

Article original

Influence des éclaircies sur la forme de la section droite du tronc de *Pinus kesiya* dans la région du Mangoro (Madagascar) *

JP Bouillet ¹, F Houllier ²

¹ Mission CIRAD-CTFT, BP 745, Antananarivo, Madagascar;

² Unité ENGREF/INRA, dynamique des systèmes forestiers,
14, rue Girardet, 54042 Nancy cedex, France

(Reçu le 17 août 1992 ; accepté le 24 décembre 1992)

Résumé — L'excentricité de la section droite des tiges a des répercussions négatives d'un point de vue technologique. Le but des travaux en cours est de savoir si on peut influencer sur ce phénomène par des éclaircies adéquates, l'hypothèse de base étant que les éclaircies, en provoquant un développement non symétrique du houppier, entraînent une activité cambiale accrue dans la direction des arbres abattus. L'étude porte sur 15 arbres d'un CCT Plots, éclaircis 5 fois et âgés de 20 ans et sur 5 arbres de 14 ans éclaircis une fois. Des rondelles sont prélevées tous les mètres de 0,30 m à 5,30 m, puis tous les 2 m jusqu'à 15 cm de diamètre fin bout sur écorce. L'excentricité est quantifiée à partir des accroissements radiaux lus sur 16 rayons équirépartis. Dix indices de libération de la concurrence sont construits : ils font intervenir la distance et la dimension des voisins enlevés en éclaircie ainsi que leur orientation par rapport à l'arbre sujet. Il apparaît que : i) quels que soient les niveaux sur le tronc, l'évolution de l'excentricité de la section droite d'une tige ne dépend pas de la répartition des arbres partant en éclaircie, ii) il existe une bonne cohérence entre les formes observées aux différents niveaux du tronc, iii) la forme initiale de la section avant éclaircie est un prédicteur assez satisfaisant de l'évolution de l'excentricité après intervention, iv) dans la majorité des cas, la forme finale de la section peut être prédite à partir de sa forme à un stade précoce (pour un âge cambial d'environ 5 ans).

excentricité / forme du tronc / indice de compétition / *Pinus kesiya* / Madagascar

Summary — Influence of thinnings on the eccentricity of the stem of *Pinus kesiya* in the Mangoro region (Madagascar). The eccentricity of the section perpendicular to the stem axis (SPSA) presents technological drawbacks. The aim of this work is to explore whether and how much this phenomenon is influenced by thinnings; the basic hypothesis is that the release of competition associated with thinning leads to an asymmetrical development of the crown which induces an increased cambial activity in the direction of felled trees. Fifteen 20-year-old trees from a CCT-Plots trial that had been thinned 5 times and five 14-year-old trees belonging to stands that

* Travaux réalisés au DRFP/FOFIFA (département des recherches forestières et piscicoles du centre de recherches agronomiques pour le développement rural de Madagascar).

had been thinned once have been analyzed; disks were taken every meter from 0.3 m to 5.3 m and every 2 m up to a 15 cm top-end overbark diameter. The eccentricity was quantified by measuring 16 radii on each disk. Ten release-of-competition indexes were constructed including the distance, the size and the direction of the trees removed. The results suggest that: (1) the evolution of SPSA eccentricity is independent of the spatial distribution of thinned competitors; (2) the variation of SPSA form is consistent along the bole; (3) the initial (ie before thinning) SPSA form is a good indicator of the evolution of the eccentricity after thinning; and (4) in most cases the final SPSA form may be predicted from a very early SPSA form (ie when cambial age is about 5 yr).

eccentricity / stem form / competition index / Pinus kesiya / Madagascar

INTRODUCTION

Il est traditionnellement admis que la section droite d'une tige, c'est-à-dire la section perpendiculaire à l'axe, est un disque parfait ou quasi parfait alors que ceci reste en fait l'exception (Bouillet, 1993). Le cas de l'excentricité, parfois très prononcée de *Pinus pinaster* dans le massif des Landes (Polge et Illy, 1967 ; Boissieras, 1984 ; Coué *et al*, 1990) en est un exemple bien connu.

Or «l'excentricité» (*eccentricity*), qui englobe à la fois l'excentricité proprement dite (non concordance entre le centre de la section et la moelle de l'arbre) et le méplat dû à la croissance préférentielle d'un diamètre, a des répercussions négatives d'un point de vue technologique (Coué *et al*, 1990, Fournier, 1989).

Chez les résineux, le bois de compression s'observe souvent dans la zone de plus forte croissance radiale. Ses caractéristiques sont sensiblement différentes de celles du bois normal. En particulier, il présente des retraits longitudinaux beaucoup plus importants et tangentiels plus faibles. Par exemple, une conséquence notable pour le bois destiné au déroulage est que les plis sont généralement cassants, ce qui entraîne d'importants rebuts en cours de production. De la même façon, des déformations plus marquées qui peuvent être réductrices apparaissent lors du séchage (gauchissement des pièces...).

Une excentricité marquée implique que, lors des opérations de déroulage, le bois

situé dans la zone des accroissements les plus faibles est tranché radialement (succession bois final – bois initial). La conséquence est une production nettement plus importante de placages fendus ou cassés.

Un méplat prononcé conduit lors de la mise au carré ou au rond à de fortes pertes de matière.

Il apparaît donc important d'obtenir des arbres présentant une faible excentricité. Deux questions se posent alors : pourquoi et comment l'excentricité apparaît-elle ? peut-on l'éviter ou, tout du moins, la modifier grâce à une sylviculture appropriée et, en particulier, par des éclaircies adéquates ? Ces questions font l'objet d'un travail poursuivi à Madagascar au sein du DRFP/FOFIFA et dont les premiers résultats sont exposés dans le présent article.

HYPOTHÈSE DE TRAVAIL

(Remarque préliminaire : les résultats qui vont être présentés ne portent que sur l'influence des éclaircies sur l'excentricité du tronc en tant que telle et non sur le méplat.)

L'excentricité provient d'une activité cambiale plus importante sur une partie du périmètre de la section. L'hypothèse sur laquelle est basé le travail en cours est que les éclaircies, en provoquant un développement non symétrique du houppier, induisent une excentricité des sections. Cette hypothèse repose sur les 3 raisons suivantes.

Si on considère que la croissance en diamètre du tronc dépend d'une manière essentielle des produits de la photosynthèse (Wilson et Archer, 1983), il semble logique de penser qu'un apport plus important d'assimilats (sucres, acides aminés, ions) va favoriser l'activité cambiale. Or, si on admet que le flux de sève élaborée est axial avec peu de transfert latéraux (Zimmerman et Brown, 1971), des accroissements radiaux plus importants devraient s'observer dans la direction des arbres partant en éclaircie. Il convient cependant de préciser que, pour certains auteurs (Brunck *et al*, 1990 ; Baillères et Castera, 1991, comm pers), ce phénomène ne serait sensible qu'aux environs immédiats (quelques mètres au maximum) des branches dont le développement s'est trouvé favorisé.

Il est classiquement avancé que des facteurs hormonaux (auxines, gibberellines) entrent en jeu dans le fonctionnement du cambium (Delrot et Bonnemain, 1989 ; Larson, 1963 ; Wilson et Archer, 1981, 1983 ; Wilson, 1981 ; Morey et Cronshaw, 1968 ; Wilson et Archer, 1977, citée par Fournier, 1990 ; Lanner, 1985 ; Funada *et al*, 1989). Même si l'action précise de ces facteurs fait encore l'objet d'interprétations différentes (Champagnat, 1989 ; Jacquiot, 1984 ; Lachaud, 1992, comm pers), il est reconnu que les auxines sont produites pour l'essentiel dans le houppier (feuilles et bourgeons). Il n'est alors pas illogique de penser que la distribution de ces auxines puisse être influencée par le développement préférentiel du houppier dans une direction donnée.

S'il est suffisamment prononcé, un déséquilibre du houppier peut entraîner la formation de bois de réaction – bois de compression chez les résineux – accompagné d'un fonctionnement dissymétrique du cambium permettant à l'arbre de réagir contre ce phénomène (Fournier, 1990). Cependant, il faut noter que la valeur du déséquilibre seuil à partir duquel la régulation intervient

n'est pas directement appréhendable (espèce, taille et historique de l'individu).

Concernant le premier point, il est important de remarquer que le trajet de la sève élaborée le long du tronc n'a été que peu étudié et fait l'objet d'hypothèses différentes. En particulier, on peut envisager (Granier et Lachaud, 1991, comm pers) que, pour une même espèce, les types de flux soient comparables pour les sèves brutes et élaborées. Dans le cadre de notre étude, un flux de type hélicoïdal pourrait alors être retenu car il est souvent observé dans le xylème des résineux (Vité, 1959a, b ; Granier, 1977). La justification anatomique proviendrait de la présence chez les résineux de ponctuations aréolées latérales sur les trachéides du phloème, permettant théoriquement ce type de circulation (Esâu, 1969 ; Buvat, 1989). Cependant, il faut aussi noter qu'aucune étude concernant la circulation de la sève brute et *a fortiori* de la sève élaborée n'a été, à notre connaissance, menée sur *Pinus kesiya* et que des flux verticaux ou pseudo-verticaux s'observent aussi chez certains résineux (Vité, 1959a).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Caractéristiques de l'échantillon

Présentation générale

L'étude en cours concerne *Pinus kesiya*, pin tropical d'altitude, originaire d'Asie du Sud-Est, planté sur environ 50 000 ha dans la dépression du Mangoro. Le climat est tropical, d'altitude humide à influence orientale avec une pluviométrie annuelle d'environ 1 500 mm, une saison des pluies de novembre à mars et une température annuelle avoisinant 20°C. L'altitude moyenne est de 900 m. L'ensemble des individus étudiés se situent sur des terrains plats ou à pente très faible ($\leq 5\%$) correspondant aux plateaux qui portent les peuplements bien venants du massif (Malvos, 1980).

L'étude ne prend en compte que des individus dominants, devant rester *a priori* jusqu'à la fin de la révolution (200 à 300 tiges/ha à 25-30 ans dans les conditions du Mangoro). En effet, ce sont eux qui présentent, pour le gestionnaire des plantations, le plus grand intérêt économique. Dans cette optique, ces arbres doivent être bien conformés : pas de fourches et troncs droits ou pratiquement droits (la flèche maximum est de 1 cm/m). Cependant, il faut préciser que, dans la région du Mangoro, *Pinus kesiya* présente fréquemment une légère flexuosité sur les 50 premiers centimètres à la base du tronc ; ce défaut n'a pas été jugé rédhibitoire.

Les plantations de *Pinus kesiya*, espèce dont les propriétés technologiques peuvent être rapprochées de celles de *Pinus pinaster*, sont principalement destinées à produire du bois d'œuvre pour le sciage (charpente, menuiserie, ébénisterie) et, éventuellement, le déroulage.

Échantillon

Dispositif CCT plots

Quinze arbres abattus en décembre 1989 dans les parcelles H (passage de 200 à 120 tiges/ha) du CCT plots [*Correlated Curve Trend Plots* (Rakotondrainibe, 1992)] d'Ambodimandresy ont été analysés. Le tableau I résume l'historique des éclaircies réalisées sur ce dispositif. Ce dispositif où, théoriquement, les arbres choisis auraient dû pousser hors concurrence, a tout de même été retenu pour les raisons suivantes :

– il est vite apparu que toutes les éclaircies (sauf la première) ont été effectuées en retard (Rakotondrainibe, 1992) et que globalement les parcelles H n'avaient poussé que rarement en croissance libre. L'expérimentation suivie se rapproche en fait d'un dispositif d'éclaircies précoces (Loupe et Lefèvre, 1985) ;

– le dispositif a été mesuré annuellement et avec fiabilité depuis sa mise en place.

Essai 53

Cinq arbres de 14 ans appartenant à un dispositif sylvicole de comparaison d'éclaircies ont été étudiés : 2 arbres appartenant à une placette éclaircie systématiquement à 7 ans (1 ligne sur 3 enlevée) : 3 arbres venant d'une placette éclaircie sélectivement à 9 ans (1/3 des tiges enlevées sur la parcelle). Dans les 2 cas, la densité après éclaircie est d'environ 750 tiges/ha.

Niveaux étudiés

Pour ces 20 arbres, la limite supérieure de la partie étudiée du tronc a été définie comme ayant un diamètre de 15 cm sur écorce. Les différents niveaux de prélèvement des rondelles sont 0,30 m, 1,30 m, 2,30 m, 3,30 m, 4,30 m, 5,30 m puis tous les 2 m jusqu'à la limite précédemment mentionnée. Suivant les arbres étudiés, le dernier niveau prélevé se situe entre 7,30 m et 13,30 m. Si l'un des niveaux correspond à une couronne de branches, la rondelle est alors prélevée 20 cm plus haut pour se situer dans l'interverticille.

Tableau I. Historique des éclaircies effectuées sur le CCT Plots d'Ambodimandresy.

	Dates d'intervention							
	1970	1972	1976	1978	1981	1983	1986	1989
Placettes	A	B	C	D	E	F	G	H
Densité après éclaircie (tiges/ha)	2000	1200	800	600	450	300	200	120
Âge au moment de l'éclaircie	1	3	7	9	12	14	17	20

Les placettes A n'ont subi aucune éclaircie, les placettes B ont été éclaircies une fois en 1972, ..., les placettes H ont subi 7 éclaircies.

Caractérisation de l'excentricité et notations

Ce point a été développé dans un précédent article (Bouillet, 1993). On rappelle ici que la caractérisation de l'excentricité est basée sur l'identification des accroissements radiaux annuels à des vecteurs et sur l'évolution de leur somme. Il est alors possible de connaître l'excentricité entraînée par chacune des années de croissance et l'évolution du centre géométrique de la section ainsi définie depuis l'origine. On rappelle aussi qu'on peut rapprocher les observations faites à un même niveau pour différentes tiges et celles réalisées à différents niveaux d'une même tige.

Dans le cadre de notre travail, les accroissements radiaux sont mesurés au millimètre à la règle sur 16 rayons séparés de $2\pi/16$ radians. Nous utilisons les indices suivants : *i* pour désigner les arbres, *s* pour désigner les sections dans un arbre, *n* pour désigner les rayons d'une même section (fig 1). $R_{i,s,n}(t)$ désigne ainsi la valeur du rayon *n* de la section *s* de l'arbre *i* à la date *t*. Nous définissons aussi la largeur du dernier cerne formé : $\Delta R_{i,s,n}(t) = R_{i,s,n}(t) - R_{i,s,n}(t-1)$.

Indices de libération de la concurrence

Afin de mettre en évidence l'impact éventuel des éclaircies sur l'évolution de la forme de la section droite des tiges, nous avons conçu 10 indices de libération de la concurrence dont nous avons ensuite testé la capacité à prédire les variations d'excentricité.

Le voisinage des arbres étudiés a été circonscrit à un cercle de 7 m de rayon centré sur

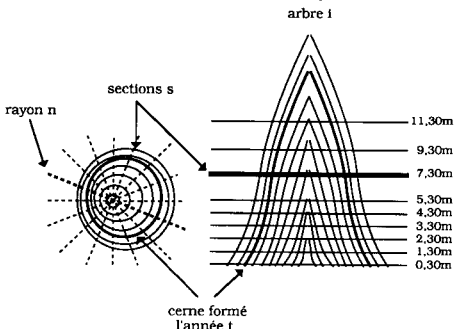


Fig 1. Plan d'échantillonnage pour un arbre.

l'arbre sujet, qui correspond à une densité d'environ 200 tiges/ha (densité sur l'ensemble des parcelles H du CCT Plots à la date d'abattage des arbres). Il est à remarquer que le choix d'une telle surface est identique à ceux adoptés par Pukkala (1989) sur *Pinus sylvestris* et par Castera (1992, comm per) sur *Pinus pinaster* dans les Landes de Gascogne.

On se place à une date *t*, au moment d'une éclaircie, et on considère une section *s* d'un arbre sujet *i*. Soit $k_i(t)$ le nombre d'arbres concurrents (*ie* situés à moins de 7 m de l'arbre *i*) enlevés en éclaircie à la date *t*. Soit *j* un arbre concurrent de l'arbre *i* ($1 \leq j \leq k_i(t)$) : on note $L_{i,j}$ la distance de l'arbre *i* au concurrent *j*, $\alpha_{i,j}$ l'azimut sous lequel l'arbre *i* voit l'arbre *j* et $D_j(t)$ le diamètre de l'arbre *j*.

Pour quantifier la magnitude de la libération de la concurrence due à l'élimination de l'arbre *j* on utilise les termes $D_j(t)/L_{i,j}$ ou $D_j(t)^2/L_{i,j}$ qui sont classiquement employés dans l'élaboration d'indices de concurrence dépendant des distances (Hegyí, 1974 ; Weiner, 1984 ; Bella, 1971 ; Pukkala et Kolstroëm, 1987 ; Hamilton, 1969 ; Daniels, 1976 ; Tomé et Burkhart, 1989 ; Spurr, 1962 ; Besse, 1984 ; Favrichon, 1991).

De plus, afin de rendre compte du caractère directionnel de la libération de la concurrence subie par l'arbre *i*, on introduit une pondération qui dépend de l'écart entre l'azimut du rayon *n* étudié sur l'arbre *i* ($1 \leq n \leq 16$), noté $\theta(n)$, et l'azimut $\alpha_{i,j}$ sous lequel l'arbre *i* voit son concurrent *j*. La fonction de pondération retenue est (fig 2) :

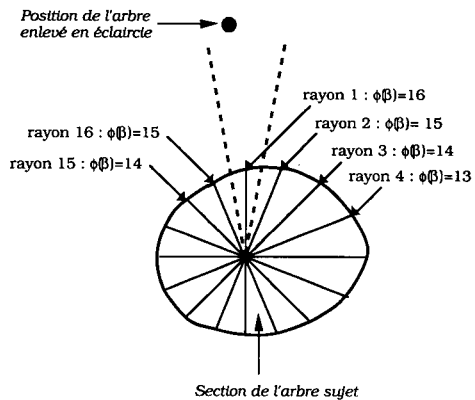


Fig 2. Valeur des pondérations affectées aux arbres concurrents dans le calcul des indices directionnels de libération de la concurrence. β = différence entre l'azimut du rayon *n* et l'azimut $\alpha_{i,j}$ sous lequel l'arbre *i* voit son concurrent *j*.

$$p_{i,j}(n) = \phi(|\theta(n) - \alpha_{i,j}|) / 16$$

$$\text{où } \begin{cases} \phi(\beta) = 16, & \text{si } |\beta| < \pi/16 \\ \phi(\beta) = 15, & \text{si } \pi/16 \leq |\beta| < 3\pi/16 \\ \dots \\ \phi(\beta) = 8, & \text{si } 7\pi/16 \leq |\beta| \end{cases}$$

Nous avons d'abord construit 2 indices de base IC1 et IC2 qui combinent directement les termes $D_j(t)/L_{i,j}$ (respectivement $D_j(t)^2/L_{i,j}$) et $p_{i,j}(n)$:

$$\begin{cases} IC1_{i,s,n}(t) = \sum_{i=1}^{k_i} p_{i,j}(n) \frac{D_j(t)}{L_{i,j}} \\ IC2_{i,s,n}(t) = \sum_{i=1}^{k_i} p_{i,j}(n) \frac{D_j(t)^2}{L_{i,j}} \end{cases}$$

Notons que ces indices ne dépendent pas de la section s considérée. Par ailleurs, le choix de la pondération $p_{i,j}(n)$ est évidemment arbitraire. Cependant, si la position des arbres enlevés en éclaircie a effectivement une influence sur la forme de la section droite des arbres bénéficiant de cette intervention, les corrélations entre les indices IC1 et IC2 et les accroissements observés après éclaircie sur les différents rayons étudiés doivent être élevées. À partir de IC1 et IC2 d'autres indices ont été conçus :

$$\begin{cases} ICR1_{i,s,n}(t) = R_{i,s,n}(t) IC1_{i,s,n}(t) \\ ICR2_{i,s,n}(t) = R_{i,s,n}(t) IC2_{i,s,n}(t) \end{cases}$$

Ces 2 indices ont été introduits pour intégrer l'histoire de l'arbre au travers du rayon R avant éclaircie et pour pouvoir, en particulier, expliquer qu'un rayon auquel correspondent des indices IC1 et/ou IC2 faibles peut quand même avoir une croissance forte du fait de sa valeur élevée avant éclaircie.

$$\begin{cases} IC\Delta R1_{i,s,n}(t) = \Delta R_{i,s,n}(t) IC1_{i,s,n}(t) \\ IC\Delta R2_{i,s,n}(t) = \Delta R_{i,s,n}(t) IC2_{i,s,n}(t) \end{cases}$$

Ces indices prennent en compte la croissance ΔR avant éclaircie pour expliquer, par exemple, qu'à un rayon de faibles IC1 et/ou IC2 peut correspondre une forte croissance due à une précédente éclaircie dans cette direction.

$$\begin{cases} IC\Delta G1_{i,s,n}(t) = R_{i,s,n}(t) \Delta R_{i,s,n}(t) IC1_{i,s,n}(t) \\ IC\Delta G2_{i,s,n}(t) = R_{i,s,n}(t) \Delta R_{i,s,n}(t) IC2_{i,s,n}(t) \end{cases}$$

Ces 2 indices prennent en compte le produit de R et ΔR , c'est-à-dire, approximativement, l'accroissement antérieur en surface terrière de la section considérée.

$$\begin{cases} IC/R1_{i,s,n}(t) = \frac{IC1_{i,s,n}(t)}{R_{i,s,n}(t)} \\ IC/R2_{i,s,n}(t) = \frac{IC2_{i,s,n}(t)}{R_{i,s,n}(t)} \end{cases}$$

À l'opposé du raisonnement ayant conduit à l'élaboration des indices ICR2 et ICR1, on peut envisager que, toutes choses étant égales par ailleurs, un rayon dans la direction duquel la concurrence a longtemps été marquée — ie R faible — va croître plus fortement (par exemple, par un phénomène de rééquilibrage du houppier lié à des problèmes de stabilité de l'arbre).

Calculs effectués

Variables étudiées

Nous avons cherché à prédire la variation de l'accroissement radial après éclaircie au sein d'une même section. Pour chaque rayon d'une section, nous avons introduit les variables :

– $\Delta RC_{i,s,n}(t) = R_{i,s,n}(t+\Delta t) - R_{i,s,n}(t)$ = accroissement du rayon après l'éclaircie effectuée à la date t ; cet accroissement a été calculé sur $\Delta t = 2$ ou 3 ans selon les cas (1976-78, 1978-81, 1981-83, 1983-86 et 1986-89 pour le CCT Plots : 1984-87 et 1986-89 pour l'essai 53).

$$- DEL_{i,s,n}(t) = \frac{\Delta RC_{i,s,n}(t)}{\Delta R_{i,s,n}(t)} = \text{rapport de l'accroissement après l'éclaircie effectuée à } t \text{ et de l'accroissement avant éclaircie.}$$

Les variables indépendantes candidates pour la prédiction de $\Delta RC_{i,s,n}(t)$ et $DEL_{i,s,n}(t)$ sont les indices de libération de la concurrence calculés à la date d'éclaircie, le rayon avant éclaircie, $R_{i,s,n}(t)$,

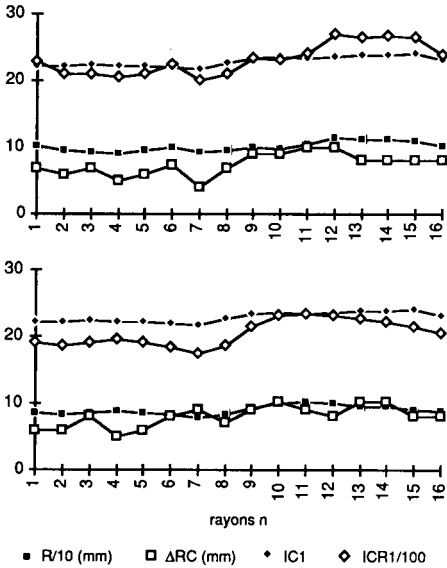


Fig 3. Extrait des données utilisées pour étudier la déformation d'une section. Pour un arbre, à une date donnée (1981) et à 2 niveaux dans l'arbre (1,30 m et 4,30 m), sont représentés, en fonction de l'azimut (rayon *n*) : 2 indices directionnels de libération de la concurrence, IC1 et ICR1, la valeur initiale du rayon avant éclaircie, R(*t*), et l'accroissement radial ΔRC(*t*) après éclaircie.

et l'accroissement du rayon avant éclaircie, ΔR_{i,s,n}(*t*). Le choix de ces variables correspond à l'étude de modèles du type :

- ΔRC = f (état physiologique à *t*) + gain (libération de la concurrence) ;
- ou ΔRC = f (état physiologique entre *t*-1 et *t*) + gain (libération de la concurrence) ;

Les données de base utilisées sont illustrées à la figure 3.

Étude des corrélations entre variables

Afin de mettre en évidence les éventuelles relations de l'accroissement radial après éclaircie (variables ΔRC et DEL) avec les rayons initiaux, leur accroissement antérieur et les indices de libération de la concurrence, nous avons calculé les

coefficients de corrélation entre les variables de ces 2 groupes pour chacune des sections (rondelles) de chaque arbre étudié ; les individus, au sens statistique, étant déterminés par les 16 directions de mesure sur chaque rondelle. La figure 4 illustre différentes situations correspondant à des valeurs diverses des coefficients de corrélation.

Pour s'affranchir des hypothèses de linéarité et de normalité, nous avons utilisé le coefficient de corrélation des rangs de Spearman (Dagnélie, 1973), noté *r_s*. Après une première analyse des valeurs de ces coefficients, nous avons cherché à mettre en évidence l'effet spécifique des coefficients de libération de la concurrence en calculant des coefficients de corrélation partielle.

Qu'il s'agisse de corrélation partielle ou totale, la méthode a consisté à étudier la distribution observée des valeurs de *r_s* calculées pour les différents arbres, sections et dates. Considérons, par exemple, ΔRC et l'indice IC1 : en l'absence d'effet directionnel de la libération de concurrence (tel que mesuré par IC1) et en considérant que α_{i,j} est uniformément et aléatoirement distribuée entre 0 et 2π, on s'attendrait en effet à trouver que la distribution des coefficients de corrélations entre ΔRC et IC1 est symétrique et centrée sur 0 ; inversement, en cas d'effet directionnel et stimulant des éclaircies sur l'accroissement radial, on s'attendrait à observer des corrélations positives. (Un raisonnement identique a été tenu pour les autres indices de concurrence et les autres variables indépendante, R et ΔR.)

RÉSULTATS

Corrélations totales

Remarques préliminaires

Les résultats présentés ci-dessous concernent les accroissements observés après éclaircie (ΔRC), mais nous obtenons des résultats équivalents quand nous considérons les accroissements transformés (DEL). Comme les résultats sont très comparables par type d'indices (IC1 et IC2, ICR1 et ICR2...), nous donnons les moyennes observées pour chacun de ces types.

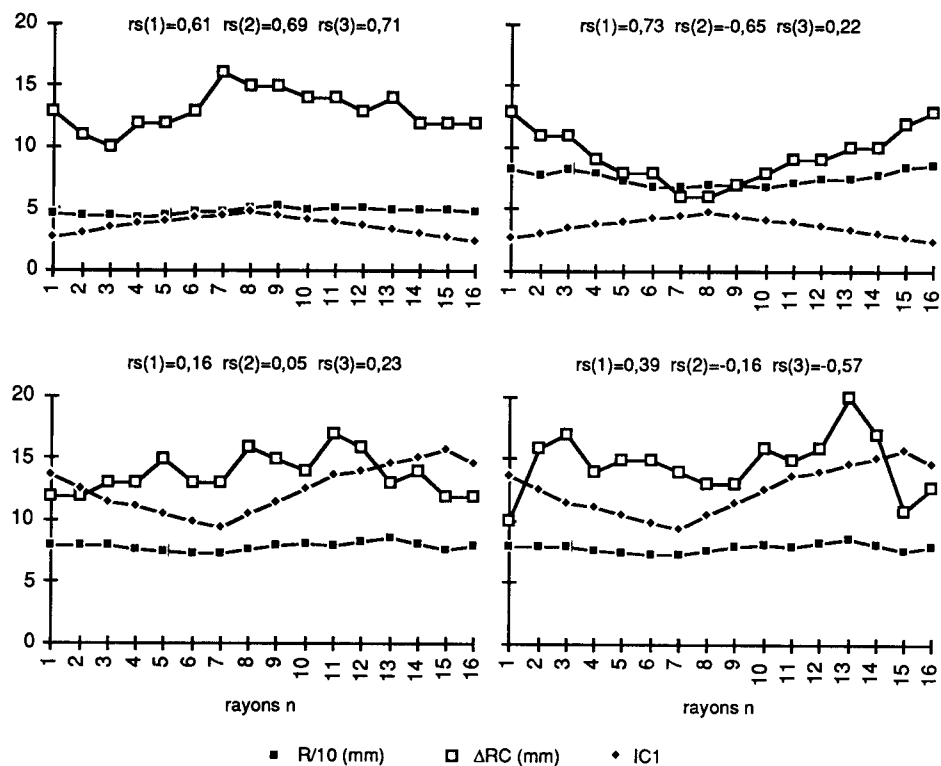


Fig 4. Corrélations entre l'indice de libération de la concurrence, IC1, le rayon initial, R, et l'accroissement radial après éclaircie, ΔRC . Exemples de sections appartenant à différents arbres. $r_s(1)$ = coefficient de corrélation des rangs entre ΔRC et R. $r_s(2)$ = coefficient de corrélation des rangs entre ΔRC et IC1. $r_s(3)$ = coefficient de corrélation des rangs partiel entre ΔRC et IC1 sachant R.

Tableau II. Corrélation entre l'accroissement radial après éclaircie, ΔRC , et les indices de libération de la concurrence : IC1, IC2, IC/R1 et IC/R2.

	IC1 et IC2				IC/R1 et IC/R2			
	$[-1, -0,5]^*$	$]-0,5, 0]^*$	$]0, .5]^*$	$]0,5, 1]^*$	$[-1, -0,5]^*$	$]-0,5, 0]^*$	$]0, .5]^*$	$]0,5, 1]^*$
CCT Plots	19,6	26,8	30,5	23,1	26,7	34,3	28,7	10,3
Essai 53	27,6	26,3	25,0	21,1	46,1	28,9	18,4	6,6

Distribution (en %) de la valeur du coefficient de corrélation. Calculs effectués sur la totalité des sections échantillonnées. * Valeur de r_s .

Tableau III. Corrélation entre l'accroissement radial après éclaircie, ΔRC , et les indices de libération de la concurrence : ICR1, ICR2, $IC\Delta R1$, $IC\Delta R2$, $IC\Delta G1$ et $IC\Delta G2$.

	<i>ICR1 et ICR2</i>				<i>IC$\Delta R1$ et IC$\Delta R2$</i>				<i>IC$\Delta G1$ et IC$\Delta G2$</i>			
	[-1,-.5]*[-.5,0]*[0,.5]*].5,1]*				[-1,-.5]*[-.5,0]*[0,.5]*].5,1]*				[-1,-.5]*[-.5,0]*[0,.5]*].5,1]*			
CCT Plots	15,6	23,9	31,6	28,9	5,4	28,1	41,5	25,0	4,2	27,1	39,2	29,5
Essai 53	13,2	30,3	19,7	36,8	4,3	27,1	48,6	20,0	1,4	32,9	31,4	34,3

Distribution (en %) de la valeur du coefficient de corrélation. Calculs effectués sur la totalité des sections échantillonnées. * Valeur de r_s .

Analyse globale portant sur toutes les sections de tous les arbres

Indices IC1 et IC2 et ICR1 et IC/R2

Les accroissements après éclaircie et les indices ne semblent être que très peu corrélés (tableau II). Pour IC1 et IC2 (respectivement IC/R1 et IC/R2), il apparaît que des valeurs de $r_s \geq 0,5$ ne s'observent que dans environ 25% des cas (respectivement 10%) et que des valeurs négatives de r_s sont notées dans au moins 45% des cas (respectivement 60%).

Indices ICR1 et ICR2, $IC\Delta R1$ et $IC\Delta R2$, $IC\Delta G1$ et $IC\Delta G2$

Les corrélations positives entre les indices et la croissance observée sont plus fréquentes (tableau III). De plus, le nombre de

cas où $r_s \leq -0,5$, diminue notablement. Cependant, même pour $IC\Delta G1$ et $IC\Delta G2$ qui sont les indices les plus régulièrement corrélés aux variations de l'accroissement radial, les résultats ne sont pas satisfaisants. En effet : des valeurs négatives de r_s s'observent environ 1 fois sur 3 ; des valeurs de $r_s \geq 0,5$ ne sont notées que dans moins du tiers des cas.

Longueur des rayons (R)

En fait, l'amélioration des résultats obtenus avec ICR1, ICR2, $IC\Delta G1$ et $IC\Delta G2$ provient de la prise en compte dans ces indices de l'historique de l'arbre, synthétisé par la valeur R des différents rayons. Il apparaît en définitive que, parmi toutes les variables étudiées, le rayon avant éclaircie est la variable qui est la mieux corrélée avec les accroissements observés durant les 2 ou 3 années suivant l'intervention (tableau IV).

D'une manière générale, nous constatons donc que les indices de libération de la concurrence rendent mal compte de l'évolution de la forme de section, tandis que l'évolution de l'excentricité de la section d'une tige est assez bien corrélée à la forme initiale de la section avant intervention.

Tableau IV. Corrélation entre l'accroissement radial après éclaircie, ΔRC , et la longueur des rayons avant éclaircie.

	[-1,-.5]* [-.5,0]* [0,.5]*].5,1]*			
CCT Plots	2,9	19,3	36,6	41,2
Essai 53	7,9	18,4	26,3	47,4

Distribution (en %) de la valeur du coefficient de corrélation. Calculs effectués sur la totalité des sections échantillonnées. * Valeur de r_s .

Variation de l'excentricité entre niveaux d'une même tige

Pour mettre en évidence la variation des croissances observées le long de la tige,

les corrélations entre les accroissements radiaux mesurés à différents niveaux ont été calculées. Dans le tableau V, le niveau 2,30 m a été pris comme référence. On note une bonne cohérence le long du tronc pour les différents accroissements après éclaircie ainsi que pour les rayons finaux. Nous avons cependant relevé que les informations dans la bas de la tige (niveau 0,30 m) ne sont que modérément corrélées à celles observées aux niveaux supérieurs.

Corrélations partielles

Comme il est apparu que le rayon avant éclaircie présente dans l'ensemble une bonne corrélation totale avec l'accroissement après intervention, il nous a semblé intéressant de calculer les corrélations partielles r_s (IC1, ΔRC | R) et r_s (IC2, ΔRC | R). L'hypothèse est que l'effet éventuel de IC1 ou IC2 et donc de la répartition des voisins enlevés en éclaircie sur les accroissements ultérieurs n'apparaît pas à cause de l'influence prépondérante de R (cf «Analyse globale portant sur toutes les sections de tous les arbres»).

Le tableau VI résume les résultats obtenus. Il apparaît que les distributions de la valeur des coefficients de corrélations partielles et totales sont assez comparables avec cependant une fréquence de $r_s \geq 0,5$ plus faible pour les corrélations partielles.

Conclusion partielle

Les accroissements observés après éclaircie sont mal corrélés avec les indices de libération de la concurrence que nous avons proposés. Deux explications peuvent être avancées.

Les individus enlevés étaient trop loin pour avoir une influence mais cette hypothèse ne peut être raisonnablement envisagée pour tous les arbres (exemple de l'arbre 19 du Bloc 4 dont 2 voisins situés à 3,20 m et 3,60 m ont été enlevés en 1976, mais pour lequel r_s est négatif pour 5 niveaux sur 6).

La position des voisins enlevés n'a pas d'impact direct sur la forme de la section droite des tiges. Un exemple en est donné par les 2 arbres de l'essai 53 ayant subi une éclaircie systématique à 7 ans et abattus à 14 ans : dans un cas, les accroissements

Tableau V. Corrélation entre les accroissements radiaux observés à 2,30 m et aux niveaux 1,30 m, 4,30 m, 7,30 m et 11,30 m.

Dispositif	Variable	Niveaux							
		1,30 m		4,30 m		7,30 m		11,30 m	
		[0,5]*]5,1]*	[0,5]*]5,1]*	[0,5]*]5,1]*	[0,5]*]5,1]*
CCT Plots	$\Delta RC(76)$	60,0	26,7	30,8	38,5	20,0	40,0	—	—
	$\Delta RC(81)$	46,7	33,0	46,7	20	40	26,7	12,5	62,5
	R(89)	46,7	46,7	13,3	73,3	33,3	60,0	60,0	40,0
Essai 53	$\Delta RC(84)$ et $\Delta RC(86)$	20,0	80,0	20,0	60,0	25,0	50,0	—	—
	R(91)	20,0	60,0	0,0	60,0	40,0	20,0	—	—

Fréquence (en %) des coefficients de corrélation positifs. Calculs effectués sur la totalité des sections échantillonnées ; * valeur de r_s ; (—) données manquantes.

Tableau VI. Corrélation entre l'accroissement radial après éclaircie, ΔRC , et les indices de libération de la concurrence IC1 et IC2.

	Dispositif	Valeur de r_s			
		$[-1,-.5]$	$]-.5,0]$	$]0,.5]$	$]1,1]$
Corrélation totale	CCT Plots	19,6	26,8	30,5	23,1
	Essai 53	28,6	26,3	25,0	21,1
Corrélation partielle	CCT Plots	27,6	26,3	25,0	21,1
	Essai 53	18,4	34,2	36,8	10,5

Distribution (en %) de la valeur des coefficients de corrélation totale et partielle (sachant R). Calculs effectués sur la totalité des sections échantillonnées.

radiaux les plus importants ont été globalement observés dans la direction de la ligne partie en éclaircie ; pour l'autre individu, c'est le phénomène inverse qui s'est déroulé.

Forme caractéristique prédictrice précoce

Les résultats présentés dans cette partie ne concernent que les arbres du CCT Plots. En effet, les tiges de l'essai 53 sont trop jeunes pour qu'il soit possible d'en tirer valablement des conclusions.

En relation avec ce qui a été avancé en «Corrélations partielles» et «Conclusion

partielle», un résultat est à mettre en exergue : souvent une forme de la section, bonne prédictrice de la forme finale, apparaît précocement à un âge cambial noté X (âge compté depuis la moelle) qui est au plus égal à 8 ans. Pour déterminer X, nous avons choisi une valeur minimale du coefficient de corrélation égale à 0,5 et nous avons cherché l'âge cambial minimum tel que pour tout âge Y supérieur à X, le coefficient de corrélation soit supérieur à ce seuil. Sur 133 sections prises en compte, 85,7% ont une forme prédictrice précoce (tableau VII). Cette proportion reste élevée — ie 72% — si on relève le seuil du coefficient de corrélation à 0,71 (soit $r_s^2=0,5$). À

Tableau VII. Principales caractéristiques des tiges présentant une forme prédictrice précoce.

	Niveaux									
	0,30 m	1,30 m	2,30 m	3,30 m	4,30 m	5,30 m	7,30 m	9,30 m	11,30 m	13,30 m
A (ans)	1	2	2	3	3	4	5	7	8	9
F	11/14 ^a	13/15	12/15	13/15	12/15	11/14 ¹	14/15	13/14	10/10	5/6
x (ans)	5,5	5,0	4,9	4,8	4,9	4,5	5,0	5,0	4,8	4,8

^a 14 au lieu de 15 car une rondelle n'a pu être lue correctement ; A = âge depuis la plantation auquel le niveau de mesure a été atteint ; F = fréquence des rondelles présentant une forme prédictrice précoce (ie telles que $r_s(R(89),R(1_x)) \geq 0,5$) ; X = âge cambial moyen d'apparition de la forme prédictrice précoce. Calculs effectués sur les sections des arbres du CCT Plots.

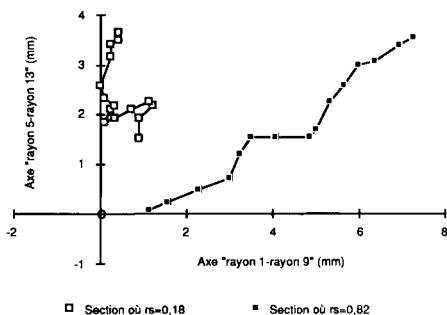


Fig 5. Évolution de l'excentricité de 2 rondelles avec $r_s(R(89)-R(t_x), R(t_x))$ faible ou $r_s(R(89)-R(t_x), R(t_x))$ élevé. t_x est la date à laquelle une forme prédictrice précoce est détectée ; l'axe R1-R9 est déterminé par les premier et neuvième rayons (qui sont opposés l'un à l'autre). L'axe R5-R13 est perpendiculaire au précédent et correspond aux cinquième et treizième rayons. 0 est la moelle du tronc.

titre indicatif, X se situe en moyenne le plus souvent entre 4 et 5 ans.

Afin de mieux cerner l'évolution de l'excentricité après l'année t_x associée à l'âge X , la corrélation entre la forme à l'année t_x , $R(t_x)$, et l'accroissement radial ultérieur, $R(89)-R(t_x)$, a été calculée. Deux cas de figure peuvent en effet être envisagés (fig 5) :

– la rondelle continue à s'excentrer dans la même direction : la corrélation $r_s(R(t_x), R(89)-R(t_x))$ est positive : et la corrélation $r_s(R(89), R(t_x))$ est alors élevée ($r_s > 0,5$) ;

– l'excentricité évolue peu : la corrélation $r_s(R(t_x), R(89)-R(t_x))$ est faible.

Il s'avère en fait que c'est le premier cas qui est très majoritairement observé puisque les corrélations $r_s(R(t_x), R(89)-R(t_x))$ sont nettement positives (tableau VIII). Pour chacune de ces sections, apparaît donc rapidement une excentricité caractéristique qui s'accroît durant la vie de l'arbre.

Parmi les sections (19 sur 133) ne présentant pas rapidement une forme fortement corrélée avec la forme finale, 3 cas sont à prendre en compte.

- Rondelles centrées : 2 rondelles ont été continuellement centrées (coordonnées du centre de gravité défini en « caractéristiques de l'échantillon » n'excédant pas 2 mm sur chacun des axes de référence). D'une manière logique, il n'existe pas de forme précoce bien corrélée au sens statistique avec la forme finale car le centre de gravité de la section varie autour de la moelle de l'arbre. Cependant, la forme finale peut quand même être rapidement prédite : la rondelle reste centrée.

- Rondelles longtemps centrées présentant une faible excentricité finale : 5 sections rentrent dans ce cas de figure ; centrées au moins jusqu'en 1985, elles se sont ensuite légèrement excentrées (coordonnées du centre de gravité n'excédant pas 4 mm sur chacun des axes de référence). Les mêmes conclusions que précédemment peuvent être avancées.

Tableau VIII. Corrélation entre la forme prédictrice précoce, $R(t_x)$, et l'accroissement radial ultérieur, $R(89)-R(t_x)$: $r_s(R(t_x), R(89)-R(t_x))$

Valeur de r_s	$r_s < -0,5$	$-0,5 \leq r_s < -0,25$	$-0,25 \leq r_s < 0$	$0 \leq r_s < 0,25$	$0,25 \leq r_s \leq 0,5$	$0,5 \leq r_s < 0,75$	$0,75 \leq r_s$
F	1,5	1,5	1,5	10,8	26,2	35,4	23,1

F = fréquence (en %) de la valeur des coefficients de corrélation (calculs effectués sur la totalité des sections échantillonnées (sur les arbres du CCT Plots) présentant une forme prédictrice précoce).

Tableau IX. Rondelles excentrées et ne présentant pas une forme prédictrice précoce : âge cambial, X , à partir duquel $r_s(R(t_x), R(89)) \geq 0,5$ et nombre de rondelles correspondantes (arbres du CCT Plots).

X (ans)	9	10	11	12	13	14	15
Nombre de rondelles avec $r_s(R(89), R(t_x)) \geq 0,5$	5	2	2	0	1	1	1

– Autres rondelles : pour 12 rondelles (9% des cas), la forme finale ne peut être caractérisée que tardivement (tableau IX). Cependant, il faut noter que pour seulement 5 rondelles (3,8 % des sections étudiées), X est supérieur à 10 ans.

En prenant $r_s(R(t_x), R(89)) \geq 0,5$, il apparaît que, sur les 15 arbres étudiés, 6 présentent une forme prédictrice précoce sur l'ensemble du tronc, 2 diffèrent des précédents par l'existence de 1 ou 2 rondelles centrées ou peu décentrées ; parmi les 7 individus restants, seuls 3 se caractérisent par plusieurs sections (2, 3 et 4) où un tel type de corrélation ne peut être établi que tardivement. Pour les 3 quarts des individus, il apparaît donc rapidement une excentricité caractéristique sur toute, ou presque, la longueur du tronc.

CONCLUSIONS

Quels que soient les niveaux pris en considération, l'évolution de l'excentricité de la section droite d'une tige ne dépend pas de la répartition des voisins enlevés en éclaircie : les accroissements radiaux les plus importants ne s'observent pas forcément dans la direction de ces derniers. Il existe une bonne cohérence entre les formes observées à différents niveaux, sauf tout en bas de la tige.

Un prédicteur relativement satisfaisant de l'évolution de cette excentricité après

une éclaircie est la forme initiale de la section avant intervention. Dans la majorité des cas, on observe rapidement une forme de la section, qui fournit une bonne prédiction de la forme finale ; il apparaît ainsi une excentricité caractéristique qui s'accroît durant la vie de l'arbre.

Ces premiers résultats sont cohérents avec les observations faites par Daniels et Schutz (1975) et par Kramer *et al* (1971) : ils observent, en effet, que les plantations en ligne ou à maille rectangulaire n'induisent pas une déformation privilégiée des tiges (méplat). Ces résultats demandent cependant à être confirmés en étudiant un échantillon plus important d'arbres placés dans des situations de concurrence variées au sein de peuplements éclaircis ou non (exemples : parcelles non éclaircies, arbres de bordure).

D'autres hypothèses peuvent être formulées à propos de l'origine de l'excentricité des tiges : elles sont soit de nature mécanique (effet des vents dominants), soit de nature radiative (différence de température du cambium selon l'exposition et la position autour de la tige). Des travaux concernant l'amplitude et l'orientation géographique de l'excentricité sont donc en cours afin de mieux cerner l'origine et l'évolution de ce phénomène.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M Lefèvre (mission CIRAD-CTFT, BP745, Antananarivo, Madagascar) pour sa collaboration technique.

RÉFÉRENCES

- Bella IR (1971) A new competition model for individual trees. *For Sci* 17 (3), 364-372
- Besse F (1984) Contribution à l'étude de l'influence de l'environnement sur la croissance du Ba en forêt de Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA, Université de Nancy I, 87 p

- Boisseri ras A (1984) Recherche de prédicteurs juvéniles de l'aptitude génétique à la croissance en volume chez le pin maritime : détermination de l'âge optimum pour la sélection. Mémoire de stage, option «Forêt» de l' cole forestière de Meymac, INRA (Bordeaux), 32 p
- Bouillet JP (1993) Méthodologie pour caractériser la forme de la section droite d'une tige et son évolution au cours du temps. *Ann Sci For* 50, 2, 187-204
- Brunck F, Grison F, Maitre HF (1990) L'Okoum  : monographie. CIRAD, Centre technique forestier tropical, 102 p
- Buvat R (1989) *Ontogeny, cell differentiation and structure of vascular plants*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 581 p
- Champagnat P (1989) Rest and activity in vegetative buds of trees. *Ann Sci For* 46 (suppl-Forest Tree Physiology) 9-26
- Coué JC, Guitard D, Baill res H (1990) Stabilité dimensionnelle des contreplaqués à base de bois d'essences différentes. Compte rendu de fin d'étude d'une recherche financée par le ministère de la Recherche et de la Technologie, décision d'aide N 88-A-0339, 29 p
- Dagnélie P (1973) *Théorie et méthodes statistiques*. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, 378 p
- Daniels RF (1976) Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *For Sci* 22 (4), 454-456
- Daniels FW, Schutz CJ (1975) Rectangular planting patterns in Pinus stands in the Eastern Transvaal. *For South Africa* 16 (février), 61-62
- Delrot S, Bonnemain JL (1989) Phloem loading and unloading. *Ann Sci For* 46 (suppl Forest Tree Physiology) 786-796
- Es u K (1969) *The phloem. Encyclopedia of plant anatomy*, Bornt ger, Berlin, Stuttgart, 505 p
- Favrignon V (1991) Sur quelques relations entre la croissance des arbres et la structure du peuplement en forêt semi-décidue (République centrafricaine). Mémoire de DEA, Université Pierre-et-Marie-Curie (Paris VI), 40 p
- Fournier M (1989) Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standart. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 257 p
- Funada R, Kubo J, Fushitani M (1989) Vertical distribution of annual ring characteristics in relation to the crown profile in Akmatsu (*Pinus densiflora*). *Mokuzai Gakkaishi*, 35 (10), 944-947
- Granier A (1977) Transfert de s ve brute dans le tronc des arbres, aspects m thodologiques et physiologiques. *Ann Sci For* 34 (1), 17-45
- Hamilton GJ (1969) The dependence of volume increment of individual trees on dominance, crown dimensions, and competition. *Forestry* 42, 133-144
- Hegy  F (1974) Simulation model for managing Jack-Pine stands. In: *Growth models for tree and stand simulation* (J Fries, ed), Royal College of Forestry, Department of Forest Yield Research, Research Notes, 30, 74-90
- Jacqui t C (1984) Sur la physiologie des arbres forestiers. *Rev For Fr*, XXXVI (2), 113-121
- Kramer H, Dong PH, Rusack HJ (1971) Untersuchung der Baumqualit t in weitst ndig begr ndeten Fichtenbest nden. *Allg Forst Jagd Ztg* 142 (2) 33-46
- Lanner RM (1985) On the insensitivity of height growth to spacing. *For Ecol Manag* 13, 143-148
- Larson PR (1963) Stem form development of forest trees. *For Sci* (Monograph) 5, 42 p
- Loupe D, Lefèvre M (1985) Compte rendu d'installation d'un essai d'éclaircies dans un peuplement de *Pinus kesiya*  g  de 14 ans, essai Mangoro N  54. DRFP/FOFIFA (Madagascar), note 539, 13 p
- Malvos C (1980) Rôle du potassium et du phosphore sur la croissance des reboisements de *Pinus kesiya*   Madagascar. Thèse de docteur-ingénieur, université de Nancy I, 134 p
- Morey PR, Cronshaw J (1968) Developmental changes in secondary xylem of *Acer rubrum* induced by gibberellic acid, various auxins and 2, 3, 5-tri-iodobenzoic acid. *Protoplasma* 65, 315-326
- Polge H, Illy G (1967) Observations sur l'anisotropie du pin maritime des Landes. *Ann Sci For* 24 (3), 205-231
- Pukkala T (199) Methods to describe the competition process in a tree stand. *Scand J For Res* 4, 187-202
- Pukkala T, Kolstro m T (1987) Competition indices and the prediction of radial growth in Scots Pine. *Silva Fennica* 21 (1), 55-67
- Rakotonrainibe C (1992)  valuation du dispositif CCT Plots d'Ambodimandresy sur *Pinus kesiya*. Mémoire de DEA, ESSA-For ts, universit  d'Antananarivo, Madagascar

- Spurr SH (1962) A measure of point density. *For Sci* 8 (1), 85-96
- Tomé M, Burkhardt HE (1989) Distance dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *For Sci* 35 (3), 816-831
- Vité JP (1959a) The water conducting systems in conifers and their importance in the distribution of trunk injected chemicals. *Contr Boyce Thomson Inst* 20 (1), 27-38
- Vité JP (1959b) Observations on the movement of injected dyes in *Pinus ponderosa* and *Abies concolor*. *Contr Boyce Thomson Inst* (20) 1, 7-26
- Weiner J (1984) Neighbourhood interference amongst *Pinus rigida* individuals. *J Ecol* 72, 183-195
- Wilson BF (1981) Apical control of diameter growth in white pine (*Pinus strobus* L.). *For Sci* 27 (1), 95-101
- Wilson BF, Archer RR (1977) Reaction wood: induction and mechanical action. *Ann Res Plant Physiol* 28, 24-43
- Wilson BF, Archer RR (1981) Apical control of branch movements in white pine (*Pinus strobus* L.). *Plant Physiol* 68, 1285-1288
- Wilson BF, Archer RR (1983) Apical control of branch movements and tension wood in black cherry and white ash trees. *Can J For Res* 13, 594-600
- Zimmermann MH, Brown CL (1971) *Trees structure and function*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 336 p