de temps gagné pour atteindre une même taille (voir équation (2)). Dans le Nord-Est par exemple, le chiffre de 50% (indice 1.5) signifie qu'un arbre né en 2000 nécessitera un tiers de temps en moins, pour atteindre un même stade, que s'il s'était développé dans les conditions qui prévalaient en 1900. (Dans le secteur atlantique, si l'on s'en tient au niveau atteint en fin de décennie 1980, ce temps est raccourci de 20%). Les tendances identifiées sur la



croissance radiale et en hauteur dans le Nord-Est sont comparables, et semblent donc indiquer que la productivité en volume a pu connaître une telle évolution. Ces chiffres sont considérables, et situent l'enjeu de cette évolution de la productivité pour l'aménagement forestier, avec un raccourcissement important des périodes de révolution en perspective.

Au rang des facteurs écologiques qui ont été invoqués pour expliquer ce phénomène, se trouvent l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique, les dépôts atmosphériques azotés (d'origine urbaine, industrielle et agricole) et l'augmentation des températures ([9], et en particulier la contribution de Cannell). On ne peut exclure que l'évolution du taux de CO<sub>2</sub> depuis le XIX<sup>e</sup> siècle ait certainement eu une influence. La croissance en hauteur dominante n'a cependant évolué significativement qu'à partir des années 1950, suggérant que d'autres facteurs de blocage ont pu être à l'œuvre. La forte différence que nous constatons par ailleurs entre nos deux régions plaide aussi en faveur de facteurs d'ordre régional, au rang desquels les dépôts azotés. De façon générale, ces derniers sont bien plus élevés dans le Nord-Est français et sur les massifs montagneux, que dans l'Ouest, et en particulier le second secteur échantillonné ([10], rapport sur le réseau français de suivi RENECOFOR). Ils ont peut-être permis de lever progressivement une contrainte de nature trophique, ce qui est plausible dans les milieux de contexte forestier. Nous sommes plus réservés quant à l'influence que l'augmentation globale des températures a pu avoir. Les chronologies d'évolution de la température moyenne à l'échelle mondiale (Rapport du Giec de 2001, [11]) et du territoire français (données Météo-France, [12]) sont remarquablement proches, et concordent sur le fait que ce paramètre est resté stable sur la période 1950-1980 en particulier. Or c'est précisément dans cet intervalle qu'a lieu l'essentiel de l'augmentation de productivité. Enfin, l'hypothèse d'une augmentation de la durée de végétation annuelle par la remontée des températures minimales est souvent évoquée comme une cause possible du phénomène. Mais on constate là encore que les températures minimales ont davantage augmenté dans l'Ouest français que dans l'Est [12], ce qui vient à l'encontre de nos observations.

## REFERENCES

- [1] Dhôte, J.-F., Dupouey, J.-L., Bergès, L., Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises, *Revue Forestière Française*, LII, numéro spécial (2000), 37-48
- [2] Spiecker, H., Mielikainen, K., Köhl, M., Skovsgaard, J. P., Growth trends in european forests, *European Forest Institute Research Report n° 5*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 89-97, (1996)
- [3] Eichhorn, F., Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 80 (1904), 45-49
- [4] Lanner, R. M., On the insensitivity of height growth to spacing, *Forest Ecology and Management*, 13 (1985), 143-148
- [5] Hervé, J.-C., Dhôte, J.-F., Dupouey, J.-L., Evolution de la vitesse de croissance en hauteur dominante au cours du XX<sup>e</sup> siècle dans les hêtraies régulières du Nord-Est, *Rapport de convention ECOFOR/INRA 99.38*, 33 p, (2000)
- [6] 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*, 54 (1997), 611-634
- [7] Lundqvist, B., On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden, *Medd. Fran Statens Skogforsk. Band*, 47 (1957), 64 p
- [8] Dupouey, J.-L., Denis, J.-B., Becker, M., A new method of standardization for examining long term trends in tree-ring chronologies, *Lundqua Report 34*, 85-88, Lund University, Sweden (1992)
- [9] Karjalainen, T., Spiecker, H., Laroussinie, O., Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe, *European Forest Institute Proceedings n° 27*, 157-169, (1999)
- [10] Croisé, L., Ulrich, E., Duplat, P., JAQUET, O., RENECOFOR - Deux approches indépendantes pour l'estimation et la cartographie des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier sur le territoire français, *Rapport RENECOFOR*, ONF, 102p, (2002)
- [11] GIEC, Groupe International d'Experts sur le Climat, Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques, *Rapport du groupe de travail I*, 92 p, (2001)
- [12] Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., Mestre, O., Les changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations, *La Météorologie*, 38 (2002), 45-56