

Étude complémentaire sur l'influence de la fertilisation sur la qualité du bois de pin maritime (Expérience de Mimizan)

H. POLGE

avec la collaboration technique de Thérèse HURPEAU, A. PERRIN et P. GELHAYE

*Station de Recherches sur la Qualité des Bois
Centre de Recherches forestières de Nancy, Champenoux, F 54280 Seichamps*

Résumé

Sur 105 arbres répartis en 5 blocs, 7 traitements de fertilisation et 3 catégories de grosseur, ont été découpées 2 barrettes de $7,4 \times 7,4$ mm, une côté bois de compression (Est) et une côté opposé, subdivisées en échantillons cœur et écorce ; pour la densité du bois, la séparation des traitements avec et sans phosphore n'est pas nette ; les petits arbres donnent le bois le moins dense, et le côté Est le plus dense ; il existe des différences significatives entre traitements pour l'épaisseur des barrettes débitées avec des scies-fraises jumelées ; les retraits radial et tangentiel sont plus faibles côté cœur que côté écorce, et plus forts à l'Ouest qu'à l'Est, l'inverse étant vrai pour le retrait axial ; les engrais agissent sur les retraits, mais la séparation des éléments fertilisants n'est pas claire.

Sur éprouvettes normalisées, les traitements se séparent assez bien, notamment pour la contrainte de rupture en flexion statique et la dureté, où les modalités avec phosphore ont une résistance inférieure.

Une analyse densitométrique faite sur des barrettes de 1,6 mm d'épaisseur montre une disparition plus précoce à l'Est qu'à l'Ouest de l'effet favorable du phosphore sur la largeur des cernes ; l'influence de la grosseur des arbres sur cette largeur augmente avec l'âge ; l'anisotropie des accroissements est plus marquée dans les traitements avec P seul ou combiné ; il existe des différences significatives globales entre traitements pour les densités moyennes maximales et minimales annuelles, sans regroupement en fonction des éléments apportés ; cependant, certaines années, l'ensemble des modalités avec P se sépare de l'ensemble sans P, toujours par des valeurs plus faibles. L'anisotropie des largeurs de cernes augmente dans le temps, mais celle des densités moyennes annuelles diminue.

Au total, l'influence de la fertilisation sur la qualité des bois, qui n'a jamais été dramatique, a pratiquement disparu dans les derniers cernes produits sur des arbres de 21 ans.

1. Introduction

L'expérience de fertilisation de Mimizan (département des Landes) a été entreprise sur des plants issus de semis effectués au printemps 1957 ; elle comporte 7 traitements (témoins et apports d'engrais N, P, NK, NP, PK et NPK) et 5 répétitions (blocs complets équilibrés).

Elle a déjà fait l'objet de nombreux comptes rendus :

— Une première et très importante étude (GUINAUDEAU *et al.*, 1963) décrivait en détail le dispositif et en analysait les premiers résultats dans des domaines très variés : croissance en hauteur après 2 et 6 saisons de végétation, couverture vivante, survie au terme de la première année d'expérience, production de cônes mâles et femelles, durée de vie et composition chimique des aiguilles, mycorhization...

— Un bilan dendrométrique portant à la fois sur les croissances en hauteur et en circonférence, ainsi que sur la production en volume depuis l'origine a par la suite été établi par GELPE & GUINAUDEAU (1974).

En ce qui concerne plus particulièrement la qualité du bois, plusieurs études successives ont été entreprises, à différents stades de la vie du peuplement, pour voir en particulier si une dégradation trop importante des caractéristiques technologiques ne risquait pas de venir contrebalancer, au moins en partie, les gains de croissance spectaculaires apportés par la fertilisation phosphatée :

— Une première analyse a été faite à l'âge de 7 ans sur des carottes de sondage prélevées à 40 cm de hauteur dans les témoins et dans les placeaux ayant bénéficié seulement d'un apport de phosphore (POLGE, 1969) ; la fertilisation entraînait alors une perte de densité du bois de 6 g/dm³ par rapport à un échantillonnage systématique de témoins et de 25 g/dm³ lorsque l'on se réfère à des témoins de diamètre comparable, toutes les différences étant significatives ; les deux traitements ne se distinguaient pas l'un de l'autre par les densités minimales ou maximales annuelles, mais par le pourcentage de largeur de cerne de densité supérieure à 500 g/dm³ qui tombait de 30 p. 100 chez les témoins à 24 p. 100 dans les placeaux à phosphore.

— A 9 ans (même document), d'autres analyses ont été faites sur les arbres enlevés à l'occasion de la première éclaircie, en travaillant, d'une part sur les premiers arbres abattus dans chaque ligne (échantillonnage systématique), et d'autre part sur les 5 plus gros arbres coupés dans chaque parcelle unitaire (échantillonnage se rapprochant au point de vue dimensions des arbres restant après éclaircie) ; les 7 traitements se différençaient mieux les uns des autres au point de vue densité du bois dans le premier cas que dans le second, et le faisaient également davantage sur les 3 derniers cernes que sur la totalité des accroissements ; en général les traitements sans phosphore donnaient du bois de densité supérieure, les écarts entre les extrêmes variant de 21 à 34 g/dm³ ; il n'apparaissait pas de différences significatives de longueurs de fibres, mais un rendement en fibres accru des placeaux P par rapport aux témoins.

— Une autre étude a été entreprise dans ce même dispositif à l'âge de 12 ans et à l'âge de 15 ans (OHTA *et al.*, 1983) ; dans le premier cas (matériel constitué par un billon par traitement et par bloc provenant d'un arbre de diamètre voisin de la moyenne de la parcelle unitaire correspondante), il n'y avait aucun effet du traitement sur l'hétérogénéité du bois, ni sur le retrait tangentiel, mais une influence significative sur les retraits radial et volumétrique, sans cependant que soient regroupés de façon nette les traitements avec phosphore d'une part, et sans phosphore d'autre part ; à 15 ans, l'expérience a porté sur 5 billons par parcelle unitaire, représentant bien la variabilité des diamètres du peuplement de chacune d'elles : l'excentricité de la moelle était plus marquée dans les placeaux à phosphore que sans phosphore, mais, inversement, la conicité des tiges y était plus faible ; la densité du bois et les divers critères de résistance mécanique des parcelles NP et NPK étaient inférieurs

à ceux des parcelles N, NK et des témoins, mais les traitements P et PK venaient s'intercaler parmi ces dernières.

— Enfin, dans un dernier compte rendu (OHTA *et al.*, 1985) les mêmes auteurs montrent que le phosphore amène une augmentation du rendement en fibre dans le bois de compression, mais une diminution dans le bois normal, et également que, dans le traitement NPK par exemple, si le bois de compression a un rendement par unité de poids sec de bois plus faible que le bois opposé, ceci est compensé par une densité plus élevée, en sorte que le rendement par unité de volume est pratiquement inchangé.

Le but de la petite étude complémentaire dont il est rendu compte ici est de vérifier à un âge plus avancé la réalité de quelques observations relativement surprenantes faites précédemment et de suivre l'évolution dans le temps de certaines propriétés du bois de signification technologique majeure.

2. Matériel et méthodes

Cette nouvelle expérience a été entreprise sur du matériel tiré d'arbres abattus au printemps 1978 (donc âgés de 21 ans) ; l'échantillonnage a porté sur 3 individus par bloc et par traitement, à savoir un arbre ayant la circonférence moyenne de chaque parcelle unitaire et deux autres ayant la circonférence moyenne plus ou moins une fois l'écart-type, soit un total de 105 individus, à la partie inférieure desquels ont été prélevés des billons de 65 à 70 cm de longueur, en excluant la zone trop proche du collet où le fil du bois est fortement dévié.

De rondelles débitées à la partie supérieure des billons, ont été extraites à l'aide de scies-fraises jumelées, deux séries de barrettes diamétrales suivant la direction de l'excentricité maximale, qui ont par suite fourni côté grand rayon des échantillons de bois de compression, et côté opposé, des échantillons de bois normal. La première série, sciée à des épaisseurs voisines de 7,4 mm dans les directions tangentielle et axiale, a servi à des mesures de rétractibilité et d'infra-densité, en séparant sur chaque éprouvette radiale les 11 derniers cernes qui ont fourni les échantillons référencés « écorce » et l'ensemble des autres accroissements (échantillons « cœur ») ; sur la totalité des 420 échantillons (7 traitements \times 5 blocs \times 3 individus \times 2 rayons \times 2 positions) ont été mesurées à l'aide d'un capteur micrométrique automatisé (FERRAND, 1981) les dimensions tangentielles et axiales à l'état sec à l'air (après conditionnement à 12 p. 100 d'humidité dans une étuve hygrométrique), puis à l'état saturé, dont ont été tirés les retraits correspondants ; on a procédé de même pour le retrait radial à partir de mesures de longueurs faites avec un comparateur avec une précision du mm/100 ; les infra-densités ont été déterminées sur la base du poids anhydre et du poids maximum obtenu après saturation intégrale par le vide.

L'autre série de barrettes a été sciée à une épaisseur de 1,6 mm dans le sens axial et a servi, après radiographie, à évaluer par analyse densitométrique (POLGE, 1966) les largeurs de cernes, les densités moyennes, maximales et minimales annuelles, ainsi que l'écart-type des densités à l'intérieur des cernes qui caractérise l'hétérogénéité du bois, ceci pour les 13 accroissements de 1965 à 1977 inclusivement.

Par ailleurs ont été débitées dans les billons des éprouvettes normalisées pour essais mécaniques, pour la localisation desquelles il a été impossible de suivre un

schéma précis, en raison de la présence fréquente de nœuds ou autres défauts de structure ; en règle générale, on a obtenu 6 éprouvettes par billon : deux du côté « bois de compression », une du côté opposé et 3 en direction perpendiculaire, mais de nombreuses exceptions se sont produites, ne permettant pas de prendre en compte le facteur « position » dans l'analyse des résultats ; les éprouvettes ont d'abord été soumises à des essais en flexion statique suivant la norme NF B51-008 au terme desquels ont été mesurées les flèches et les charges à la rupture, à des essais en compression axiale (NF B51-007) et de dureté (NF B51-013) sur des éprouvettes de 6 cm de longueur débitées dans les parties intactes des éprouvettes précédemment testées en flexion statique, enfin à des déterminations de densités suivant NF B51-005.

3. Résultats

3.1. Barrettes de 7,4 × 7,4 mm

Les résultats ont fait l'objet d'analyses de variance faisant la part de 4 sources principales de variation : traitement, taille des arbres (circonférence moyenne $C = \text{moyens}$, $\bar{C} + \sigma C = \text{gros}$, $C - \sigma C = \text{petits}$), côté (tendu et comprimé) et position (cœur et écorce), ainsi que des différentes interactions ; celles-ci étant, dans tous les cas, rares, faibles (bien que parfois significatives) et difficilement interprétables, il n'en sera pas fait état ci-dessous.

3.1.1. Infra-densité

Elle apparaît comme soumise à l'influence du traitement ($F = 7,47^{**}$), de la taille ($F = 10,93^{**}$), du côté ($F = 67,91^{**}$) et de la position ($F = 173,87^{**}$).

La comparaison des moyennes des traitements par le test de BONFERRONI donne les résultats suivants :

NP	P	N	NPK	NK	T	PK	
375	378	391	393	395	397	409	(en g/dm ³)

(dans un but de simplification, on se limite ici, et on se limitera par la suite dans les comparaisons de moyennes aux différences significatives au seuil de 5 p. 100).

Contrairement aux premières expériences, les traitements avec et sans phosphore ne se séparent plus de façon nette ; on retrouve, comme dans l'étude de OHTA, KELLER & JANIN (1983), des intercalations d'autant moins explicables qu'elles concernent des traitements différents, et que la hiérarchie des diverses modalités de fertilisation n'est pas la même ; on peut maintenant dire que l'effet dépressif du phosphore sur la densité du bois est peu marqué, et observer une certaine tendance à une influence positive du potassium, puisque dans les trois couples NP-NPK, P-PK et N-NK, le traitement avec K fournit des valeurs d'infra-densité supérieures.

L'influence de la taille se manifeste comme suit :

Petits	Gros	Moyens
381	395	397

La plus faible densité des petits arbres, qui surprend à première vue, pourrait s'expliquer par le fait qu'après une période juvénile où leur croissance aurait été assez semblable à celle des autres catégories, ils auraient formé des cernes plus étroits à partir du moment où ils auraient subi leur concurrence, de sorte que, sur des barrettes parallélépipédiques, le volume de bois adulte plus dense serait relativement plus réduit.

En ce qui concerne l'effet « côté », on observe sans surprise une densité plus élevée dans le bois de compression (404 g/dm^3) que dans le bois opposé (378 g/dm^3).

De même, comme on pouvait s'y attendre, on trouve une densité beaucoup plus forte dans les échantillons « écorce » (412 g/dm^3) que dans les échantillons « cœur » (370 g/dm^3).

3.12. Dimensions tangentielle et axiales des éprouvettes

On pourrait croire qu'en débitant les échantillons à l'aide de scies-fraises jumelées (donc à écartement constant), on obtienne des éprouvettes de même épaisseur, aux erreurs de mesure près ; il n'en est rien, et l'on trouve ici, en direction tangentielle, des effets significatifs du traitement ($F = 11,93^{**}$), du côté ($F = 5,33^*$) et de la position ($F = 3,82^*$), et, en direction axiale, un effet du traitement ($F = 4,23^{**}$).

La comparaison des moyennes des diverses modalités de fertilisation donne les résultats suivants :

Direction tangentielle

T	NP	P	NK	N	NPK	PK	
7374	7380	7395	7398	7413	7415	7421	microns

Direction axiale

T	NP	NK	P	N	PK	NPK	
7356	7374	7384	7384	7384	7394	7398	microns

On observe d'abord que, quel que soit le traitement, les dimensions tangentielles sont supérieures aux dimensions axiales ; ceci pourrait être dû (ARCHER, communication personnelle) à la valeur inférieure à 1 du coefficient de Poisson liant une déformation dans le sens du fil du bois à la déformation résultante dans la direction des couches d'accroissement, ou encore (KAUMAN, communication personnelle) à l'interaction outil-fibres, l'action d'une dent de fraise ne s'exerçant pas de façon identique dans le sens transversal (où elle coupe les trachéides perpendiculairement à leur axe) et dans le sens longitudinal (où elle peut, soit les sectionner parallèlement à celui-ci, soit les écarter les unes des autres à la manière d'un coin).

Par ailleurs, les dimensions axiales et tangentielles sont liées par une corrélation très étroite ($r = 0,90^{***}$), ce qui laisse à penser que les déformations par rapport à l'épaisseur théorique correspondant à l'écartement des scies-fraises, qui se produisent dans les deux directions considérées, sont occasionnées par une même cause, la structure du bois ; on aurait dès lors un phénomène analogue à celui dont il a déjà été rendu compte (POLGE, 1978), dans lequel les déformations d'une dent-rabot lors de l'enlèvement d'un copeau étaient fortement corrélées à la densité maximale annuelle

des cernes successifs ($r = 0,65^{**}$ à $0,75^{***}$) ; ici, on ne dispose que d'une seule donnée, relativement grossière, pour caractériser la structure : l'infradensité ; elle ne donne pas de liaisons significatives avec les dimensions des éprouvettes, mais une tendance apparaît pour une augmentation de celles-ci avec la densité ($r = 0,50$ avec l'épaisseur dans le sens tangentiel qui est, des deux considérées, la plus variable).

Les différences observées quant aux effets des deux autres sources de variation sur les dimensions tangentielles vont également dans le même sens, puisque l'on a toujours une épaisseur plus forte quand la densité est elle-même plus élevée : 7 404 microns pour le bois de compression contre 7 395 pour le côté opposé, et 7 403 microns pour les échantillons « écorce » contre 7 395 pour les échantillons « cœur ».

3.13. *Retrait tangentiel*

Il est soumis à un effet traitement ($F = 4,68^*$), à un effet côté ($F = 23,5^{**}$) et à un effet position ($F = 376,8^{**}$).

L'influence du traitement de fertilisation se présente comme suit :

NP	N	P	NK	NPK	T	PK	
3,40	3,52	3,70	3,74	3,79	3,82	3,86	(en %)

Pas plus que les autres variables étudiées, le retrait tangentiel, qui est une caractéristique physique très importante pour la plupart des utilisations, ne permet de séparer les traitements avec et sans phosphore ; comme il en est généralement, il suit assez bien les variations de l'infradensité ($r = 0,75$), et paraît également aggravé par le potassium, au vu des comparaisons NP-NPK, N-NK et P-PK.

Le retrait tangentiel est plus faible dans le bois de compression que du côté opposé (3,54 p. 100 contre 3,83 p. 100), en accord avec la littérature (Low, 1964), et également moins élevé dans l'échantillon cœur que dans l'échantillon écorce (3,10 p. 100 contre 4,27 p. 100), en conformité avec le gradient positif généralement observé chez les résineux du bois juvénile au bois adulte.

3.14. *Retrait radial*

Il apparaît comme dépendant à la fois du traitement ($F = 57,23^{**}$), de la taille ($F = 12,37^{**}$), du côté ($F = 98,19^{**}$) et de la position ($F = 12,12^{**}$).

Les traitements se séparent en 4 groupes ne se recoupant pas, mais l'interprétation des résultats n'en est pas plus facile pour autant, puisque, par exemple, le témoin occupe une position médiane et que les 4 traitements avec phosphore se répartissent par groupes de deux dans les plus forts et les plus faibles retraits.

La comparaison des tailles d'arbres se présente comme suit :

Gros	Moyens	Petits	
2,36	2,52	2,62	(en %)

Comme le retrait tangentiel, le retrait radial est plus élevé du côté opposé que du côté comprimé (2,70 p. 100 contre 2,31 p. 100) et vers l'écorce (2,57 p. 100) que vers le cœur (2,44 p. 100), avec les mêmes explications probables.

3.15. *Retrait axial*

Il est soumis à l'influence de toutes les sources de variation étudiées : traitement ($F = 3,25^{**}$), taille ($F = 5,48^{**}$), côté ($F = 56,33^{**}$) et position ($F = 6,16^*$).

La comparaison des moyennes de traitement donne :

T	NK	P	NPK	NP	N	PK	
0,11	0,12	0,15	0,18	0,19	0,19	0,28	(en %)

On n'a toujours pas d'effet très net des éléments fertilisants ; on peut seulement observer que, contrairement à une tendance assez générale suivant laquelle les retraits en direction du fil du bois et perpendiculairement à celui-ci varient en sens opposé, ici le traitement PK apparaît comme conférant au bois une forte instabilité dimensionnelle, aussi bien axiale que radiale ou tangentielle.

L'influence de la taille des arbres est donnée par la comparaison :

Petits	Gros	Moyens
0,12	0,19	0,21

On a ici un résultat opposé à celui trouvé pour le retrait radial, puisque ce sont les petits qui se distinguent des deux autres catégories, au lieu des gros.

Le retrait axial est plus de trois fois plus élevé du côté « bois de compression » (0,26 p. 100) que du côté opposé (0,08 p. 100), et ceci confirme bien que le bois formé en direction du plus grand rayon dans le pin maritime (en général à l'Est) est effectivement du bois de réaction (POLGE & ILLY, 1967).

Le retrait dans le sens du fil du bois est plus faible dans la zone « écorce » que dans la zone « cœur », c'est-à-dire que, comme pour la source de variation précédente, il suit un gradient de signe contraire aux retraits radial et tangentiel.

3.2. *Barrettes de 1,6 mm d'épaisseur*

Le but de la partie de l'expérience les concernant était de suivre l'évolution des caractéristiques de structure du bois au cours des 13 années convenablement représentées sur l'ensemble des échantillons.

3.21. *Largeur des accroissements annuels*

Le tableau 1 indique après l'année la valeur du test « F » correspondant, puis les résultats du test de comparaison des moyennes au seuil de probabilité de 5 p. 100.

On retrouve, ce que laissaient présager les résultats des expériences successives, une séparation de moins en moins nette des traitements avec et sans phosphore : les

6 premières années, à l'exception de 1967, les deux groupes se séparent complètement l'un de l'autre, puis, même si la croissance des placeaux avec phosphore demeure la plus rapide, on observe des cas d'absence de différence significative entre traitements ayant ou non bénéficié de l'apport de cet élément fertilisant, enfin se produisent en 1976 et 1977 des inversions, avec, en particulier, des accroissements très faibles dans la modalité à phosphore seul.

TABLEAU 1

*Test de comparaison des moyennes de largeurs de cernes
(valeurs exprimées en mm/50).*

Multiple comparisons test of ringwidth (values given in mm/50).

1965	(16,0**)	P 268	NP 252	PK 250	NPK 249	T 201	NK 178	N 172
1966	(10,7**)	P 241	NPK 234	NP 230	PK 227	T 184	N 177	NK 158
1967	(4,4**)	PK 225	P 223	NPK 218	NP 209	N 198	T 175	NK 166
1968	(12,6**)	PK 207	P 202	NP 201	NPK 200	N 154	T 136	NK 133
1969	(8,5**)	PK 194	P 192	NPK 184	NP 183	N 139	NK 138	T 130
1970	(12,1**)	P 197	NP 194	PK 193	NPK 188	NK 147	N 144	T 136
1971	(12,6**)	NP 156	NPK 149	PK 142	P 139	T 116	N 110	NK 106
1972	(3,2**)	NP 132	NPK 123	PK 117	P 111	T 110	N 104	NK 102
1973	(4,6**)	NP 135	NPK 125	P 121	PK 120	N 105	T 103	NK 102
1974	(2,4*)	NP 156	NPK 143	P 136	PK 133	T 130	N 127	NK 125
1975	(1,7NS)							
1976	(3,9**)	NP 145	NPK 134	T 120	PK 117	N 116	P 115	NK 100
1977	(2,9**)	NPK 95	NP 94	N 91	T 84	PK 79	P 74	NK 67

Les valeurs du test « F » de l'effet « côté » pour les différentes années sont les suivantes :

1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
29**	54**	61**	98**	99**	174**	149**	148**	192**	184**	147**	193**	86**

Il apparaît assez nettement que l'anisotropie, c'est-à-dire la différence de vitesse de croissance sur deux rayons opposés, a, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, tendance à augmenter avec l'âge.

Il en est de même pour l'influence de la taille des arbres :

1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
13**	12**	9**	16**	14**	31**	25**	33**	36**	57**	39**	54**	36**

mais, dans ce cas, on retrouve une notion bien connue des sylviculteurs, à savoir que les dominants deviennent de plus en plus dominants, et, les dominés, de plus en plus dominés.

La figure 1 représente les variations de largeurs des cernes en fonction de l'âge pour le bois de compression (côté Est) et pour le bois opposé (côté Ouest), d'une part pour les 4 traitements avec phosphore, d'autre part pour les 3 traitements sans phosphore, avec les droites de régression correspondantes : on voit que l'effet de cet élément a cessé d'être significatif dès 1971 à l'Ouest, mais seulement en 1976 à l'Est, et qu'il n'y a plus aucune différence entre les deux groupes côté Ouest durant les 4 dernières années disponibles, alors que les traitements avec phosphore manifestent jusqu'au bout une supériorité côté Est, même si le seuil de signification à 5 p. 100 n'est plus atteint.

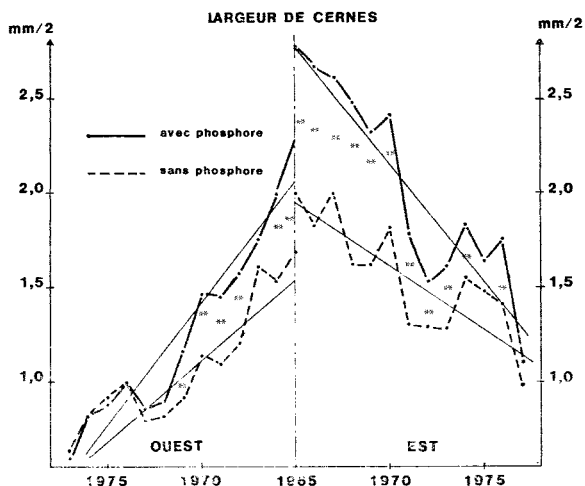


FIG. 1

Variations des largeurs de cernes côté bois de compression (Est) et côté opposé (Ouest).

Variations of the ringwidths in the compression wood (East side) and in the opposite wood (West side).

Sur la figure 2 (partie gauche) est représentée l'évolution dans le temps de l'anisotropie des largeurs de cernes (rapport de l'accroissement sur le plus grand rayon à celui du côté opposé) pour les mêmes deux groupes de traitement : on retrouve, conformément aux observations faites sur les valeurs de « F », une forte augmentation avec l'âge, mais on note aussi, en accord avec les résultats de OHTA et collaborateurs (1983), que cette anisotropie est beaucoup plus marquée dans les traitements avec phosphore que sans phosphore.

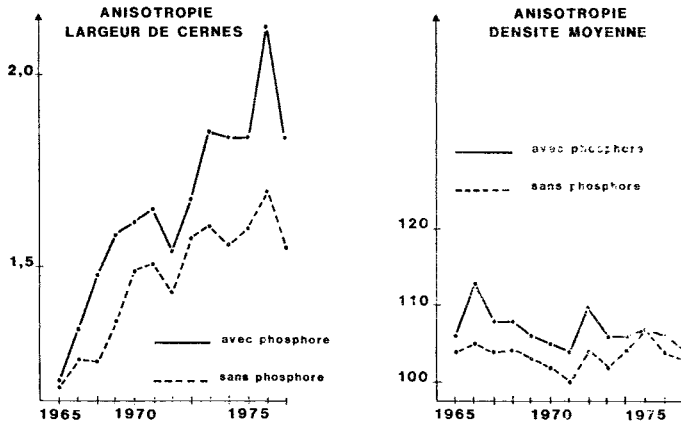


FIG. 2

Variations annuelles de l'anisotropie des largeurs de cernes et des densités moyennes.

Variations of the ringwidth and of the mean density anisotropies.

3.22. Densités moyennes annuelles

Le tableau 2 donne pour chaque année la valeur du « F » dû au traitement suivi du test de comparaison des moyennes correspondant :

Les valeurs du test « F » ont tendance à être plus faibles que pour les largeurs de cernes, mais il n'apparaît pas d'évolution nette en fonction de l'âge ; les 4 traitements avec phosphore n'ont une densité plus faible que les 3 autres qu'en 1965 ; par la suite, les 3 dernières places sont occupées, que les différences soient significatives ou non, par un groupement hétéroclite des placeaux P, N et NP, cependant qu'alternent à la première le témoin et le traitement PK.

Si l'on compare ces résultats avec ceux obtenus sur barrettes $7,4 \times 7,4$ mm, on note ici des valeurs plus élevées qui s'expliquent par le fait qu'il s'agit maintenant de densités à environ 12 p. 100 d'humidité, et non plus d'infradensité ; au reste, les classements se recoupent assez bien dans l'ensemble, et l'on voit, en particulier, que la forte densité du bois des placeaux PK, qui surprenait, s'agissant d'un traitement avec phosphore, est apparue dès 1966 et s'est maintenue avec peu d'exceptions par la suite.

TABLEAU 2

*Test de comparaison des moyennes des densités moyennes annuelles
(valeurs exprimées en g/dm³ à 12 p. 100 d'humidité).*

*Multiple comparisons test of mean annual densities
(values given in g/dm³ at 12 p. 100 moisture content).*

1965	(5,6**)	NK 426	T 424	N 411	PK 403	NPK 400	NP 387	P 365
1966	(6,1**)	T 442	PK 440	NPK 435	NK 434	N 412	NP 399	P 390
1967	(9,2**)	PK 491	NPK 457	T 450	NK 437	P 428	NP 421	N 409
1968	(7,5**)	PK 496	T 473	NPK 467	NK 464	P 440	NP 433	N 425
1969	(4,5**)	T 491	PK 484	NK 480	NPK 473	N 454	NP 451	P 442
1970	(6,8**)	T 514	NK 504	PK 493	NPK 491	N 483	NP 460	P 453
1971	(4,4**)	T 489	NPK 487	PK 476	NK 476	N 466	P 445	NP 440
1972	(2,7*)	PK 515	NPK 503	NK 497	T 496	P 480	NP 479	N 479
1973	(2,6*)	T 509	PK 508	NPK 505	NK 503	N 500	P 480	NP 471
1974	(5,4**)	PK 532	NK 531	T 530	NPK 519	N 517	P 491	NP 486
1975	(4,0*)	PK 553	NPK 550	T 541	NK 534	N 525	P 517	NP 505
1976	(3,9*)	PK 555	NPK 543	NK 540	T 535	NP 517	P 514	N 513
1977	(1,9NS)							

Le test « F » de l'effet côté donne pour les différentes années les valeurs suivantes :

1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
9**	35**	15**	17**	10**	8**	2NS	30**	8**	16**	28**	16**	6*

Sans aucune exception, la densité est plus forte du côté bois de compression que du côté opposé.

Il n'y a que 3 années présentant un effet significatif de la taille des arbres, et encore avec des résultats différents : densité plus faible que pour les deux autres catégories pour les petits individus en 1966 et 1967, et pour les moyens en 1974.

Sur la figure 3 sont reportées les valeurs moyennes des densités côté Ouest et côté Est pour la moyenne des traitements avec phosphore d'une part et sans phosphore d'autre part ; les différences significatives sont peu nombreuses, ce qui ne saurait surprendre, puisque les tests de comparaison des moyennes ont fait apparaître beaucoup de chevauchements entre les deux groupes ; on doit cependant observer que, lorsque le seuil de signification à 5 p. 100 est dépassé, le phosphore entraîne toujours une baisse de densité, que les effets de la fertilisation sur la densité du bois sont plus marqués du côté Ouest que du côté Est, que, contrairement aux largeurs de cernes, la dernière différence significative recensée est plus tardive dans le premier (1974) que dans le second (1971), enfin que, d'un côté comme de l'autre, les deux courbes sont maintenant pratiquement confondues, montrant que les effets de la fertilisation sur la qualité du bois, qui s'étaient manifestés dans les expériences précédentes, ont maintenant totalement disparu.

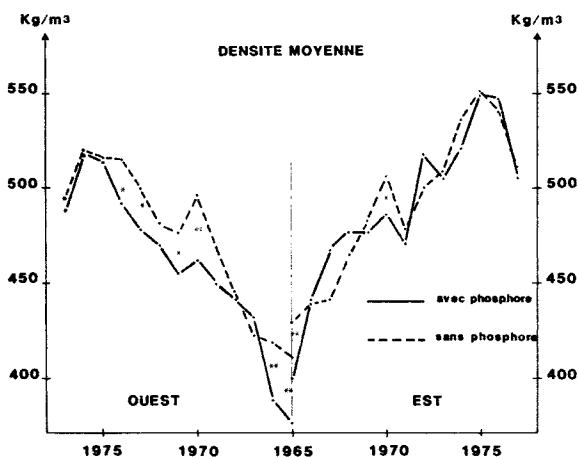


FIG. 3

Variations des densités moyennes annuelles côté bois de compression (Est) et côté opposé (Ouest).

Variations of the mean annual density in the compression wood (East side) and in the opposite wood (West side).

Sur la partie droite de la figure 2, on peut suivre l'évolution dans le temps de l'anisotropie des densités (rapport de la densité Est à la densité Ouest) ; elle est toujours plus élevée pour les traitements avec phosphore, mais, à l'opposé de ce qui avait été observé pour les largeurs de cernes, celle des placeaux ayant reçu ce type de fertilisation diminue avec l'âge et atteint pour les dernières années des valeurs très voisines de celles des placeaux sans phosphore ; ceci est très heureux puisque, d'un point de vue technologique, l'anisotropie des densités est beaucoup plus grave que celle des largeurs de cernes.

3.23. Densités maximales annuelles

Les valeurs du test « F » pour les différentes années et les résultats des comparaisons de moyennes sont donnés dans le tableau 3.

La densité maximale, contrairement à beaucoup d'autres expériences, n'apparaît pas comme particulièrement discriminante pour différencier les traitements, tout au moins dans les 6 dernières années étudiées ; c'est la modalité NPK qui, dans l'ensemble, fournit les plus fortes valeurs, cependant que la dernière place est, de façon assez étonnante, occupée tantôt par le témoin, tantôt par le traitement P.

La figure 4 résume les variations dans le temps de la densité maximale pour les deux côtés opposés, et pour les deux groupes de traitement : avec et sans phosphore :

Toutes les différences significatives observées correspondent à une supériorité de la modalité sans phosphore ; en outre, comme pour la densité moyenne, le côté Ouest discrimine mieux les deux groupes que le côté Est, mais, contrairement à elle, l'effet dépressif du phosphore est encore apparent en 1977.

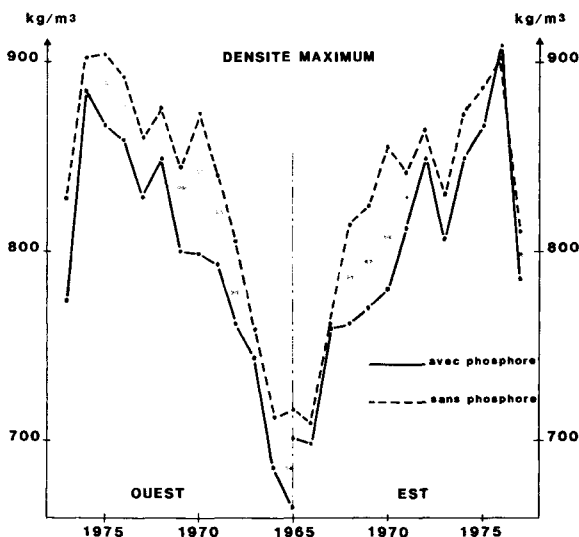


FIG. 4

Variations des densités maximales annuelles côté bois de compression (Est) et côté opposé (Ouest).

Variations of the maximum annual density in the compression wood (East side) and in the opposite wood (West side).

TABLEAU 3

*Test de comparaison des moyennes des densités maximales annuelles
(valeurs exprimées en g/dm³ à 12 p. 100 d'humidité).*

*Multiple comparisons test of maximum annual densities
(in g/dm³ at 12 p. 100 moisture content).*

1965	(6,3**)	PK 747	NPK 730	N 720	NK 699	NP 673	T 673	P 646
1966	(5,1**)	NPK 747	N 730	PK 715	NK 700	P 675	NP 671	T 660
1967	(5,0**)	N 794	NPK 788	PK 770	T 751	NK 748	NP 722	P 712
1968	(7,7**)	NPK 840	PK 822	N 802	NP 770	NK 757	T 753	P 739
1969	(7,0**)	PK 845	NPK 838	NP 815	N 799	NK 797	P 763	T 749
1970	(14,0**)	NPK 882	PK 875	NP 836	N 819	NK 806	P 773	T 755
1971	(3,7**)	NPK 855	NP 839	PK 836	N 827	NK 824	T 803	P 769
1972	(1,5NS)	NPK 861	NP 846	NK 832	N 831	PK 830	T 819	P 786
1974	(2,8**)	PK 890	N 890	NPK 887	NP 869	NK 869	T 831	P 828
1975	(2,7**)	PK 904	NPK 893	N 892	NP 891	NK 877	T 863	P 836
1976	(2,3**)	N 933	NPK 915	PK 913	NK 905	T 885	NP 882	P 865
1977	(2,5**)	NPK 832	PK 827	NP 810	N 802	P 779	NK 772	T 766

TABLEAU 4

*Test de comparaison des moyennes de densités minimales annuelles
(valeurs exprimées en g/dm³ à 12 p. 100 d'humidité).*

*Multiple comparisons test of minimum annual densities
(in g/dm³ at 12 p. 100 moisture content).*

1965	(5,6**)	PK 330	NPK 318	NP 308	NK 293	N 284	P 282	T 268
1966	(5,5**)	NK 314	PK 314	N 306	NPK 305	NP 293	P 280	T 273
1967	(8,2**)	N 338	PK 314	NK 313	NPK 311	P 286	NP 282	T 280
1968	(7,9**)	N 346	NPK 338	PK 330	NK 319	NP 303	P 296	T 290
1969	(7,4**)	NPK 351	PK 342	N 330	NK 320	NP 313	P 304	T 294
1970	(7,1**)	PK 353	NPK 351	NK 339	NP 333	N 328	P 307	T 299
1971	(5,1**)	PK 354	NPK 348	N 342	NP 338	NK 333	P 306	T 305
1972	(4,7**)	PK 345	NPK 337	N 336	NP 328	NK 326	P 309	T 305
1973	(5,3**)	N 371	PK 363	NK 356	NPK 355	NP 338	T 327	P 323
1974	(4,5**)	PK 343	N 339	NPK 339	NK 335	NP 332	P 308	T 307
1975	(3,9**)	N 397	PK 380	NK 379	NPK 377	NP 368	T 355	P 345
1976	(4,4**)	N 404	PK 388	NK 380	NPK 375	NP 369	P 361	T 357
1977	(3,7**)	N 375	NK 368	NPK 364	PK 355	P 350	NP 342	T 340

3.24. Densités minimales annuelles

Le tableau 4 donne, par année, la valeur de « F », l'indication des différences significatives entre traitements.

Dans l'ensemble, et surtout les dernières années, la densité minimale paraît plus sensible aux effets de la fertilisation que la densité maximale, mais la hiérarchie des traitements est à peu près la même que pour celle-ci, à la nuance près que l'azote seul semble avoir une influence bénéfique plus marquée. Une remarque s'impose ici : aussi bien pour les minimums que pour les maximums, les valeurs des témoins sont particulièrement faibles, et se différencient même significativement de celles de plusieurs modalités de fertilisation ; or, l'inverse était vrai pour les densités moyennes de cerne ! Le programme d'analyse densitométrique utilisé ne prévoyait malheureusement pas le calcul des pourcentages de bois final ; on en est donc réduit aux hypothèses pour expliquer ce paradoxe : celle suivant laquelle les témoins auraient une texture particulièrement forte est la plus vraisemblable, et ce d'autant qu'elle recoupe les résultats obtenus antérieurement sur le pourcentage de l'accroissement annuel ayant une densité supérieure à 500 g/dm³ (POLGE, 1966).

Sur la figure 5 sont indiquées les valeurs annuelles des densités minimales, côté Ouest et côté Est, pour les traitements avec et sans phosphore.

Comme pour les densités maximales, les différences significatives sont toujours au profit des modalités sans phosphore, et la discrimination est meilleure à l'Ouest qu'à l'Est, mais, ici, aucun effet du traitement n'apparaît dans les dernières années de l'expérience.

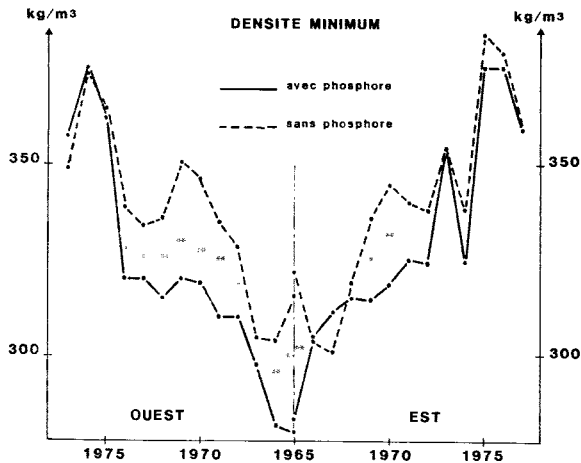


FIG. 5

Variations des densités minimales annuelles côté bois de compression (Est) et côté opposé (Ouest).

Variations of the minimum annual densities in the compression wood (East side) and in the opposite wood (West side).

3.25. *Ecart-type intra-cerne de la densité du bois*

Les effets du traitement sont résumés dans le tableau 5.

Ce paramètre, dont on pense qu'il caractérise bien l'homogénéité du bois (FERRAND, 1982), apparaît ici comme peu apte à différencier les traitements ; seules, 4 années donnent un « F » significatif, et la hiérarchie des types de fertilisation varie fortement de l'une à l'autre, mis à part les placeaux NPK à forts écarts-types, et les placeaux P beaucoup plus homogènes.

TABLEAU 5

*Test de comparaison des moyennes de l'écart-type des densités
(valeurs exprimées en g/dm³).*

Multiple comparisons test of within ring densities standard error (in g/dm³).

1965	(1,9NS)						
1966	(2,0NS)						
1967	(1,7NS)						
1968	(2,8*)	NPK 150	PK 148	T 139	N 137	NP 133	NK 132
1969	(1,1NS)						
1970	(3,9**)	NPK 173	PK 169	NP 159	N 157	NK 154	P 149
1971	(2,9*)	T 157	NPK 154	NK 152	NP 151	N 143	PK 141
1972	(1,4NS)						
1973	(2,0NS)						
1974	(1,7NS)						
1975	(0,9NS)						
1976	(1,6NS)						
1977	(3,6**)	PK 159	NPK 158	NP 155	T 146	N 142	P 140

3.26. *Effets secondaires sur les densités maximales et minimales et sur les écarts-types*

Ils sont regroupés ici, car ils sont peu marqués et sans grande implication pratique ; seules seront indiquées les années à différences significatives.

— Effet du côté :

Contrairement aux largeurs de cernes et aux densités moyennes, très peu d'années sont concernées ; elles figurent sur le tableau 6.

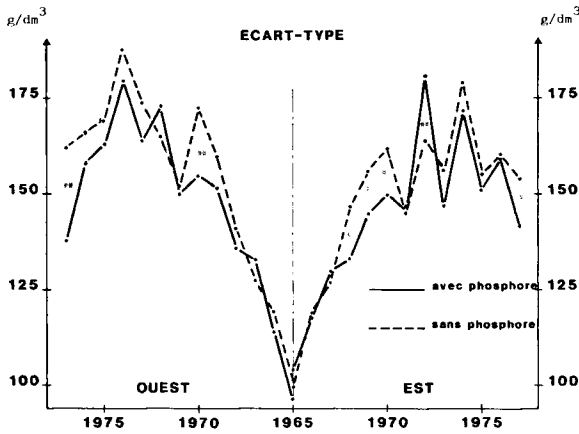


FIG. 6

Variations de l'écart-type des densités.

Variations of the standard error of densities.

Avec phosphore - *With phosphorus.*

Sans phosphore - *Without phosphorus.*

TABLEAU 6

Analyse de l'effet « côté » sur les critères annuels de densité.

Analysis of the side effect on the densitometric criteria.

	Année	F	Côté Est	Côté Ouest	
Densités minimales annuelles	1966	6,6*	304	291	g/dm ³
	1973	4,9*	354	341	
	1975	5,6*	379	363	
Densités maximales annuelles	1973	5,0*	816	842	g/dm ³
	1975	10,7**	153	166	
Ecart-types des densités ...	1970	4,3*	155	162	g/dm ³
	1973	14,7**	151	168	
	1975	10,7**	153	166	

Année - year; côté - side; Est - East; Ouest - West; densité - density; annuel - annual; écart-type - standard error.

Les densités maximales sont plus faibles, et les minimales plus élevées du côté comprimé que du côté opposé; corrélativement, le bois y est plus homogène.

— Effet de la grosseur :

Il se manifeste très peu sur les maximums et sur les minimums, mais davantage sur les écarts-types; les résultats sont les suivants :

TABLEAU 7

*Effets de la grosseur des arbres sur les critères annuels de densité.
Effects of the tree size on the densitometric criteria.*

	Année	F				
Densités minimales annuelles	1973	4,6*	M : 334	G : 354	P : 355	g/dm ³
	1977	5,7*	M : 344	G : 360	P : 365	
Densités maximales annuelles	1970	5,4**	G : 804	M : 815	P : 842	g/dm ³
	1974	4,7*	M : 848	G : 857	P : 892	
Ecart-types des densités	1965	4,4*	P : 94	M : 103	G : 103	g/dm ³
	1967	3,3*	G : 123	P : 129	M : 135	
	1970	4,4*	G : 152	M : 158	P : 165	
	1974	3,5*	G : 174	M : 177	P : 187	
	1975	4,0*	G : 155	M : 156	P : 167	
	1977	3,4*	G : 141	M : 147	P : 154	

P = Petits arbres - *small trees*.

M = Arbres moyens - *mean size trees*.

G = Gros arbres - *large trees*.

Pour les densités maximale et minimale annuelles, on n'a que deux années où la taille des arbres apparaît comme un facteur discriminant, mais, dans le premier cas, c'est la catégorie des petits arbres qui se différencie des deux autres par une valeur élevée, alors que, dans le second, c'est la catégorie moyenne, par des valeurs faibles.

La situation fluctue quelque peu pour l'écart-type des densités, mais la tendance générale est celle d'une amélioration de l'homogénéité en passant des petits aux moyens, puis aux gros.

3.3. Essais sur éprouvettes normalisées

3.3.1. Flèche à la rupture en flexion statique

Le résultat des comparaisons de moyennes au seuil de 5 p. 100 (valeurs données en mm) et la valeur du test « F » sont donnés ci-dessous :

NP	P	PK	N	NK	T	NPK	F = 2,3*
10,4	10,9	10,9	11,0	11,3	11,4	12,0	

L'éventail des moyennes par traitement est plus refermé que dans l'étude de OHTA *et al.*, 1985 ; on retrouve une tendance générale à un effet négatif du phosphore sur la flèche à la rupture, mais, alors que dans cette expérience précédente la principale anomalie était constituée par la présence insolite des témoins parmi les traitements à phosphore, ici, on est surpris par la forte valeur trouvée pour le traitement NPK.

3.32. Contrainte de rupture en flexion statique

Les variations entre traitements se présentent comme suit (valeurs en daN/cm²) :

NP	PK	NPK	P	N	NK	T	
629	691	709	716	745	764	815	F = 12,4**

Pour cette caractéristique également, les chiffres trouvés sont nettement moins dispersés que ceux obtenus sur du matériel prélevé 6 ans plus tôt ; mais on trouve surtout un meilleur regroupement des traitements avec et sans phosphore, avec, en particulier une séparation complète de T et NK d'une part, et de l'ensemble des modalités de fertilisation avec P, seul ou combiné, d'autre part.

3.33. Dureté

Les résultats sont les suivants (en mm de largeur d'empreinte) :

T	N	PK	NK	NPK	P	NP	
7,8	8,2	8,4	8,4	8,9	9,0	10,7	F = 13,9**

Les valeurs indiquées ne sont pas comparables à celles données par OHTA et collaborateurs qui avaient préféré chiffrer la dureté en profondeur d'empreinte plutôt qu'en largeur (les deux sont liées par une relation simple faisant intervenir le rayon du cylindre d'appui) ; la dispersion est, à nouveau, un peu plus faible ici, mais la valeur du test « F » plus élevée ; ici, trois des 4 traitements avec phosphore se différencient significativement des trois modalités sans phosphore, avec des valeurs supérieures traduisant une moindre dureté.

3.34. Contrainte de rupture en compression axiale

La comparaison des traitements donne (en daN/cm²) :

NP	NPK	NK	P	T	PK	N	
402	442	445	451	458	462	479	F = 10,8**

Les valeurs trouvées sont toujours moins dispersées que dans l'étude précédente (ce qui pourrait s'expliquer par le fait qu'il est de moins en moins difficile de confectionner des éprouvettes de bonne qualité en nombre suffisant au fur et à mesure que les arbres grossissent), mais, ici, on trouve en plus des chiffres de contrainte supérieurs, ce qui pourrait résulter d'une sensibilité plus grande de l'essai en compression axiale à la présence de petits défauts dans les éprouvettes ; on doit cependant noter que la séparation des traitements avec et sans phosphore est maintenant moins bonne que 6 ans plus tôt.

4. Commentaires et conclusion

Cette nouvelle série d'expériences confirme un certain nombre de résultats antérieurs, et apporte quelques éléments d'information nouveaux :

Il est tout d'abord clair que l'influence défavorable de la fertilisation phosphatée sur la densité du bois et, par voie de conséquence, sur sa résistance, qui n'a jamais présenté un caractère dramatique, s'estompe de plus en plus, et est sans doute maintenant en voie de disparition ; si on l'a encore observée ici sur plusieurs critères de comportement mécanique, la raison en est que, dans les éprouvettes d'essai, étaient obligatoirement représentés un certain nombre de cernes anciens sur lesquels l'effet du traitement était toujours sensible.

On est certes surpris par des anomalies apparentes de classement observées dans les tests de résistance en flexion, compression axiale ou dureté, et aussi par le fait qu'elles sont différentes de celles notées par OHTA et ses co-auteurs en 1983 ; ceci est vraisemblablement dû à l'action du climat sur la structure du bois, donc sur son comportement rhéologique, qui vient interférer avec celle de la fertilisation dans les phénomènes de nutrition : il faut se rappeler en effet que les différences de densité entre années, sous l'effet des variations des divers facteurs climatiques, sont telles qu'elles sont à l'origine de la xylochronologie, c'est-à-dire de la datation du bois basée sur les seules données densitométriques (POLGE, 1966 ; POLGE & KELLER, 1969) ; les éprouvettes des deux séries d'essais ayant obligatoirement été constituées de cernes différents, l'interaction climat-fertilisation peut très bien ne pas s'être exercée de façon identique, et avoir entraîné, sur l'anatomie du bois formé, des effets, sinon opposés, du moins dissemblables.

Cette expérience a confirmé tout l'intérêt qu'il y a, pour le pin maritime des Landes, à étudier séparément le bois du côté Est (bois de compression) et le bois opposé : pour la plupart des caractéristiques analysées ici : retraits tangentiel, radial et axial, largeurs de cernes, densités moyennes annuelles, écarts-types des densités, les valeurs du test « F » de l'effet côté sont supérieures à celles de l'effet traitement ; l'influence du phosphore comme facteur d'aggravation de l'anisotropie des largeurs de cernes, déjà observée lors de l'expérience précédente, s'est trouvée confirmée dans celle-ci, mais on a surtout pu noter que, fort heureusement, si cette anisotropie augmente avec l'âge, notamment dans les traitements avec phosphore, celle des densités évolue en sens contraire.

L'effet de la fertilisation sur les dimensions axiales et tangentielles des éprouvettes débitées avec des scies-fraises jumelées pourrait paraître ne présenter qu'un intérêt anecdotique ; cela n'est pas sûr : certes les différences entre traitements extrêmes, bien que significatives, ne représentaient pas 1 p. 100 en valeur relative, et pouvaient donc être considérées comme négligeables pour l'analyse densitométrique ; il pourrait ne pas en être de même avec d'autres sources de variations plus efficaces (génétique, sylviculture, élagage) dont on sait qu'elles conditionnent puissamment la densité du bois, et il conviendrait sans doute de porter d'autant plus attention à l'uniformité d'épaisseur des échantillons après débit que sur elle repose, non seulement la détermination des composantes de la densité par absorption des rayons X, mais aussi celle des modules d'élasticité par atténuation de la vitesse des ondes ultrasonores (Voichita BUCUR, 1981 ; J.R. PERRIN, 1983).

Si de nouveaux efforts de recherches devaient être consacrés aux effets de la fertilisation sur la qualité du bois de pin maritime, et cela serait sans doute justifié par l'importance des forêts ainsi traitées dans la région landaise, il pourrait être utile de revenir à des prélèvements non-destructifs de façon à pouvoir analyser, d'une part l'éventuel effet positif du potassium sur la densité du bois, d'autre part l'interaction entre facteurs du climat et éléments fertilisants, qui n'ont pas pu être tirés au clair dans cette expérience faute d'un échantillonnage suffisant.

Reçu en août 1984.

Accepté en novembre 1984.

Remerciements

Les Papeteries de Gascogne à Mimizan ont fourni gracieusement les billons nécessaires à cette expérience,

Bernard LEMOINE s'est assuré de la représentativité statistique de l'échantillonnage,

Danièle AUBERT a procédé à la totalité du traitement des données ;

Que tous soient ici remerciés de l'aide précieuse ainsi apportée à cette étude.

Summary

Further study of the effects of fertilization on wood quality of maritime Pine (Mimizan experiment)

From each of 105 trees distributed between 5 blocks, 7 fertilization treatments and 3 diameter classes, 2 small strips 7.4×7.4 mm were cut, one along a radius on the side of the compression wood (East), the other on the opposite side, each divided into samples near the pith and near the bark ; observations of basic density showed no clear separation between treatments with and without phosphorus, the smaller trees having the less dense wood and the eastern side denser wood ; there were significant differences between treatments of the thickness of specimens cut with twin circular saws ; radial and tangential shrinkages were lower near the pith than near the bark, and lower in the eastern than in the western direction whereas the contrary was observed for longitudinal shrinkage ; fertilization influenced the shrinkages, but it is difficult to show an effect of individual chemical elements.

Standardized specimens showed a rather good separation between treatments, particularly as regards breaking strength in static bending and hardness which were lower in the case of treatments with P.

A densitometric analysis performed on 1.6 mm thick specimens showed that the beneficial influence of P on ring width ceases earlier in the compression wood than in the normal wood ; the effect of the tree size increased with age ; the anisotropy of the ring widths was higher for the treatments with P, alone or combined with other elements ; there were significant differences between treatments for the mean, the maximum and the minimum annual densities, but without any clear effects corresponding to the three elements (P, N and K) ; however, for some individual years, the treatments with and without P, respectively, produced significant differences, the values being always lower when P had been used. The anisotropy of ring width increased with age, and that of the mean annual density decreased.

On the whole, the influence of fertilization on wood quality seems never very strong and practically disappears in the last few rings in 21 years old trees.

Références bibliographiques

- BUCUR Voichita, 1981. Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage. *Ann. Sci. For.*, **38** (2), 283-298.
- FERRAND J.Ch., 1981. Recherches des solutions pratiques à apporter aux problèmes posés par les contraintes de croissance des arbres forestiers. *Thèse de Docteur-Ingénieur* en Sciences du Bois, I.N.P.L. Nancy.
- FERRAND J.Ch., 1982. Réflexions sur la densité du bois. 2^e partie : Calcul de la densité et de son hétérogénéité. *Holzforschung*, **36**, Heft 3, 153-157.
- GELPE J., GUINAUDEAU J., 1974. Essai de fertilisation minérale sur Pins maritimes à Mimizan (Landes). Résultats après la 16^e année. *Rev. for. fr.*, **6**, 459-463.
- GUINAUDEAU J., ILLY G., MAUGE J.P., DUMAS F., 1963. Essai de fertilisation minérale sur pin maritime à Mimizan (Landes). *Ann. Sci. For.*, **20** (1), 1-71.
- OHTA S., KELLER R., JANIN G., 1983. Essai de divers modes de fertilisation sur certaines caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et propriétés papetières du pin maritime des Landes (*Pinus pinaster*). I. - Caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. *Ann. Sci. For.*, **40** (3), 283-298.
- OHTA S., KELLER R., JANIN G., 1985. Effets de divers modes de fertilisation (N, P, K) sur certaines caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et propriétés papetières du pin maritime des Landes (*Pinus pinaster* Ait.). II. - Bois de compression et propriétés papetières. *Ann. Sci. For.*, **42** (1), 69-95.
- PERRIN J.R., 1983. Dispositif de sciages de carottes de sondage de 5 mm sans collage préalable sur un support. *Ann. Sci. For.*, **40** (4), 399-406.
- POLGE H., 1966. Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographie d'échantillons prélevés à la tarière sur les arbres vivants — Applications dans les domaines technologique et physiologique. *Thèse de Docteur ès Sciences Appliquées*, Faculté des Sciences de l'Université de Nancy.
- POLGE H., ILLY G., 1967. Observations sur l'anisotropie du pin maritime des Landes. *Ann. Sci. For.*, **24** (3), 205-231.
- POLGE H., 1969. Influence de la fertilisation sur la qualité du bois de pin maritime. *Ann. Sci. For.*, **26** (1), 45-64.
- POLGE H., KELLER R., 1969. La xylochronologie, perfectionnement logique de la dendrochronologie. *Ann. Sci. For.*, **26** (2), 225-256.
- POLGE H., 1978. Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Science and Technology*, **12**, 187-196.