



HAL
open science

Effet des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulière de Hêtre ou de Chêne sessile.

Jean-François Dhôte

► **To cite this version:**

Jean-François Dhôte. Effet des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulière de Hêtre ou de Chêne sessile.. *Revue forestière française*, 1997, 49 (6), pp.557-578. 10.4267/2042/5655 . hal-03444072

HAL Id: hal-03444072

<https://hal.science/hal-03444072>

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.

technique et forêt

EFFETS DES ÉCLAIRCIES SUR LE DIAMÈTRE DOMINANT DANS DES FUTAIES RÉGULIÈRES DE HÊTRE OU DE CHÊNE SESSILE

J.-F. DHÔTE

Le but de cet article est de discuter de l'effet de différentes intensités d'éclaircie sur la croissance en diamètre des 100 plus gros arbres par hectare, dans le cas de peuplements purs et réguliers de Hêtre ou de Chêne sessile. Pour abréger, nous parlerons toujours de Chêne pour désigner le Chêne sessile.

Les enjeux forestiers qui entourent cette question sont multiples. D'abord, en futaie régulière, on constate qu'une proportion importante des peuplements ont dépassé l'âge théorique d'exploitabilité (Le Théry et Roman-Amat, 1996, cas du Sapin et du Hêtre). Il est probable que la volonté d'éviter les sacrifices d'exploitabilité, dans des peuplements de diamètre insuffisant, contribue significativement à cette situation. L'abondance de tels peuplements est particulièrement préoccupante pour des essences qui tolèrent bien — ou nécessitent — une croissance rapide dans la perspective de production de bois de qualité (c'est le cas du Hêtre). La logique qui transparait dans les prescriptions sylvicoles publiées par le *Bulletin technique de l'ONF* d'octobre 1996 est donc une intensification raisonnée des prélèvements en éclaircie, afin de garantir qu'à l'âge d'exploitabilité adopté, le diamètre-objectif sera atteint.

Dans les controverses actuelles sur la culture en futaie régulière ou irrégulière, on entend souvent dire que les éclaircies pratiquées en futaie régulière sont sans effet sur la croissance des plus gros arbres. À l'extrême, cet argument peut être invoqué pour rejeter le régime régulier comme trop contraignant et intrinsèquement contraire à l'expression du potentiel de croissance individuel des arbres.

Nous aimerions apporter un éclairage dendrométrique à ces deux questions. Nous nous concentrons sur la croissance et sa relation avec la sylviculture ; des considérations plus strictement sylvicoles seront aussi invoquées (possibilité de sélection). Une étude en cours sur le Chêne sessile, menée par F. Ningre (INRA-Croissance, Champenoux), aborde explicitement les problèmes de qualité. Nous insisterons donc un peu plus sur le Hêtre, notamment dans un développement consacré à la modélisation de la croissance. Mais il est bon de faire une analyse comparée des deux essences, précisément parce qu'elles sont réputées de tempéraments différents.

S'agissant de l'effet des éclaircies sur la croissance en diamètre, il est intéressant de considérer la population des 100 plus gros arbres par hectare et sa statistique, le diamètre dominant. Cette population est réputée plus insensible techniquement à l'éclaircie que le diamètre moyen. Elle est proche, au moins en fin de révolution, de celle des arbres d'avenir. Enfin, elle est relativement stable biologiquement, dès que les rangs sociaux sont bien fixés (au-delà de 60 ans : Pardé, 1981 ; Delvaux, 1966).

Nous avons cherché à quantifier l'ensemble des modifications apportées par l'éclaircie, dans la gamme d'intensités pour laquelle nous disposons de données fiables sur une période longue. Pour cela, nous avons utilisé les deux réseaux de placettes permanentes installées en hêtraies et chênaies entre 1883 et 1934, actuellement suivies par l'INRA. Chacun de ces deux réseaux comprend une trentaine de placettes. Une analyse statistique globale de ces jeux de données est possible, à condition de quantifier la sylviculture par un indice de densité de peuplement et de modéliser, en même temps que l'effet sylvicole, les autres facteurs influant sur la croissance (âge, fertilité de la station et fluctuations climatiques).

Les deux hypothèses fortes de l'analyse sont que, d'une part, le facteur densité est prépondérant pour caractériser l'état du peuplement (on néglige donc les différences de structure diamétrique possibles pour une même densité, par exemple histogrammes unimodal ou bimodal) ; d'autre part, c'est la densité à l'instant t qui importe, indépendamment de la manière dont on y est arrivé (en une seule éclaircie forte ou en une série de faibles). Ces deux hypothèses ne sont pas totalement vérifiées (la seconde, notamment, est douteuse). Mais ce sont les plus simples qu'on puisse faire, compte tenu de la nature des essais d'éclaircie disponibles et nous montrerons qu'elles sont déjà efficaces.

Les analyses de Pardé (1981), Oswald (1981a), Oswald et Divoux (1978) montraient que le gain en diamètre dominant apporté par des éclaircies dites "fortes" était faible, voire inexistant, même après 50 à 80 années d'observation. Ces analyses reposaient sur une partie du matériel utilisé ici (5 placettes de la forêt de Haye pour Pardé, 4 d'Eawy pour Oswald et Divoux). Si l'on considère l'ensemble du matériel disponible (essais comparatifs d'éclaircies), les différences de diamètre dominant constatées aujourd'hui sont en effet souvent faibles, dans un sens tantôt favorable, tantôt défavorable aux éclaircies fortes. Ce constat brut est plutôt dérangeant pour le sylviculteur. Mais surtout, il apparaît à première vue contradictoire avec plusieurs résultats bien établis : l'invariance de la production totale dans un large intervalle de densités (Bartet et Pleines, 1972), qui est bien vérifiée pour le Hêtre, entraîne mécaniquement que les arbres poussent mieux individuellement à faible densité ; de plus, l'analyse de la croissance individuelle chez le Hêtre montre des peuplements bien hiérarchisés, où la stimulation de croissance après éclaircie est maximale chez les arbres dominants (Dhôte, 1991).

La solution de ce paradoxe apparent demande une étude assez détaillée. D'abord, on montrera que, sous les termes "éclaircie faible ou forte", se cachent des modalités en fait peu différenciées : certaines des éclaircies étaient intenses, mais souvent le marteau se faisait plus léger après une ou deux coupes fortes ; à de rares exceptions près (placette Ducellier à Bellême, très claire dès le début), peu de placettes ont été maintenues durablement à des densités très faibles. Ensuite, on verra qu'il faut distinguer soigneusement les différents facteurs qui déterminent la valeur du diamètre dominant à un instant donné : les conditions initiales au démarrage de l'expérience, les effets

techniques des éclaircies et l'accroissement courant. Enfin, on discutera les différences, d'un point de vue qualitatif, entre deux peuplements arrivés au même diamètre mais dont l'un a bénéficié d'une sélection continue par des éclaircies par le haut et l'autre, non éclairci, a simplement conservé sa population initiale d'arbres dominants.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Présentation générale des réseaux et placettes

Les deux réseaux de placettes permanentes Hêtre et Chêne ont été créés en deux temps : en 1883, 10 placettes de 20-25 ares sont installées dans des hêtraies pures ou hêtraies-chênaies, âgées de 30 ans environ, en forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle). Ces placettes avaient pour but principal de comparer éclaircies par le haut et par le bas, accessoirement de tester la possibilité de cultiver le Chêne dans des peuplements dominés par le Hêtre. Seules sont analysées ici les 8 placettes ayant toujours eu les caractéristiques de hêtraies pures.

De 1922 à 1924, trois ensembles de placettes sont installés en forêts de Retz (Aisne), Darney (Vosges) et Eawy (Seine-Maritime). La conception est la suivante : un ou deux essais d'éclaircie (trois ou quatre traitements) dans des perchis ou jeunes futaies de 35 à 60 ans, plus des placettes uniques dans des futaies d'âges variés (100 à 160 ans). L'objectif des essais d'éclaircie était de comparer des combinaisons variées de rotation et d'intensité des coupes. Celui des placettes "uniques" était de fournir des chiffres de production, jusque dans la phase de régénération, avec la perspective finale d'une table de production (Pardé, 1962). Le réseau Chêne est analogue, dans ses grandes lignes. Installé entre 1925 et 1934, il comprend, dans chacune des forêts de Bellême (Orne), Blois (Loir-et-Cher), Champenoux (Meurthe-et-Moselle) et Tronçais (Allier), deux à trois essais d'éclaircie, démarrés à des âges compris entre 30 et 100 ans, distinguant chacun deux ou trois traitements (cinq dans un seul cas), plus une ou deux placettes uniques "de production". Ces réseaux ont déjà été analysés à plusieurs reprises (Arbonnier, 1958 ; Pardé, 1962 et 1981 ; Oswald et Divoux, 1978 ; Oswald, 1981a). La totalité des placettes Chêne sont encore suivies aujourd'hui, contre seulement 19 sur 33 pour le Hêtre.

Les surfaces de placette sont de 20, 25, 50 ou 100 ares pour le Hêtre, 50 ou 100 ares pour le Chêne. La gamme d'âge couverte par ces données est de 35-130 ans pour le Hêtre, 40-160 ans pour le Chêne. Concernant la fertilité des stations, on peut replacer les placettes de Chêne par rapport au faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante établi par l'ONF (Duplat, 1995, version dite "France entière") : les placettes recouvrent la moitié supérieure des indices de fertilité possibles (Hautot et Dhôte, 1995). Pour le Hêtre, les placettes sont sur bonnes à très bonnes stations (par référence aux tables étrangères, Le Goff, 1981).

Une mise au propre complète de ces données a été effectuée entre 1990 et 1995 par les équipes Croissance et Production (INRA, Champenoux) et Dynamique des Systèmes forestiers (INRA-ENGREF, Nancy) : exhumation de placettes abandonnées, saisie des inventaires manquants, des échantillons de mesures de hauteur, recalcul des hauteurs dominantes par une méthode homogène et robuste (Dhôte et de Hercé, 1994 ; Hautot et Dhôte, 1995).

Nous disposons donc, pour le Hêtre, de 29 placettes totalisant 349 inventaires (soit 320 périodes de croissance observées), et pour le Chêne de 32 placettes, 339 inventaires (307 périodes). Pour plus de fiabilité dans l'analyse statistique, nous avons préféré travailler sur les seules périodes durant lesquelles les arbres étaient numérotés, en excluant donc les jeunes peuplements dans lesquels seul l'histogramme par classes de diamètre était conservé. Cette restriction laisse intact le jeu de données Hêtre mais réduit le Chêne à 30 placettes et 213 périodes de croissance, avec un âge minimal qui remonte à 59 ans.

Densités de peuplement observées

La définition initiale des traitements à appliquer était toujours qualitative, notamment pour ce qui concerne l'intensité des coupes (forte, moyenne, faible, par exemple). Or, le sens que donnent les forestiers à des expressions comme "éclaircie forte" est très variable dans le temps, d'un pays à l'autre... et d'un forestier à l'autre. Éventuellement (Darney), le texte fondateur prévoyait de prélever un pourcentage de l'accroissement réalisé. La quantification des régimes d'éclaircie n'est apparue que dans les années 1970 (normes expérimentales de Bouchon, Pardé et Oswald). On en est donc réduit à quantifier *a posteriori* les itinéraires suivis.

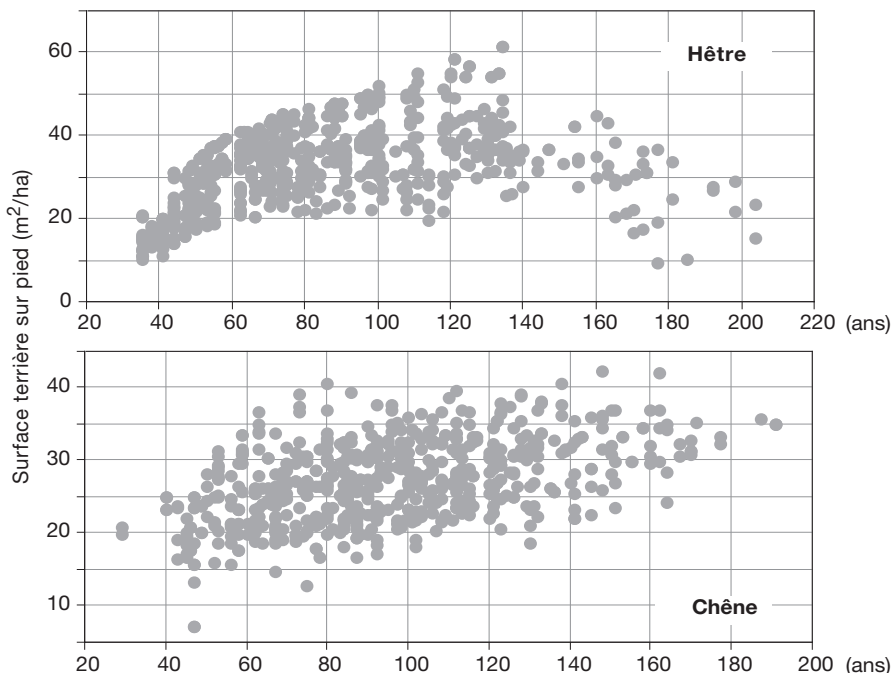
La surface terrière ne fournit pas une mesure de densité utilisable dans toutes les situations. Cette variable permet de classer très correctement des peuplements de mêmes âge et fertilité, mais une valeur donnée n'indique pas le même état de concurrence lorsque ces conditions changent. La figure 1 (ci-dessous) montre que les surfaces terrières maximales dérivent de 30 à 60 m²/ha entre 40 et 130 ans pour le Hêtre, pour des peuplements en autoéclaircie dès le départ (prélèvement de la mortalité seule). Pour le Chêne, la dérive est moins forte, mais les valeurs maximales passent tout de même de 30 à 40 m²/ha entre 50 et 140 ans et le nuage général est croissant.

Nous avons donc ajusté, pour les deux espèces, un indice de densité classique basé sur l'idée de Reineke (1933), qui combine le nombre de tiges N et le diamètre quadratique moyen D_g (en cm) de la façon suivante :

$$Rdi = \frac{N D_g^\alpha}{\beta} \quad \text{où } \alpha = 1,574 \text{ et } \beta = 145\,248 \text{ (Hêtre),}$$

$$\alpha = 1,701 \text{ et } \beta = 171\,582 \text{ (Chêne)}$$

Figure 1
SURFACE TERRIÈRE SUR PIED DANS LES DEUX RÉSEAUX DE PLACETTES PERMANENTES HÊTRE ET CHÊNE



Toutes les valeurs, avant et après éclaircie, sont représentées.
Les valeurs faibles des vieux peuplements de Hêtre sont dues aux coupes de régénération.

Cet indice est tel que ses valeurs soient comprises entre 0 et 1 dans presque tous les cas. Les peuplements les plus denses oscillent autour de la valeur 1.

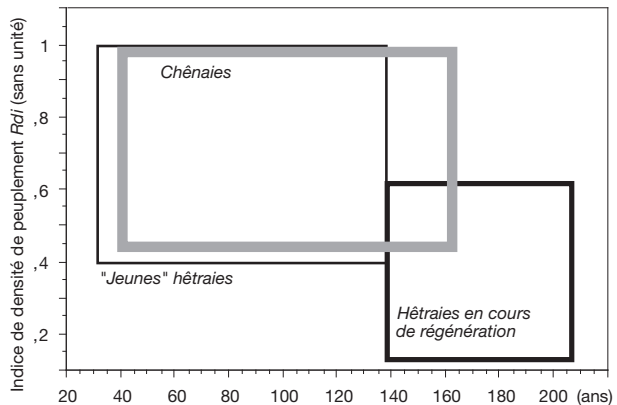
NB : Le calcul de cet indice repose sur la modélisation de l'enveloppe supérieure du nuage [Ln(Dg), Ln(N)], qui peut être très correctement assimilée à une droite et qu'on appelle "loi d'autoéclaircie". Bien entendu, l'existence de placettes maintenues durablement à densité maximale est essentielle pour ce volet de la modélisation. On ne saurait donc trop insister sur l'utilité de telles modalités dans les réseaux de placettes actuellement mis en place par la Coopérative de Données Modélisation : d'une part pour rendre compte correctement de la mortalité naturelle (la courbe d'autoéclaircie est atteinte progressivement, il faut donc un temps d'observation assez long pour pouvoir l'estimer avec une bonne fiabilité) ; d'autre part pour constituer une référence sûre en matière de compétition (d'où possibilité de modéliser correctement la compétition).

On ne considérera plus, dans toute la suite, que des valeurs de densité après éclaircie. En considérant tous les inventaires (figure 2a, ci-dessous), on constate que la densité des peuplements varie dans l'intervalle [0,45 ; 1], de façon uniforme dans une large gamme d'âge. Les plus vieilles placettes de Hêtre ont des densités faibles, traduisant l'impact des coupes de régénération.

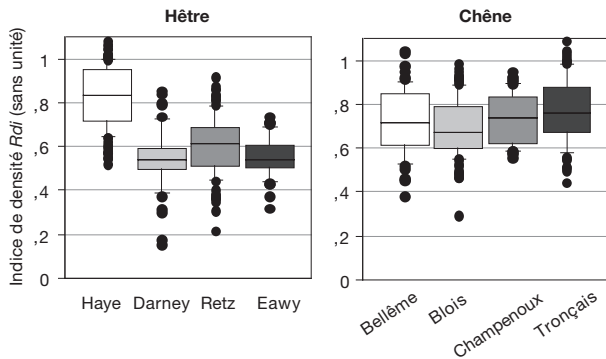
En étudiant la densité par forêt (figure 2b, ci-dessous), on note que les quatre forêts de Chêne explorent le même intervalle (*Rdi* moyen 0,73 ± 0,13 à 0,15), alors que la forêt de Haye est significativement plus dense que les trois autres sites de Hêtre (*Rdi* 0,82 contre 0,55-0,6, écart-types de 0,10 à 0,14) ; les valeurs maximales de densité ne sont observées que dans cette forêt. Cela provient du fait que, sur 8 placettes de Haye, 2 sont des témoins sans intervention et 2 sont traitées en éclaircies faibles par le bas.

Figure 2
DISPERSION DE L'INDICE DE DENSITÉ
RDI APRÈS ÉCLAIRCIE

2-a : Enveloppe des valeurs
en fonction de l'âge



2-b : Box-plots par forêt
(chaque boîte est délimitée par les
quantiles 25 et 75 %, la barre intérieure
est la médiane, les deux barres
externes sont les quantiles 10 et 90 %)



Il est important de considérer les différences entre placettes dans chaque essai comparatif d'éclaircies, en moyenne sur toute la période d'observation. Les valeurs moyennes de densité par placette sont indiquées dans les tableaux I et II (pp. 563 et 564). En unités de *Rdi*, pour le Hêtre les différences maximales entre placettes d'un même dispositif sont relevées pour la Route Charlemagne (écart maximal de 0,3), les Épicéas (0,22) et Chrétienette (0,28) ; encore faut-il rappeler que les deux premiers dispositifs (forêt de Haye) restent globalement très denses. Pour le Chêne, 5 dispositifs sont à peu près différenciés : Sablonnières (écart de 0,37), Hallet (0,21), Trésor (0,23) et les 2 essais de Champenoux (0,2). Partout ailleurs, la différence moyenne de densité varie entre 0,07 et 0,17, ce qui est faible.

Si l'on considère la position des placettes, en moyenne globale, par rapport aux faisceaux de normes établis par Oswald (qui n'est pas exactement le traitement actuellement assigné), on relève toujours une surabondance de traitements en éclaircies faibles. Pour fixer les idées, la valeur 1/2 de l'indice de densité *Rdi* correspond respectivement, en bonne fertilité, à peu près à la norme N4 (Hêtre) et à la norme 70 (Chêne).

En guise de conclusion provisoire, on retiendra donc que :

- les peuplements sont en moyenne toujours denses, voire très denses ;
- les dispositifs de comparaison d'éclaircie sont souvent peu différenciés, en moyenne sur toute la période d'observation ;
- si l'on considère les données au niveau le plus élémentaire (une période de croissance), on dispose néanmoins d'une distribution assez bien répartie entre 0,5 et 1 fois la densité maximale biologique.

Le dispositif de Hêtre de Souilly (Meuse) est constitué de quatre traitements répétés quatre fois, selon la méthode du Carré latin (Oswald, 1981b). Les traitements sont, dans l'ordre des densités, un témoin sans interventions et les trois normes N1, N2 et N4. Les éclaircies y sont pratiquées à la rotation de 6 ans, de nature mixte ("par le haut au bénéfice de 100 arbres d'avenir par hectare, accompagnée d'une éclaircie sanitaire", Oswald, 1981b). Les arbres n'ayant été numérotés que récemment, cet essai sera écarté pour l'analyse statistique et utilisé seulement comme illustration et support de validation.

Méthode d'analyse

L'analyse privilégie la présentation de données, d'abord sous formes de moyennes par placette. Ensuite, au niveau de chaque période de croissance, l'ensemble des données seront traitées statistiquement, par régression multiple, en illustrant graphiquement la mise en évidence d'un effet sylvicole sur la croissance. Dans cette étape, le modèle de régression devra être considéré seulement comme un résumé simple et descriptif des données. Pour rendre compte de façon fiable, robuste et générale de la dynamique, à des fins de prévision, on doit recourir à des modèles plus complexes du point de vue de la méthode de construction. Nous renverrons pour cela le lecteur à nos travaux de modélisation menés depuis 1986 sur le Hêtre et 1992 sur le Chêne.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous tenons à rappeler à une certaine prudence dans l'usage du diamètre dominant (Pierrat *et al.*, 1995). En effet, cette statistique caractérise la partie la plus à droite de la population, sur l'axe des diamètres. Indépendamment des effets techniques de l'éclaircie, on peut dire que le diamètre dominant est moins sûr et stable que le diamètre moyen : en raison de la structure spatiale des peuplements, il est sensible à la taille des placettes et sa valeur peut changer lorsqu'on déplace le support de mesure dans la parcelle. Il est donc logique d'observer des différences initiales entre des placettes installées dans un même peuplement, aussi homogène soit-il en station et en sylviculture. Ce phénomène est probablement exacerbé lorsque les peuplements sont d'origine naturelle (effets prolongés de la structure en bouquets initiale).

Technique et forêt

Tableau I

Statistiques par placette (réseau Hêtre) :

moyenne de l'indice de densité après éclaircie (*Rdi*), position moyenne après éclaircie dans les normes Oswald (la valeur n'est pas le traitement actuellement affecté aux placettes), moyenne sur toute la période d'observation des accroissements périodiques du diamètre dominant (exprimée en largeur de cerne)

Dispositif	Placette	<i>Rdi</i> moyen	Norme Oswald	Largeur de cerne moyenne	Intervalle d'âge
Darney					
Sainte-Marie	1	0,519	N 1	2,788	35 à 78
	2	0,542	N 1	2,802	
	3	0,709	> N 1	2,629	
Beaulieu		0,528	N 3	1,615	80 à 119
Fontaine aux Ordon		0,549	N 2	1,440	124 à 163
Verbamont		0,285	< N 4	1,958	165 à 185
Haye					
Chavigny	1	0,828	> N 1	1,844	47 à 132
	2	0,713	N 1	2,219	
Charlemagne	1	0,858	> N 1	1,899	49 à 134
	2	0,703	N 1	2,150	
	3	1,000	> N 1	2,057	
Épicéas	1	0,766	> N 1	1,899	48 à 133
	3	0,985	N 1	1,795	
Grand Pierrier		0,725	> N 1	2,100	49 à 134
Retz					
Faîte	1	0,564	N 2	2,958	35 à 91
	2	0,694	N 1	2,709	
	3	0,640	N 2	2,913	
	4	0,540	N 2 à 3	2,867	
Chrétienette	1	0,539	N 1 à 2	2,194	62 à 118
	2	0,646	N 1 à 2	2,152	
	3	0,819	> N 1	1,940	
	4	0,614	N 1 à 2	2,171	
Pré des Seigneurs		0,601	N 1 à 2	1,588	127 à 173
Mortefert		0,389	N 2 à 3	2,021	165 à 204
Eawy					
Camp Cusson	1	0,494	N 3	2,240	44 à 114
	2	0,664	N 2	1,845	
	3	0,530	N 2	2,419	
Côte aux Hêtraux		0,577	N 2 à 3	1,353	100 à 147
Camp Souverain		0,496	N 3	1,620	130 à 177
Souilly					
Témoin	B	0,911	> N 1	2,811	35 à 65
Éclaircie moyenne	D	0,777	N 1	2,938	
Éclaircie forte	C	0,661	N 2	3,166	
Éclaircie ultra-forte	A	0,513	N 4	3,942	

J.-F. DHÔTE

Tableau II

Statistiques par placette (réseau Chêne) :

moyenne de l'indice de densité après éclaircie (*Rdi*), position moyenne après éclaircie dans les normes Oswald (la valeur n'est pas le traitement actuellement affecté aux placettes), moyenne sur toute la période d'observation des accroissements périodiques du diamètre dominant (exprimée en largeur de cerne)

Dispositif	Placette	<i>Rdi</i> moyen	Norme Oswald	Largeur de cerne moyenne	Intervalle d'âge
Bellême					
Hallet	1	0,836	200	2,034	42 à 96
.	2	0,700	180	2,080	
.	3	0,629	160	1,936	
Hermousset	1	0,763	150	1,535	69 à 123
.	2	0,683	120	1,974	
Chatellier	1	0,811	150	1,600	95 à 145
.	2	0,692	110	1,641	
Ducellier		0,524	70	1,931	75 à 135
Sablonnières Rouges		0,916	220	1,750	117 à 162
Blois					
Sablonnières	1	0,581	80	1,871	36 à 102
.	2A	0,552	80	2,028	
.	2B	0,922	220	1,715	
.	3	0,706	130	1,959	
.	4	0,560	90	2,024	
Pauverts	1	0,826	150	1,637	67 à 129
.	2	0,655	90	1,829	
Marchais des Cordeliers	1	0,798	130	1,640	100 à 164
.	2	0,623	90	1,771	
Allée de Blois		0,714	100	1,523	121 à 187
Champenois					
Butte de Tir	1	0,621	100	1,923	43 à 106
.	2	0,831	140	1,578	
Grande Bouzule	1	0,659	90	1,924	60 à 125
.	2	0,838	130	1,834	
Tronçais					
Plantonnée	1	0,924	270	1,562	29 à 88
.	2	0,789	190	1,782	
Trésor	1	0,948	270	1,610	53 à 113
.	2	0,799	240	1,757	
.	3	0,723	180	1,841	
Bois Brochet	1	0,563	60	1,677	80 à 141
.	2	0,694	110	1,577	
Clés des Fossés		0,812	180	1,816	110 à 171
Richebourg		0,731	100	1,333	130 à 191

EXEMPLES : STIMULATION DE L'ACCROISSEMENT ET EFFET TECHNIQUE DE L'ÉCLAIRCIE

La figure 3 (ci-dessous) illustre à partir de trois cas le comportement du diamètre dominant. Le choix des cas ne vise pas à la représentativité, mais à bien illustrer les différents facteurs qui concourent à la valeur finale du diamètre dominant observé après une longue période.

On note d'abord des différences de conditions initiales entre placettes : ainsi, à Chrétiennette, la différence de 3 cm entre témoin et éclaircie forte observée à 62 ans se retrouve à l'identique à 118 ans, bien que les peuplements soient menés très différemment.

Ensuite, certains prélèvements par le haut entraînent une baisse instantanée, technique, du diamètre dominant. Des baisses de 1 à 2 cm sont relevées à Chrétiennette et Souilly : dans le premier cas, on sait que certaines coupes étaient sanitaires, y compris dans le témoin (dépérissements dus à *Nectria ditissima* et *Cryptococcus fagi* à 118 ans), mais à Souilly, l'origine est purement sylvicole (travail dans l'étage dominant).

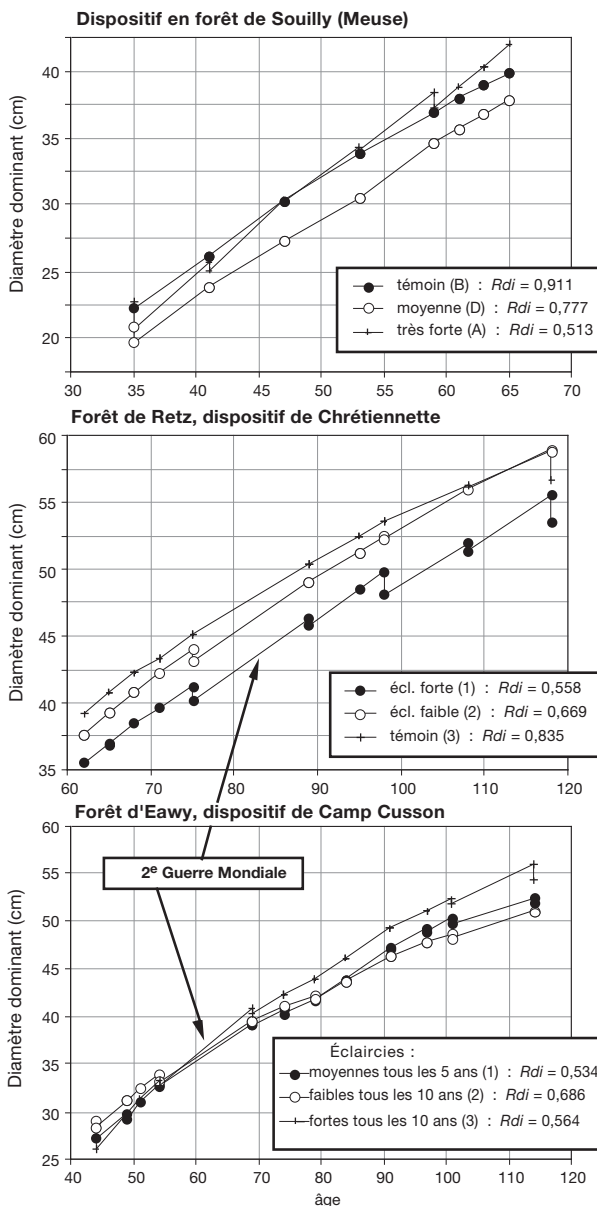


Figure 3
ÉVOLUTION DU DIAMÈTRE DOMINANT EN FONCTION DE L'ÂGE, POUR 3 DISPOSITIFS D'ÉCLAIRCIE EN HÊTRAIE

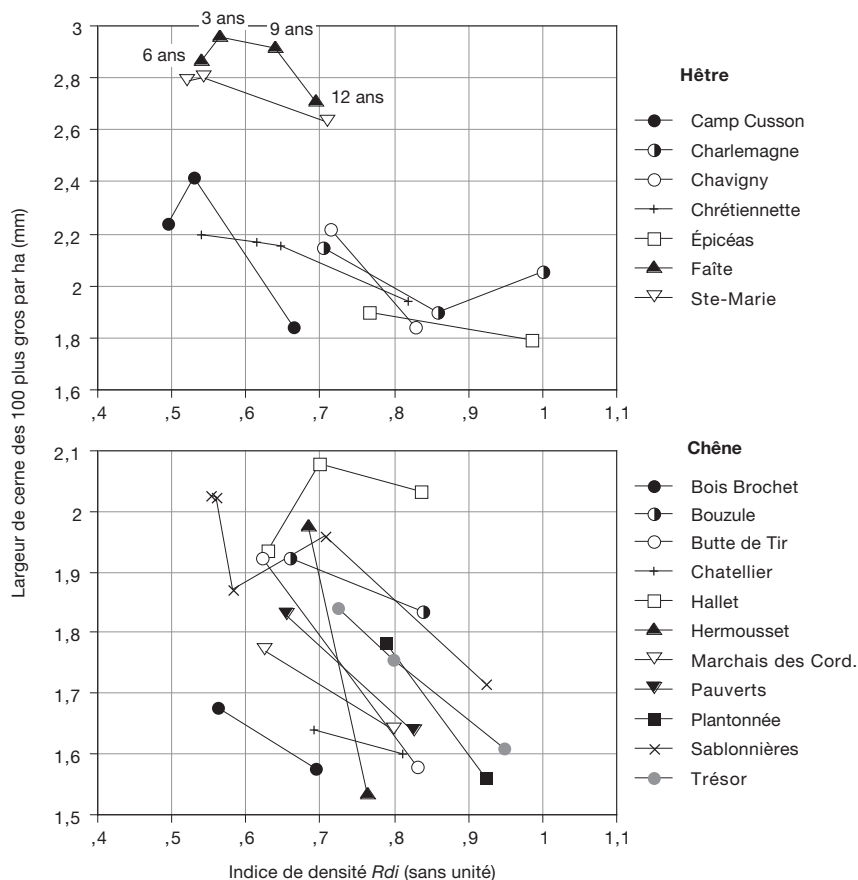
Souilly et Chrétiennette ont des traitements bien différenciés en densité, Camp Cusson nettement moins.

Sont indiqués en légende la dénomination usuelle du traitement, le n° de placette et la valeur moyenne de l'indice de densité *Rdi* (définition dans le texte).

Enfin, les différences d'accroissement sont également bien visibles, avec un effet stimulant des éclaircies fortes dans les trois cas présentés. À Souilly, on note qu'avec les éclaircies très fortes (norme N4), le gain d'accroissement réalisé par rapport au témoin est régulièrement amputé par l'effet technique de l'éclaircie, si bien que ce traitement aura mis 30 ans à "émerger", c'est-à-dire à dépasser le témoin. Il n'en demeure pas moins qu'il pousse nettement plus vite... !

On peut déjà conclure, à partir de ces quelques exemples, que le diamètre dominant à un moment donné incorpore à la fois les changements d'accroissement et les perturbations dus à l'éclaircie. Si l'on cherche à évaluer la pertinence de différents régimes sylvicoles, on a intérêt à bien distinguer les deux notions d'accroissement et de valeur moyenne actuelle. Cet effet technique de l'éclaircie mérite d'être souligné, parce que le diamètre dominant est précisément réputé peu sensible techniquement à la sylviculture. Il est en effet moins sensible que le diamètre moyen mais nous voyons que, dans le cas de la culture des feuillus, avec ses éclaircies par le haut, les perturbations ne sont pas négligeables. Dans le cas du Chêne (non présenté ici), les pertes techniques existent aussi, sporadiquement dans les vieilles placettes permanentes et très nettement dans le dispositif plus récent de Réno-Valdieu (cas de la norme 70).

Figure 4 **RELATION ENTRE DENSITÉ DES PEUPELEMENTS ET CROISSANCE RADIALE DES 100 PLUS GROS PAR HECTARE, DANS LES 18 ESSAIS COMPARATIFS D'ÉCLAIRCIE**



Chaque point représente, pour une placette, les valeurs moyennes prises sur toute la période d'observation.
 Les placettes d'un même dispositif sont représentées par un même symbole.
 Pour le dispositif du Faïte, les rotations pratiquées sont indiquées pour chaque placette.

BILAN DES ACCROISSEMENTS DANS LES 18 COMPARATIFS D'ÉCLAIRCIES

Nous analysons maintenant les 7 hêtraies et 11 chênaies dans lesquelles des essais comparatifs d'éclaircie ont été installés. La figure 4 (p. 566) représente la relation entre les valeurs moyennes par placette, sur toute la durée d'observation, de la densité du peuplement et de la largeur moyenne des cerne des 100 plus gros par hectare. Sur chaque graphique, les différents essais sont figurés par des symboles différents (les placettes d'un même essai étant reliées par une ligne brisée en "constellation"), ce qui permet d'apprécier à la fois la tendance générale et les particularités propres à chaque dispositif.

Les figures Hêtre et Chêne ont des allures différentes. Pour le Hêtre, deux peuplements ont des accroissements moyens nettement supérieurs à tous les autres, à savoir Faîte (Retz) et Sainte-Marie (Darney), dont l'âge moyen est également plus faible (55 ans contre 80-85 ans) ; or nous verrons que l'effet de l'âge sur la croissance radiale est beaucoup plus net chez le Hêtre que chez le Chêne.

Pour les deux espèces, on note une tendance à l'augmentation des largeurs de cerne au fur et à mesure que la densité diminue ; ceci est vrai aussi bien globalement (pour tous les essais) que localement dans chaque essai. L'analyse par essai est intéressante. Certains s'ordonnent exactement comme le nuage général (Trésor, Sablonnières, Chrétienette) ; dans d'autres, on a des différences d'accroissement manifestement sans rapport avec les (faibles) différences de densité constatées (c'est le cas de Hermousset en Chêne ou Camp Cusson en Hêtre). Enfin, on note quelques situations où l'effet est manifestement plus faible que la tendance générale, voire inverse (Hallet, Charlemagne).

On peut proposer quelques réflexions sur ces particularités des résultats locaux. Il peut exister des différences de milieu qui rendent les placettes non comparables : c'est le cas en particulier au Hallet, où la placette éclaircie fortement est moins fertile et dont le sous-étage de Hêtre est beaucoup plus fourni (données recueillies par A. Hautot, à paraître en 1997). Éventuellement, d'autres caractéristiques sylvicoles (rotation et nature des coupes) peuvent induire des différences, indépendamment de la densité du peuplement. À ce sujet, on peut signaler le cas du Faîte, où les quatre placettes ont subi des rotations respectives de 3, 6, 9 et 12 ans sans que les résultats soient très différenciés.

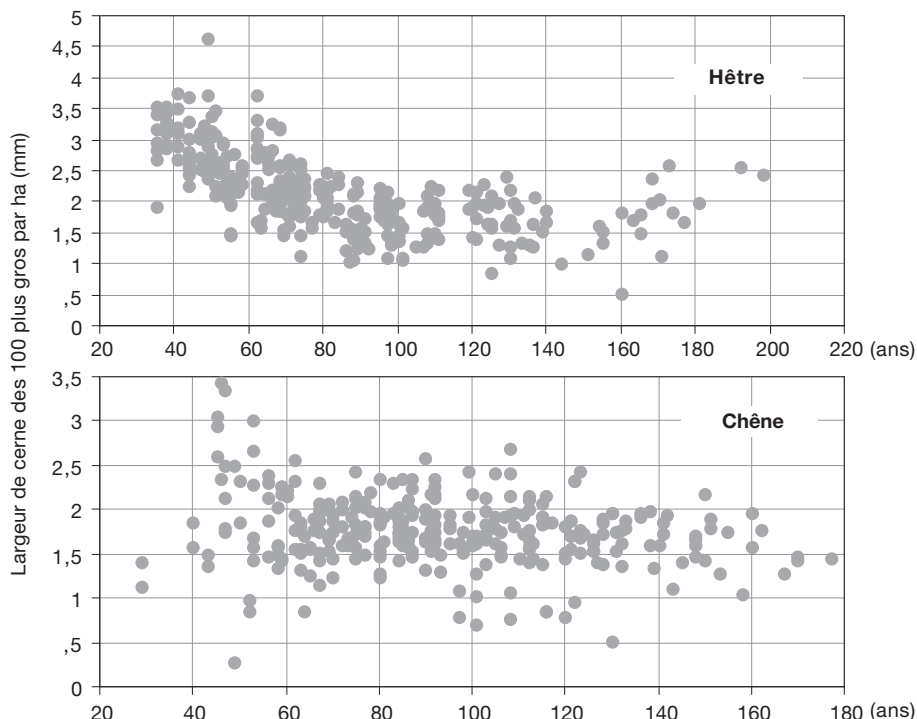
ANALYSE STATISTIQUE DE LA RELATION DENSITÉ-CROISSANCE DES DOMINANTS

Nous cherchons à mesurer l'effet de la densité du peuplement sur l'accroissement annuel du diamètre dominant, calculé pour chaque période d'observation. Cet accroissement annuel est exprimé en unités de largeur de cerne, en mm, et noté $lc(D_0)$. Pour calculer celle-ci, nous considérons la différence entre le diamètre dominant après éclaircie à l'inventaire courant et le diamètre dominant avant éclaircie de l'inventaire suivant. Ceci revient donc bien à considérer un accroissement biologique. Pour évaluer précisément l'effet de la densité, on doit éliminer les autres sources de variabilité que sont l'âge, la fertilité de la station et la période calendaire. Pour cela, nous modélisons simultanément l'ensemble de ces facteurs par régression multiple. Seules les étapes les plus significatives de la modélisation sont exposées.

Élimination des effets âge, fertilité et période calendaire

L'effet de l'âge est pratiquement inexistant à première vue (ou très faible) chez le Chêne, mais très clair chez le Hêtre (figure 5, p. 568). Dans ce cas, l'effet est décroissant et non-linéaire. Une seconde source de variabilité apparaît ensuite (non figurée ici), liée à la période calendaire : au cours d'une même période, toutes les placettes d'une même forêt sont soit surestimées soit sous-estimées par

Figure 5 EFFET DE L'ÂGE SUR L'ACCROISSEMENT DES 100 PLUS GROS ARBRES PAR HECTARE



un modèle général de l'effet âge. Dans deux études consacrées à la productivité des hêtraies et des chênaies (Hautot et Dhôte, 1995 et données non publiées), nous avons montré que l'accroissement courant en surface terrière par hectare calculé sur des périodes de 3 à 10 ans fluctue dans un intervalle de $\pm 40\%$ autour de la moyenne. Cette variabilité reflète l'influence de facteurs climatiques (disponibilité en eau, gels, températures, verglas) ou biotiques (défoliateurs, parasites). Elle peut être assez forte pour masquer d'éventuels effets d'autres facteurs, de moindre amplitude. C'est pourquoi nous tâchons de plus en plus souvent de la modéliser, ou de la filtrer.

Le cas du Hêtre est assez simple : nous disposons d'une variable synthétique qui résume d'un seul coup les trois effets âge + fertilité + période, à savoir l'accroissement du peuplement en surface terrière par hectare $\Delta G/\Delta t$. Chez le Hêtre, cette quantité est pratiquement indépendante de la densité du peuplement, au minimum dans l'intervalle $Rdi \in [0,5 ; 1]$; même si cette propriété n'est plus vérifiée aux très faibles densités (Bryndum, 1987), elle l'est sur notre jeu de données (Dhôte, 1991). Par ailleurs, $\Delta G/\Delta t$ est reliée de manière simple à la vitesse de croissance en hauteur dominante, et donc à la fertilité (Dhôte, 1992 et 1996a). Enfin, ses fluctuations entre périodes calendaires sont analogues à celle de l'accroissement des dominants. Le modèle considéré est le suivant :

$$\text{Hêtre : } lc(D_0) = \lambda_0 + \lambda_1 \frac{\Delta G}{\Delta t} \text{ où } \lambda_0 \text{ et } \lambda_1 \text{ sont des paramètres [1]}$$

Dans le cas du Chêne, la situation se complique et l'on ne peut pas utiliser le même modèle. En effet, l'accroissement en surface terrière des chênaies dépend de manière très significative de la densité (Dhôte, 1996b) : la production diminue de 15 % lorsque la densité baisse de 1 à 1/2. Par

conséquent, si nous utilisons $\Delta G/\Delta t$ comme variable indépendante dans un modèle de type [1], cela reviendrait à introduire indirectement un effet de la densité. Nous avons donc considéré le modèle suivant :

$$\text{Chêne : } lc(D_0) = \mu_0 + \mu_1 \hat{\text{Age}} + \mu_2 \frac{\Delta G}{\Delta G_{ajust}}, \text{ avec des paramètres } \mu_i [1']$$

où $\frac{\Delta G}{\Delta G_{ajust}}$ est le rapport entre l'accroissement en surface terrière observé sur la période considérée

et sa valeur prédite par un modèle construit par ailleurs (Dhôte, 1996b). Cette quantité est un bon indicateur de la variabilité entre périodes calendaires.

Les deux variables indépendantes utilisées dans l'expression [1'] sont très peu corrélées entre elles dans l'échantillon (corrélations simple de $-0,014$ pour 213 observations) et elles sont également peu corrélées à la densité Rdi (corrélations de $0,043$ et $-0,0041$). À ce stade, il n'y a pas d'effet détectable de l'indice de fertilité (hauteur dominante à 100 ans).

Les résidus de ces premiers modèles sont présentés dans la figure 6 (ci-dessous), en fonction de la densité Rdi . Bien que la variabilité soit très importante, il existe pour les deux espèces un effet très significatif de la densité. De plus, les nuages sont similaires pour les différentes forêts, ce qui indique qu'il n'y a pas de biais géographique et permet de continuer à traiter toutes les données en bloc. Enfin, on peut suspecter une non-linéarité : les nuages ont tendance à s'incurver entre les densités 0,5 et 0,7.

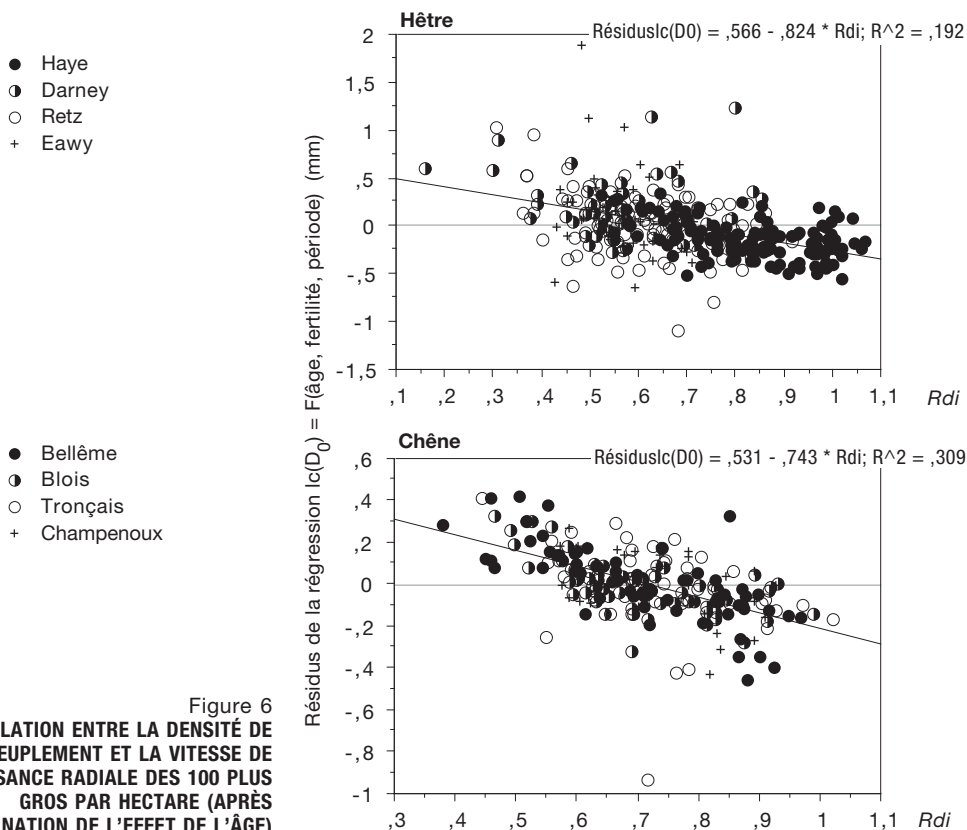


Figure 6
RELATION ENTRE LA DENSITÉ DE
PEUPEMENT ET LA VITESSE DE
CROISSANCE RADIALE DES 100 PLUS
GROS PAR HECTARE (APRÈS
ÉLIMINATION DE L'EFFET DE L'ÂGE)

Pour simplifier, nous ne chercherons pas à rendre compte de cette non-linéarité ; mais, ce faisant, avec un effet linéaire comme représenté à la figure 6, nous biaisons un peu la tendance, avec une sous-estimation de la différence entre densités extrêmes.

Modélisation globale

Les constats précédents peuvent être résumés par une régression multiple incorporant la densité. À nouveau, les résidus de cette nouvelle régression sont analysés en fonction de l'ensemble des variables disponibles. L'indice de fertilité ressort maintenant comme variable significative pour expliquer la croissance du Chêne. Les modèles retenus sont les suivants :

$$\text{Hêtre : } Ic(D_0) = \lambda_0 + \lambda_1 \frac{\Delta G}{\Delta t} + \lambda_2 Rdi, \text{ avec des paramètres } \lambda_i [2']$$

$$\text{Chêne : } Ic(D_0) = \mu_0 + \mu_1 \hat{A}ge + \mu_2 H_0(100) + \mu_3 \frac{\Delta G}{\Delta G_{ajust}} + \mu_4 Rdi \text{ avec des paramètres } \mu_i [2']$$

Dans ces expressions, $\Delta G/\Delta t$ est l'accroissement en surface terrière observé pour la période considérée, H_0 (100) la hauteur dominante à 100 ans (indice de fertilité), $\frac{\Delta G}{\Delta G_{ajust}}$ est défini ci-dessus et Rdi l'indice de densité.

Les statistiques d'ajustement de ces modèles figurent dans le tableau III (ci-dessous).

Tableau III **Statistiques d'ajustement des modèles [2] et [2']**

Hêtre					
Résumé régression Ic(D₀) (en mm) vs 2 Indépend.					
Nombre	R carré ajusté	Ec type résiduel			
320	,769	,297			
Coeff. de régression Ic(D₀) vs 2 Indépend.					
	<i>Unité</i>	Coefficient	Erreur standardisée	Valeur de t	Valeur de p
Terme cst.	<i>mm</i>	1,324	,077	17,194	<,0001
$\Delta G/\Delta t$	<i>mm/(m²/ha/an)</i>	2,116	,066	32,111	<,0001
Rdi	<i>mm</i>	-,831	,095	- 8,720	<,0001
Chêne					
Résumé régression Ic(D₀) (en mm) vs 4 Indépend.					
Nombre	R carré ajusté	Ec type résiduel			
213	,804	,140			
Coeff. de régression Ic(D₀) vs 4 Indépend.					
	<i>Unité</i>	Coefficient	Erreur standardisée	Valeur de t	Valeur de p
Terme cst.	<i>mm</i>	,447	,185	2,412	,0167
Âge	<i>mm/an</i>	- 2,280E-3	3,747E-4	- 6,086	<,0001
H0(100)	<i>mm/m</i>	,019	6,657E-3	2,827	,0052
G'/G' aj.	<i>mm</i>	1,618	,061	26,572	<,0001
Rdi	<i>mm</i>	-,804	,078	- 10,239	<,0001

En régression multiple, il est très important de s'assurer que les variables "explicatives" de la régression sont bien indépendantes entre elles. Si tel n'était pas le cas, les différents paramètres seraient peu interprétables (corrélés entre eux, peu précis). Une première indication est donnée par le tableau IV (ci-dessous) : pour chacune des deux essences, la matrice des corrélations simples entre les variables de la régression ne comporte que des valeurs faibles (au maximum 0,254 en valeur absolue) qui peuvent être considérées comme très raisonnables.

Tableau IV **Amplitude, moyenne des variables utilisées dans les modèles [2] et [2'], et leur matrice des corrélations**

Hêtre (320 observations)

Variable	Unité	Moyenne	Gamme (mini-maxi)	Matrice des corrélations	
				$\Delta G/\Delta t$	<i>Rdi</i>
$\Delta G/\Delta t$	m ² /ha/an	0,663	0,142 - 1,405	1,000	
<i>Rdi</i>	—	0,710	0,159 - 1,080	0,095	1,000
lc(D ₀)	mm	2,156	0,520 - 4,636		

Chêne (213 observations)

Variable	Unité	Moyenne	Gamme (mini-maxi)	Matrice des corrélations			
				âge	H ₀ (100)	$\Delta G/\Delta G$ ajusté	<i>Rdi</i>
Âge	ans	103	59 - 177	1,000			
H ₀ (100)	m	25,4	22,6 - 28,1	- 0,216	1,000		
$\Delta G/\Delta G$ ajusté	—	1	0,499 - 1,396	- 0,014	0,010	1,000	
<i>Rdi</i>	—	0,715	0,380 - 1,020	0,043	0,254	- 0,00406	1,000
lc(D ₀)	mm	1,734	0,509 - 2,435				

Analyse des modèles : qualité générale, effets placette résiduels

Les deux modèles expliquent une part élevée de la variance (R² de 0,77 à 0,8, écart-type résiduel de 0,3 mm pour le Hêtre, 0,14 mm pour le Chêne). Toutes les variables retenues sont significatives au seuil de 1 % (tests-t). Dans le cas du Chêne, la variable la plus déterminante est l'indice de variabilité entre périodes $\frac{\Delta G}{\Delta G_{ajust}}$ (test-t très élevé) ; si nous n'avions pas introduit cette variable, des

effets plus ténus comme celui de l'indice de fertilité auraient disparu. L'effet de l'âge est significatif dans le cas du Chêne, bien que son amplitude soit faible : on perd 0,23 mm sur 100 ans. S'agissant de l'indice de fertilité (hauteur dominante à 100 ans), sa gamme dans notre échantillon de chênaies est de 6 m, ce qui entraîne une différence maximale de 0,11 mm entre extrêmes (une démarche de modélisation différente permet d'estimer un effet-fertilité plus fort et plus réaliste).

Les résidus des régressions [2] et [2'] ont été comparés à 0 pour chaque placette, au moyen de tests-t univariés. On compte, pour le Chêne, 2 placettes sur 30 ayant des résidus significativement différents de 0 au seuil de 1 % et, pour le Hêtre, 4 placettes sur 29. Globalement, on peut consi-

dérer que le modèle offre un bon résumé des données, suffisamment non biaisé entre placettes pour permettre une discussion forestière.

Effet de la densité : discussion

Le résultat le plus important est le caractère très significatif du paramètre qui mesure l'effet de la densité *Rdi*. Ce paramètre s'établit à des valeurs très proches pour les deux essences, soit $-0,831$ chez le Hêtre et $-0,804$ chez le Chêne. Étant donné la structure linéaire du modèle, cela signifie pratiquement que, lorsque la densité baisse de $Rdi = 1$ à $1/2$, "on gagne" environ $0,4$ mm pour la largeur de cerne des 100 plus gros arbres par hectare.

Dans des conditions expérimentales similaires, le Chêne semble réagir aussi nettement que le Hêtre à la densité de peuplement, en valeur absolue ; sa réaction est même plus nette en valeur relative, puisque sa largeur de cerne moyenne est plus faible (dans notre échantillon $1,73$ mm, contre $2,16$ mm pour le Hêtre). Ce résultat est *a priori* surprenant, il semble aller contre l'intuition : l'expérience des sylviculteurs ayant pratiqué une sylviculture intensive du Hêtre, aussi bien que les analyses passées de plusieurs essais d'éclaircie en hêtraie (Bouchon *et al.*, 1989), conduiraient plutôt à penser que le Hêtre est le "bon sujet" du forestier et réagit bien à ses injonctions, alors que le Chêne est réputé plus rebelle... !

Sur le fond, l'opinion assez répandue d'une moindre réactivité du Chêne nous paraît fondée non pas tant sur le gain de croissance réel (difficile à constater *de visu*) que sur l'analyse de la refermeture du couvert, laquelle est effectivement moins rapide et complète que chez le Hêtre. Si tant est qu'il existe un sous-étage, cette reconquête plus lente n'est pas nécessairement un inconvénient sylvicole, puisqu'elle entraîne une productivité plus durable des houppiers (meilleure interception d'énergie).

Concernant la méthode employée, si l'existence d'un effet sylvicole est très claire, on doit rester prudent sur l'amplitude de cet effet, qui reste contingente à la forme des modèles considérés. En effet, ces modèles sont additifs, c'est-à-dire que l'effet de stimulation par les éclaircies s'ajoute tout simplement à une tendance biologique. Ainsi, l'effet sylvicole est uniforme quels que soient l'âge, la fertilité ou les facteurs liés à la période. Cette propriété du modèle de régression multiple ne paraît pas très raisonnable d'un point de vue biologique. On s'attendrait en effet à ce que l'effet des éclaircies soit plus fort en valeur absolue dans le jeune âge ou encore varie selon les conditions climatiques ; et on peut aussi imaginer que les deux essences ne réagissent pas de la même manière à ces différents facteurs, étant donné leurs différences biologiques (tolérance à l'ombre, fonctionnement hydrique notamment).

On pourrait lever la difficulté en testant des modèles plus complexes, incluant des effets d'interaction entre les facteurs considérés (interactions âge x densité et période x densité, au minimum). Cette approche, qu'on peut qualifier de statistique, consisterait à tester l'ensemble des combinaisons. Nous ne l'avons pas explorée, pour des raisons de stratégie générale de modélisation, qu'il serait difficile de présenter ici avec toute l'argumentation appropriée.

Nous avons donc privilégié une méthode plus constructive, basée sur des hypothèses biologiques et sur une composition multiplicative des différents facteurs, de nature à permettre des extrapolations en dehors du domaine de calibration. Cette méthode repose sur le principe d'une modélisation simultanée et cohérente des niveaux arbre et peuplement, sur l'usage d'un diamètre-seuil qui réagit à l'âge et à l'état du peuplement et enfin sur une mesure de densité distincte du *Rdi*. Par ailleurs, le modèle est ajusté statistiquement sur les données présentées ici. L'exposé de la méthode peut être trouvé dans plusieurs articles (Hautot et Dhôte, 1995 ; Dhôte, 1991). Retenons simplement que cette méthode plus fine conduit à prédire, pour le Hêtre, des effets sylvicoles nettement plus forts que les $0,4$ mm obtenus ici. Les résultats ainsi obtenus sont discutés dans toute la suite.

APPROCHE PAR SIMULATION CHEZ LE HÊTRE

Nous tâchons maintenant d'illustrer ce que pourrait être la dynamique de peuplements maintenus, dès le stade perchis et de façon prolongée, à des densités faibles. Nous procédons par simulation, à partir d'un modèle d'arbre indépendant des distances établi pour le Hêtre (Dhôte, 1995).

Si l'on cherche à comparer globalement des alternatives sylvicoles, on part d'une même situation initiale fixée. On peut s'arranger pour maintenir effectivement des niveaux de densité prédéterminés, ce qui, reconnaissons-le, est plus facile devant un écran que le marteau à la main. Grâce aux fonctionnalités du logiciel Simule 4.π, développés par nos soins sur Macintosh, on peut régler assez finement les coupes par classe de diamètre, et notamment reproduire à volonté des prélèvements très nettement par le haut.

La situation adoptée est analogue à celle de Souilly : un indice de fertilité élevé (16 m à 35 ans, 35 m à 100 ans), une distribution initiale par classes de diamètre de type exponentiel décroissant, un nombre de tiges de 2 500 tiges par ha, une surface terrière de 25 m²/ha (diamètre-seuil de précomptage : 2,5 cm) et un diamètre dominant de 22 cm. Nous avons simulé ce peuplement de 35 à 101 ans.

Résultats globaux : stimulation très nette chez le Hêtre à faible densité

Trois itinéraires sylvicoles sont testés : un témoin (sans éclaircies) et les deux normes N2 et N4 d'Oswald. Ces trois situations couvrent la gamme des sylvicultures en futaie classique et ne sortent pratiquement pas du domaine de calibration du modèle. Les éclaircies sont très nettement par le haut au début (facteur d'éclaircie K de 1) puis deviennent mixtes (K de 0,6). Nous avons volontairement exagéré les "pertes" de diamètre dominant liées aux coupes : les quatre premières éclaircies font perdre successivement 1,9/1,5/1,2/1,2 cm dans la N4, et 1,5/1/0,06/0,08 cm dans la N2. Les pertes cumulées sur D0 de 35 à 101 ans sont de 6,9 cm (N4) et 2,9 cm (N2). Ces prélèvements représentent l'enlèvement d'un grand nombre de "loups" ou de gros dominants gênant des arbres d'avenir. Nous avons supposé que 5-6 coupes de cette nature suffisaient à reconfigurer le peuplement d'un point de vue qualitatif. La rotation des coupes est de 6 ans jusqu'à 80 ans, puis 8 ans.

Le tableau V (ci-dessous) illustre les principales caractéristiques de la simulation. L'application d'une norme N4 en éclaircies très fortement par le haut conduit à des densités faibles ($Rdi = 0,4$) et des surfaces terrières qui dérivent de 11 à 27 m²/ha. La simulation N2, qui correspond mieux aux densités observées dans les placettes permanentes, mais avec des éclaircies plus par le haut, atteint le diamètre dominant de 55 cm à 100 ans : pour mémoire, dans les placettes permanentes, ce diamètre 55 cm est atteint à 100 ans sur la meilleure station de Retz, 115 ans à Eawy, 120 ans en forêt de Haye.

Tableau V **Résultats de la simulation de 3 scénarios sylvicoles pour le Hêtre**
(voir conditions dans le texte)

	Valeurs finales à 101 ans				à 35 ans	Moyennes sur 35-101 ans	
	N	G	Dg	D0	G	<i>Rdi</i>	lc(D0)
Traitement	/ha	m ² /ha	cm	cm	m ² /ha	—	mm
N4	94	27,5	61	61	11	0,4	3,57
N2	217	39	47,6	55	16	0,6	2,83
Témoin	480	53,5	37,7	49,2	25	1	2,16

Valeurs finales du nombre de tiges N, surface terrière G, diamètre moyen Dg et dominant D0 ; surface terrière après coupe à 35 ans, moyennes globales de l'indice de densité *Rdi* et de la largeur de cerne des 100 plus gros par hectare.

Sur l'ensemble de la période 35-101 ans, la moyenne des largeurs de cerne instantanées pour les 100 plus gros par hectare se différencie très nettement : par rapport au témoin, + 0,7 mm pour N2 et + 1,4 mm pour N4. Ces effets sont très nettement supérieurs à ceux obtenus par la méthode de régression multiple exposée plus haut. Le modèle est-il trop optimiste ? C'est ce que nous discuterons un peu plus loin.

Trajectoires du diamètre dominant

De 35 à 60 ans, le témoin reste "en tête du peloton" pour le diamètre dominant (figure 7, ci-dessous). Et pourtant, c'est bien lui qui pousse le plus lentement. On voit là l'effet technique accumulé des premiers prélèvements par le haut, qui amputent le gain biologique. Cela ne signifie pas que rien ne se passe, évidemment. D'après la forme du modèle, il y a conservation des rangs entre arbres quelle que soit la sylviculture (l'accroissement est fonction croissante du diamètre). Par conséquent, dans le témoin, les 100 plus gros de la fin sont les mêmes qu'au début, avec les défauts et qualités imaginables dans un peuplement non trié. Dans des peuplements éclaircis vigoureusement, les 100 plus gros à 60 ans viennent de nettement plus bas (les 94 restant à 100 ans en N4 avaient un diamètre moyen de 17 cm à 35 ans, contre 22 cm dans le témoin) : ceci reflète, certainement en l'exagérant, une sélection d'arbres d'avenir parmi les beaux sujets dominants et codominants, bénéficiant d'éclaircies intenses. Ce n'est qu'après 60 ans qu'on voit vraiment se "capitaliser" le gain d'accroissement, et l'on gagne pour finir 12 cm avec une même population statistique de 100 arbres.

Pour se rapprocher d'une démarche d'aménagiste, on peut comparer les traitements sylvicoles, non pas en cm de diamètre gagnés à un âge donné, mais en âge minimal pour atteindre un diamètre

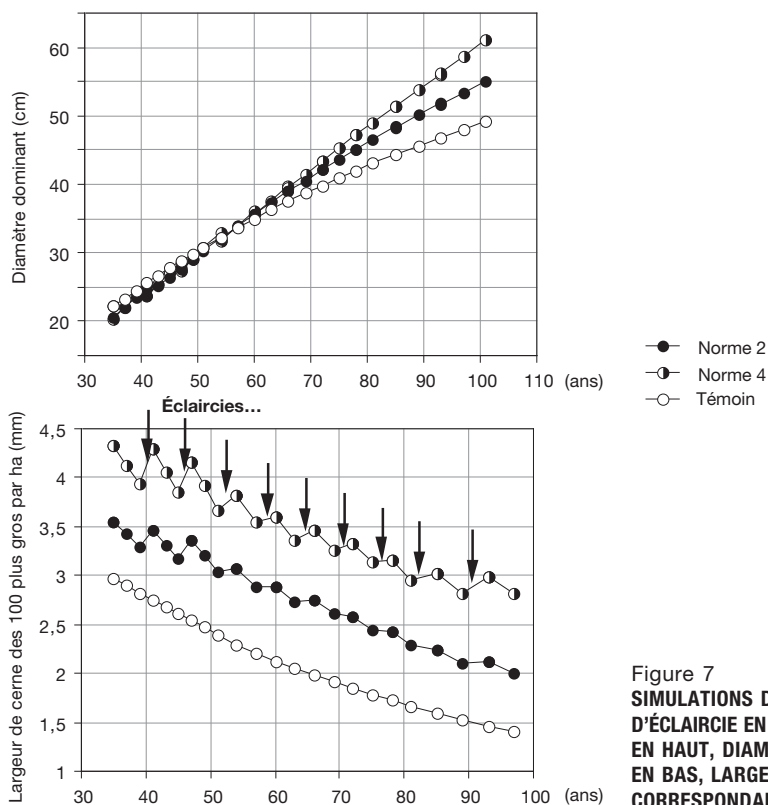


Figure 7
**SIMULATIONS DE 3 NORMES
 D'ÉCLAIRCIE EN HÊTRAIE :**
EN HAUT, DIAMÈTRE DOMINANT,
EN BAS, LARGEUR DE CERNE INSTANTANÉE
CORRESPONDANTE

fixé. Ainsi, le diamètre 50 cm serait atteint en N4 avec 20 ans d'avance sur le témoin. À 55 cm, l'avantage de N4 serait plus fort encore.

Le graphique des largeurs de cerne est intéressant, surtout dans le jeune âge. On remarque dans les deux peuplements éclaircis une structure en dents de scie, due aux coupes. La décroissance des largeurs de cerne est rapide après la coupe. Si l'on imagine que les coupes cessent et qu'on extrapole les petits segments vers le bas, on voit que l'accroissement revient au niveau du témoin en une quinzaine d'années environ. Par conséquent, même après une coupe initiale très forte, on a tout intérêt à garder le peuplement ouvert si l'on veut conserver l'avantage en croissance ; et cela sans risque de voir la production par hectare baisser si l'on reste au voisinage de la densité 1/2.

Les conséquences pratiques d'une telle simulation sont considérables : si tout cela est vrai (ou pas trop faux), on peut espérer amener des hêtraies à l'état-objectif retenu naguère (100 tiges par ha, de diamètre moyen 55 cm) vers 90-100 ans, même après une phase de concurrence prolongée jusqu'à 16 m de hauteur. Il faut rappeler que le peuplement simulé est très fertile [supérieur à la classe 9 de Schober (1972)] et que son état initial à 35 ans était déjà favorable (2 500 tiges de diamètre supérieur à 2,5 cm, $D_0 = 22$ cm) ; on peut comparer ces données aux valeurs mesurées dans les années 1920, au même âge, à Darney et Retz (resp. $H_0 = 15$ et 11,5 m, 10 000 tiges de diamètre supérieur à 0,5 cm, resp. $D_0 = 16$ et 14,6 cm).

Validité du modèle ?

Exposons deux expériences de validation : on a comparé les prévisions du modèle aux observations dans des situations non utilisées pour la calibration. La première, effectuée sur le dispositif danois de Totterup (Bryndum, 1987), a restitué très convenablement les tendances et les valeurs numériques (Dhôte, 1995). La seconde, concernant précisément Souilly entre 35 et 65 ans, en respectant scrupuleusement les états initiaux et éclaircies pratiquées, a donné les largeurs de cerne suivantes : simulée 3,912 mm contre 3,942 observée (norme 4), 3,37 mm contre 3,166 (norme 2), 3,131 mm contre 2,938 (norme 1) et 2,943 mm contre 2,811 (témoin). Là encore, la tendance est correcte, de même que les valeurs numériques.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une validation *sensu stricto*, on peut citer aussi l'exemple des expériences d'éclaircie intense au bénéfice d'arbres d'avenir (Route de Frouard et Darney, Bouchon, 1979 ; Bouchon *et al.*, 1989) : dès les niveaux intermédiaires d'éclaircie, l'effet stimulant existe, il s'amplifie progressivement avec l'intensité des coupes et les largeurs de cerne maximales obtenues (en croissance libre) sont de 6 mm à 40 ans, 4 mm à 80 ans. Depuis 1994, on commence également à voir dans l'essai de la Route de Frouard (données non publiées) des phénomènes très intéressants : au niveau d'éclaircie maximal (2 arbres dominants seulement sur 2 ares depuis 1981), il y a reprise d'élagage depuis trois ans et diminution très nette de l'accroissement radial. Cela indique une refermeture du couvert bien engagée et une baisse de productivité des houppiers, après 17 ans environ de croissance libre.

Ces considérations sont plutôt rassurantes quant à la validité du modèle, du moins pour sa composante sylvicole qui nous intéresse ici.

CONCLUSIONS

Chez le Hêtre et le Chêne sessile traités en futaie régulière, le diamètre dominant observable à l'instants t dépend de toute l'histoire passée : durée de régénération et soins juvéniles, avec une influence sur le démarrage, effet technique des éclaircies qui n'est pas négligeable dès qu'on marque des coupes énergiques et par le haut, stimulation de la croissance en réponse à la densité. Il est fondamental de bien distinguer ces facteurs en analysant un essai d'éclaircie.

L'effet sylvicole sur la croissance "pure" (hors effets statistiques) est clair pour les deux essences. Il est graduel dès les fortes densités et tend à s'accroître vers la limite inférieure des données disponibles, c'est-à-dire pour laquelle l'indice de densité est $Rdi = (N.D_g^\alpha) / \beta = \frac{1}{2}$

(normes N4-Hêtre et 70-Chêne d'Oswald, sur bonne station). Par une méthode de régression multiple, destinée à éliminer les autres sources de variabilité, on a estimé à 0,4 mm la différence de largeur de cerne entre des peuplements à densités 1/2 et 1. Cette valeur n'est pas très forte, puisqu'il faut un peu plus de 10 ans à un peuplement éclairci nettement par le haut pour rattraper un témoin. En raison du caractère sommaire du modèle utilisé, on doit considérer cette valeur de 0,4 mm comme un minimum.

Dans le cas du Hêtre, un modèle plus complexe permet de cerner plus précisément la réponse densité-croissance et conduit à prédire des effets stimulants nettement supérieurs. Ainsi, une simulation de scénarios témoin, Normes 2 et 4 (Oswald) entre 35 et 100 ans, sur très bonne station, donne des cernes plus larges de 0,7 mm et 1,4 mm, respectivement pour N2 et N4 par rapport au témoin. Malgré le coût représenté par plusieurs éclaircies par le haut, l'amélioration de la croissance se concrétise par un gain de 20 ans pour atteindre le diamètre dominant de 50 cm avec la norme 4. Et, bien entendu, on engrange au passage les bienfaits d'une sélection très énergique (amélioration de la qualité externe, cernes larges assurant une bonne qualité interne du matériau).

Ces comportements prédits sont en bon accord avec les résultats de plusieurs essais d'éclaircie plus courts, mais avec des traitements bien différenciés : essais INRA de Souilly, Route de Frouard et Darney (culture intensive au profit d'arbres d'avenir) et essai danois de Totterup (Bryndum, 1987). Le modèle de croissance Hêtre (synthèse des vieilles placettes expérimentales), ajouté à ces quelques essais plus récents, apportent finalement des indications concordantes en faveur de l'intérêt des éclaircies, même pour la population des arbres dominants.

Le dossier Chêne sessile, abordé par les mêmes méthodes depuis 1992, est un peu moins achevé. Les analyses actuelles confirment dans les grandes lignes le constat fait pour le Hêtre, bien que les deux essences aient des différences de comportement visibles dans les données de croissance. Ainsi, alors que la largeur des cernes est voisine de 1,7 mm en futaie dense sur bonne station, elle serait estimée d'après le modèle actuel à 3,5-4 mm environ en croissance libre (valeur cohérente avec les observations en taillis-sous-futaie). Entre ces deux situations, l'amélioration est graduelle et détectable statistiquement même dans la gamme des futaies classiques.

Pour revenir aux motivations sylvicoles à l'origine de cet article, on peut terminer par les quelques considérations suivantes :

- Peut-on atteindre les objectifs consignés dans les guides de sylviculture et les aménagements (âge et diamètre à l'exploitation finale, moyennant un scénario d'éclaircies) ? La réponse à cette question peut difficilement se faire par le simple bon sens ou la collection de quelques observations isolées. Le recours à des simulations nous paraît aujourd'hui la solution la plus rationnelle et la plus efficace. Par exemple, on peut définir quel itinéraire (rotation et nature des coupes, densité de peuplement) permet de réaliser telle largeur de cerne moyenne et tel diamètre à tel âge, et ce en faisant la part des différentes perturbations d'origine sylvicole (modification de la distribution par classes de diamètre, croissance stimulée). Un autre exemple est la définition de normes d'éclaircies adaptées à la fertilité de la station, qui est une préoccupation actuelle.
- Le régime de la futaie régulière n'est pas contradictoire par principe avec une bonne expression du potentiel de croissance individuel, au moins pour les deux essences qui nous intéressent. Pour peu qu'on martèle avec l'intensité appropriée, on peut provoquer une croissance plus vive. Cela réclame sans doute une mesure plus systématique de la densité des peuplements (surface terrière et nombre de tiges) et un meilleur contrôle des martelages, surtout en situation de rattrapage : ce qui importe pour la réaction des arbres en termes de croissance, ce n'est pas tant le volume exploité

que la densité du peuplement après coupe. Même si la réaction des arbres dominants n'est pas négligeable, elle demande une durée assez longue pour devenir visible à l'œil nu (ou au compas) : il ne faut donc pas se décourager et relâcher l'effort.

• L'inconnue principale liée aux régimes d'éclaircie forte concerne la fermeture du couvert, avec ses conséquences possibles : élagage naturel et développement de gourmands, sensibilité éventuellement plus forte au vent. Nous manquons actuellement d'éléments objectifs pour faire de bonnes prévisions sur les risques correspondants. Un projet de recherche en cours, financé par l'Union européenne, "Nouvelles alternatives sylvicoles dans les jeunes chênaies — Conséquences pour la production de bois d'œuvre de haute qualité" (coordonné par F. Colin, INRA-Croissance Champenoux) a pour objectif de clarifier la question de l'élagage et des gourmands. Concernant le Hêtre, on a certainement peu à craindre d'un peuplement en permanence entr'ouvert, car l'accroissement diminue avant même que les houppiers soient jointifs ; ici, le risque principal est bien plutôt de se laisser surprendre par la reconquête extrêmement rapide de l'espace.

J.-F. DHÔTE

Unité Associée ENGREF-INRA de Sciences forestières

Équipe "Dynamique des Systèmes forestiers"

14, rue Girardet

CS 4216

F-54042 NANCY CEDEX

Remerciements

Cet article reprend pour partie des résultats de recherches financées par l'Office national des Forêts (Contrats "Validation du modèle de croissance pour le Hêtre", 1991-92, "Sylviculture et Qualité du bois de Chêne sessile", 1992-96), la Direction de l'Espace rural et de la Forêt (Contrats "Relations entre milieu, structure des peuplements, croissance et qualité du Chêne", 1994-97) et l'Union européenne (Contrats "Forest planning and management tools" et "Production of quality wood from broadleaves", 1992-95). L'auteur remercie P. Duplat et J.-C. Hervé pour leurs critiques et suggestions.

BIBLIOGRAPHIE

- ARBONNIER (P.). — Les Places d'expérience de Sainte-Marie en forêt domaniale de Darney-Martinville. — *Bulletin de la Société forestière de Franche-Comté*, n° 3, 1958, pp. 3-15.
- BARTET (J.H.), PLEINES (W.). — Simulation de l'évolution de forêts régulières en fonction du traitement sylvicole. — *Journal forestier suisse*, vol. 72, n° 9, 1972, pp. 667-695.
- BOUCHON (J.), DHÔTE (J.-F.), LANIER (L.). — Réaction individuelle de Hêtres (*Fagus sylvatica* L.) d'âges divers à diverses intensités d'éclaircie. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 46, n° 3, 1989, pp. 251-259.
- BRYNDUM (H.). — Buchendurchforstungsversuche in Dänemark. — *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, vol. 158, n° 7/8, 1987, pp. 115-121.
- Bulletin technique de l'ONF*, octobre 1996, 80 p.
- DELVAUX (J.). — Contribution à l'étude de l'éducation des peuplements. IV. La compétition au niveau des classes sociales. — *Travaux Série B de la Station de Recherches des Eaux et Forêts, Groenendaal-Hoeilaart*, n° 32, 1966, 48 p.
- DHÔTE (J.-F.). — Modélisation de la croissance des hêtraies : dynamique des hiérarchies sociales et facteurs de production. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, n° 4, 1991, pp. 389-416.
- DHÔTE (J.-F.). — Validation du modèle de croissance pour le Hêtre : réponse de l'arbre et du peuplement à une large gamme de sylvicultures et dans une large aire géographique. — *Compte rendu final de la Convention INRA-ONF n° 91/02*, avril 1992.
- 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.). — A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, 1996a, pp. 1-20.

- DHÔTE (J.-F.). — Contribution au Rapport final de la Convention INRA-ONF 1992-96 "Sylviculture et Qualité du Bois de Chêne" (Responsable scientifique : G. Nepveu, INRA Champenoux). — 1996b.
- DHÔTE (J.-F.), HERCÉ (E. de). — Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de courbes hauteur-diamètre. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 24, 1994, n° 9, pp. 1782-1790.
- DUPLAT (P.). — Contribution au Rapport final du Contrat CEE-AIR-1 "Production of quality wood from broadleaves" 1992/1995 (Coordination : A. Franc, ENGREF, Paris). — 1995.
- HAUTOT (A.), DHÔTE (J.-F.). — Thème 2 : Relation entre structure des peuplements et croissance. — Rapport final, Contrat INRA-CEMAGREF "Étude des relations entre le milieu, la croissance et la qualité des Chênes indigènes", novembre 1994. — 1995. — 29 p.
- 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.
- LE GOFF (N.). — Tables de production. In : Le Hêtre / E. Teissier du Cros Ed.. — Paris : INRA, 1981. — Chapitre 6.2, pp. 326-338.
- LE THÉRY (R.), ROMAN-AMAT (B.). — Introduction générale. — *Bulletin technique de l'ONF*, octobre 1996, pp. 5-8.
- OSWALD (H.), DIVOUX (A.). — Dispositif expérimental d'éclaircie du Hêtre "Camp Cusson" en forêt domaniale d'Eawy. — Champenoux (France) : INRA-CNRF, 1978. — 9 p. + annexes (Document interne).
- OSWALD (H.). — Résultats principaux des places d'expérience de Chêne du Centre national de Recherches forestières. — *Revue forestière française*, vol. XXXIII, n° spécial "Sylvicultures en futaies feuillues", 1981a, pp. 65-85.
- OSWALD (H.). — Le Carré latin de Souilly. Dispositif expérimental d'éclaircie du Hêtre. — Champenoux (France) : INRA-CNRF, 1981b. — 14 p. (Document interne).
- PARDÉ (J.). — Sylviculture et production du Hêtre en forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle) et de Retz (Aisne). — *Notes techniques forestières. Station de Recherches et d'Expériences forestières, Nancy (France)*, 1962, 9 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.
- PIERRAT (J.-C.), HOULLIER (F.), HERVÉ (J.-C.), SALAS GONZALES (R.). — Estimation de la moyenne des valeurs les plus élevées dans une population finie. Application aux inventaires forestiers. — *Biometrics*, vol. 51, 1995, pp. 679-686.
- REINEKE (L.H.). — Perfecting a stand-density index for even-aged forests. — *J. Agric. Res.*, vol. 46, n° 7, 1933, pp. 627-638.
- SCHOBER (R.). — Die Rotbuche. — Frankfurt-am-Main : Sauerländer Verlag, 1972. — 333 p.

EFFETS DES ÉCLAIRCIES SUR LE DIAMÈTRE DOMINANT DANS DES FUTAIES RÉGULIÈRES DE HÊTRE OU DE CHÊNE SESSILE (Résumé)

Le diamètre dominant est la statistique la plus appropriée pour juger de l'effet des éclaircies sur la croissance des peuplements réguliers de feuillus. Une analyse menée sur les deux réseaux de trente placettes permanentes installées en hêtraies et chênaies au début du siècle permet de discerner et mesurer les différents effets des éclaircies, à court et long terme, sur cette statistique. La pratique d'éclaircies par le haut s'accompagne de légères baisses "techniques" du diamètre dominant. La réponse biologique du diamètre dominant est une stimulation très significative et graduelle de la croissance sous l'effet des éclaircies. Des modèles plus ou moins complexes sont nécessaires pour chiffrer ce gain. Lorsque la densité baisse de 1 à 0,5 fois la densité maximale biologique, le gain est pour les deux essences au minimum de 0,4 mm sur la largeur de cerne des 100 plus gros arbres par ha. Un modèle plus fin, pour le Hêtre, prévoit une stimulation de 1 mm sur bonne station. Pour les sylvicultures rapides actuellement préconisées, on peut donc raisonnablement escompter des révolutions raccourcies de 15 à 20 ans ou des diamètres plus gros aux âges d'exploitabilité actuels, tout en ménageant de bonnes possibilités de sélection sur la qualité.

EFFECTS OF THINNING ON DOMINANT DIAMETER IN EVEN-AGED BEECH AND SESSILE OAK GROVES (Abstract)

Dominant diameter is the most relevant statistic to assess the effects of thinning on growth of even-aged broadleaf stands. 2 networks of 30 permanent plots planted with Common Beech and Sessile Oak at the beginning of the century are analyzed so as to identify and assess the various long and short term effects of thinning on dominant diameter. Crown thinning gives rise to slight "technical" downward shifts in dominant diameter. Biologically, dominant diameter responds to thinning by a highly significant, gradual stimulation of growth rate. Models of varying degrees of complexity are used to quantify this gain. When stand density is lowered from 1 to 0.5 times the maximum sustainable density, the gain for both species is at least 0.4 mm on ring width for the 100 largest trees per ha. A finer-tuned model for the beech predicts a 1 mm-stimulation on favorable sites. For the more intensive sylviculture recommended in France today, one may reasonably forecast a 15-20 year decrease in rotations, or larger diameters obtained with present rotations, while offering opportunities for selection on the basis of quality.
