

LAURENT SCHMITT
CIRAD-Forêt

JEAN-PIERRE BOUILLET
CIRAD-Forêt

TSOA RAFALY
D.R.F.P./FOFIFA

LA FERTILISATION DE *PINUS KESIYA* À MADAGASCAR



Parcelle de 25 ans (non éclaircie) établie sur plateau, fertilisation P à la plantation.
25-year-old plot (unthinned) set on a plateau, P fertilizer applied at planting.

Cet article présente les résultats des essais sur la préparation du terrain et la fertilisation de *Pinus kesiya*, suivis depuis plus de vingt ans dans le cadre d'un programme de recherche forestière que le CIRAD-Forêt et le D.R.F.P./FOFIFA* ont mené dans le bassin du Mangoro à Madagascar.

A Madagascar, dans le bassin du Mangoro, les 80 000 hectares plantés en pins tropicaux, dont 50 000 hectares avec *Pinus kesiya*, illustrent bien l'intérêt porté aux reboisements en essences à croissance rapide pour l'amélioration de l'économie des pays en développement. Dès la création du massif en 1969, la recherche forestière a mis en place une soixantaine d'essais sur *Pinus kesiya* visant pour la plupart à définir les modalités pratiques d'une sylviculture engagée dans la production intensive de bois de pâte à papier à courte révolution (≈ 15 ans). Les essais ont porté en priorité sur la fertilisation des peuplements. En effet, des expérimentations antérieures sur *Pinus patula* montraient la nécessité, sur les Hautes Terres malgaches, de corriger la fertilité des sols voués aux reboisements (BAILLY *et al.*, 1971). De plus, bien que *Pinus kesiya* ait une réputation de frugalité (NGUYEN, 1966), les ré-

férences, bien que peu nombreuses sur cette espèce, montraient que la fertilisation pouvait s'avérer indispensable : apport de NP aux Philippines ou de bore au Brésil, en Malaisie et en Zambie (ARMITAGE *et al.*, 1980). Les résultats ont conduit à préconiser des interventions combinant la préparation mécanisée du terrain et l'apport d'une fumure phospho-potassique au trou de plantation (MALVOS, 1980). Mais un récent bilan des expérimentations amène à s'interroger sur le bien fondé de cet itinéraire cultural.

PRÉSENTATION DU SITE

La région considérée se rattache à la zone des Hauts Plateaux. L'altitude est d'environ 950 m, le climat est tropical d'altitude à influence orientale (température et pluviométrie moyennes annuelles : ≈ 20 °C et



Parcelles de 26 ans (non éclaircies) établies sur un ancien champ de manioc ; de gauche à droite : témoin – fertilisation K à la plantation.

26-year-old plots (unthinned) set up on an old field of manioc, from left to right : control – K fertilizer applied at planting.

* Département des Recherches Forestières et Piscicoles du Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural.

≈ 1 500 mm). Les résultats présentés ici proviennent d'essais installés sur des sols de type ferrallitique développés à partir de divers matériaux mais dans l'ensemble fortement désaturés et déficients en phosphore. La première des trois stations où les essais ont été effectués correspond aux versants de collines formés sur migmatites. L'épaisseur de l'horizon humifère et la teneur en matière organique sont faibles (hauteur dominante à 5 ans = $H_{05} = 2,7$ m). Les deux autres composent les étendues relativement planes (plateaux et terrasses), établies sur alluvions, où l'on distingue les anciens terrains de culture ($H_{05} = 3,5$ m) des savanes naturelles ($H_{05} = 5,5$ m) : la morphologie du relief et le passé culturel apparaissent en effet comme des critères déterminants dans la typologie des sols.

RÉSULTATS

Dans la suite du texte, les symboles suivants seront utilisés :

H = hauteur moyenne,

G = surface terrière totale.

Les résultats porteront sur H pour la phase d'installation des peuplements et sur G pour la période ultérieure.

La densité de plantation varie suivant les essais de 1 600 à 2 000 plants/ha.

ESSAIS DE TRAVAIL DU SOL

Les essais ont eu pour but de tester, avec ou sans apport de fumure PK et dolomie, diverses façons culturales : trouaison manuelle, sous-solage (sur 40 cm), billonage, sous-solage billonage et labour en bandes. Les résultats de l'expérience la plus complète montrent que seul l'apport d'engrais a un effet significatif, quel que soit le critère considéré (H à 4,5 ans ou G à 10 ans). Bien que l'interaction fertilisation travail du sol ne soit pas significative, sa valeur paraît suffi-

samment importante pour qu'on analyse séparément les traitements avec ou sans fertilisation. On distingue alors (cf. tableau I) :

□ **L'efficacité du labour sans fertilisation.** Les trois interventions incluant un retournement des horizons superficiels sont les seules à avoir un effet bénéfique sur la hauteur moyenne à 4,5 ans. A 10 ans, seul le labour en bandes permet une production en surface terrière significativement supérieure au témoin (+ 4,8 m²/ha).

□ **L'inefficacité du travail du sol avec fertilisation.** Aucune distinction ne peut être faite entre les différentes façons culturales. Au terme de la période d'installation, le sous-solage billonage présente un léger avantage sur les autres techniques mais la valeur des surfaces terrières suffit à démontrer que le travail du sol est inutile lorsqu'on fertilise avant la plantation.

ESSAIS DE FERTILISATION

La fertilisation à la plantation

Le tableau II, p. 48, rassemble les principaux résultats des expérimentations ayant eu pour but de définir, suivant les stations, la nature des apports à effectuer à la plantation.

□ **Fertilisation des versants.** Les pentes se caractérisent par des conditions édaphiques particulièrement sévères qui conduisent à une très faible croissance des peuplements et à des dessèchements de cime liés à une carence en zinc. Il est de ce fait nécessaire d'appliquer une fumure de redressement la plus complète possible : N, P, K, Zn. Celle-ci permet à 7 ans un gain remarquable en surface terrière de 17,6 m²/ha (+ 500 % par rapport au témoin) et conduit à une production comparable à celle des peuplements-témoins venant sur les meilleurs sols. Il faut noter que NPK (5-30-24 g/plant) est un facteur limitant au même degré que le zinc

TABEAU I
ESSAI DE TRAVAIL DU SOL : EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA HAUTEUR MOYENNE À 4,5 ANS ($H_{4,5}$ en m) ET LA PRODUCTION EN SURFACE TERRIÈRE TOTALE À 10 ANS (G_{10} en m²/ha)

Sans engrais		Avec engrais (PK + dolomie)	
$H_{4,5}$	G_{10}	$H_{4,5}$	G_{10}
T 1,4	T 10,2	B 3,5	B 23,2
SS 1,6	S 12,2	Lb 3,6	SSB 24,8
Lb 2,1	B 13,8	T 3,7	SS 25,3
B 2,3	SSB 13,8	SS 3,8	T 26,0
SSB 2,4	Lb 15,0	SSB 3,9	Lb 26,2

= signification au seuil de 5 %.

T : trouaison manuelle (témoin).

SS : sous-solage.

B : billonage

SSB : sous-solage billonage.

Lb : labour en bandes.

TABLEAU II
RÉSULTATS D'ESSAIS DE FERTILISATION À LA PLANTATION :
HAUTEUR MOYENNE (H en m) ET SURFACE TERRIÈRE TOTALE (G en m²/ha) À DIFFÉRENTS ÂGES (an)

Station	Essai	Age	Variable	Témoin	Meilleur traitement	
Pentes	fumures (P, PK, NPK) nutramine*	4	H	1,9	N₅₃P₃₀K₂₄ + nut. ₁₂	4,2
		7	G	3,5	N₅₃P₃₀K₂₄ + nut. ₁₂	21,1
Anciennes terres de culture	factoriel (Ca + Mg)PK	4,5	H	2,6	K₂₄ + P	5,2
		10	G	16,2	K₂₄ + (Ca + Mg)	33,1
	factoriel NPK	4,5	H	3,6	K₂₄ + P	5,8
		10	G	17,6	K₂₄	25,8
Savanes naturelles	factoriel (Ca + Mg)PK	4,5	H	4,3	P₃₈ + K	5,7
		10	G	29,6	P₃₈ + (Ca + Mg)	36,6
	factoriel NPK	4,5	H	3,6	P₅₃ + K	5,3
		10	G	30,8	P₅₃ + K	38,9

Les éléments en caractères gras sont les plus efficaces, leur indice signifie la quantité apportée (g/plant).

* Un autre essai a montré que le zinc était le seul oligo-élément agissant.



Parcelles de 20 ans (non éclaircies) établies sur pente et fertilisées à la plantation. Au premier plan : traitement NPK, en arrière-plan : traitement NPK + Zn.

20-year-old plots (unthinned) set up on a slope and fertilized at planting. On the foreground : NPK treatment, background : NPK + Zn treatment.

(0,6 g/plant) : les deux types d'apport agissent déjà lorsqu'ils sont appliqués seuls (cf. fig. 1) et leur association entraîne une interaction positive.

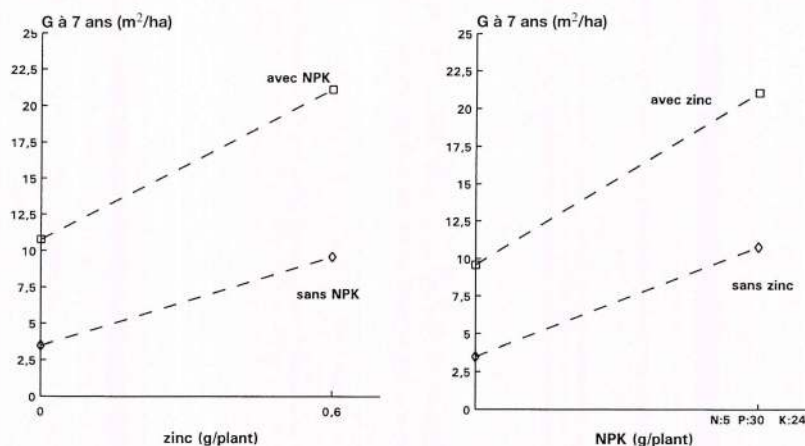
□ **Fertilisation des plateaux et terrasses.** Quatre essais permettent

d'étudier les effets des éléments N, P, K, Ca, Mg, isolés ou associés.

- En phase d'installation : les réponses aux applications de potasse ou de phosphore sont beaucoup plus importantes et fréquentes que celles obtenues avec l'azote ou un

amendement calco-magnésien. L'analyse de la hauteur moyenne en cinquième saison de végétation démontre que les seuls effets significatifs sont ceux de la potasse (24 g de K₂O/plant) et du phosphore (38 ou 53 g de P₂O₅/plant selon l'essai). Par ailleurs, il n'existe pas d'interac-

Figure 1. Représentation de l'interaction NPK x Zinc observée sur versants.



tion significative P x K. La fumure phospho-potassique se révèle donc la plus active mais le rôle primordial revient à la potasse pour les terres qui en manquent par suite d'une culture antérieure (manioc ou arachide) et au phosphore pour les savanes naturelles.

- En période ultérieure : on observe que l'action de P et K ne se prolonge pas au-delà de 5 à 7 ans ; l'accroissement supplémentaire en surface terrière éventuellement observé n'est plus dû à l'effet direct de la fumure mais à un matériel générateur, foliaire et racinaire, plus développé. Etant donné que toutes les quantités de P_2O_5 et de K_2O n'ont pas dû être consommées, on peut évoquer les phénomènes classiques de rétrogradation du phosphore

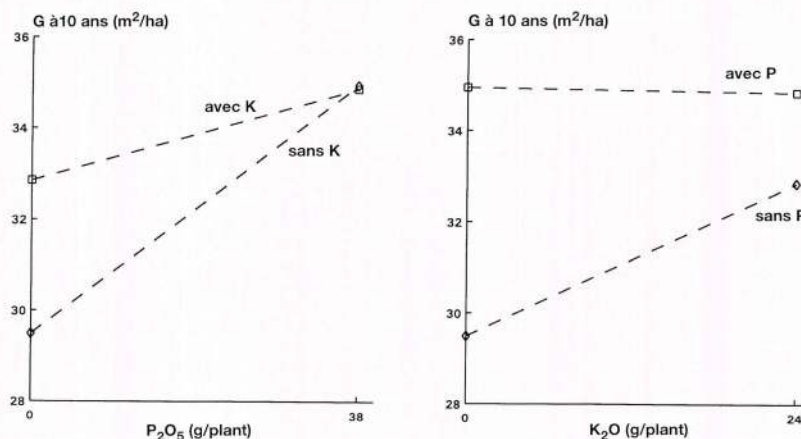
vers des formes peu assimilables et de perte de potasse par lessivage faute d'un complexe absorbant suffisant (GROS, 1979 ; IRAT, 1967).

- Quant à l'interaction P x K, elle apparaît au Mangoro rarement favorable. Dans trois expériences sur quatre, l'apport de l'élément le plus limitant s'avère aussi efficace que l'association PK en raison d'une interaction négative (cf. fig. 2). L'additivité des effets ne s'observe en fait que dans un essai installé sans labour. Il semblerait qu'avec une fertilisation PK, le travail du sol, en permettant un meilleur développement racinaire, entraîne un épuisement rapide des éléments disponibles, notamment ceux provenant de la minéralisation accélérée de la matière organique. L'interaction né-

gative P x K s'expliquerait alors par l'apparition d'un facteur limitant, qui reste à déterminer.

- Des carences en zinc peuvent se manifester sur les meilleurs sols. La fréquence des dessèchements de cime est alors liée à la nature de l'itinéraire cultural pratiqué. Les symptômes de dépérissement sont beaucoup plus fréquents, d'une part sur sol travaillé mécaniquement, d'autre part après l'apport d'engrais potassique au trou de plantation. La fertilisation phosphatée a, par contre, un effet bénéfique lorsqu'appliquée seule mais elle ne parvient pas complètement à compenser l'influence négative de la potasse lorsque les deux types de fumure sont combinés.
- Formule conseillée : on peut préconiser l'apport à la plantation de

Figure 2. Représentation de l'interaction P x K observée sur savanes naturelles.



l'élément le plus limitant, soit K pour les anciens terrains de culture et P pour les savanes naturelles. Les doses conseillées sont alors de 25-30 g de K_2O /plant et 40-50 g de P_2O_5 /plant. La meilleure production semble devoir être obtenue avec, en complément, un amendement calco-magnésien (150 g de dolomie/plant).

La fertilisation de rattrapage

Pour les étendues planes, l'efficacité du labour sans fertilisation ainsi que l'interaction négative entre le travail du sol et la fumure PK conduisent à se poser la question de l'opportunité de dissocier dans le temps les deux

interventions. Peu d'essais permettent de répondre mais les quelques résultats obtenus mettent en évidence :

- l'absence d'effet du phosphore, contrairement à ce que l'on observe pour la fertilisation de départ ;
- l'effet significatif d'un apport de potasse (24 g de K_2O /plant) à des plantations bienvenantes âgées de 4-5 ans et établies sur terrain travaillé ou non. Il semblerait qu'on puisse espérer en fin de révolution une production analogue à ce que permet la fumure phosphatée de départ.

Homogénéisation des peuplements

Outre un gain de croissance moyenne, la fertilisation conduit à des peuplements plus homogènes et donc plus intéressants dans un objectif papetier. Un exemple de ce phénomène est illustré par la figure 3 : sur les anciens sols de culture, la distribution des tiges par classe de circonférence est significativement différente, au seuil de 1 % ($\chi^2 = 387$), entre le témoin et une fertilisation K + dolomie. Ce dernier traitement présente alors un coefficient de variation sur la circonférence moyenne de 31,0 % à comparer à 45,1 %.

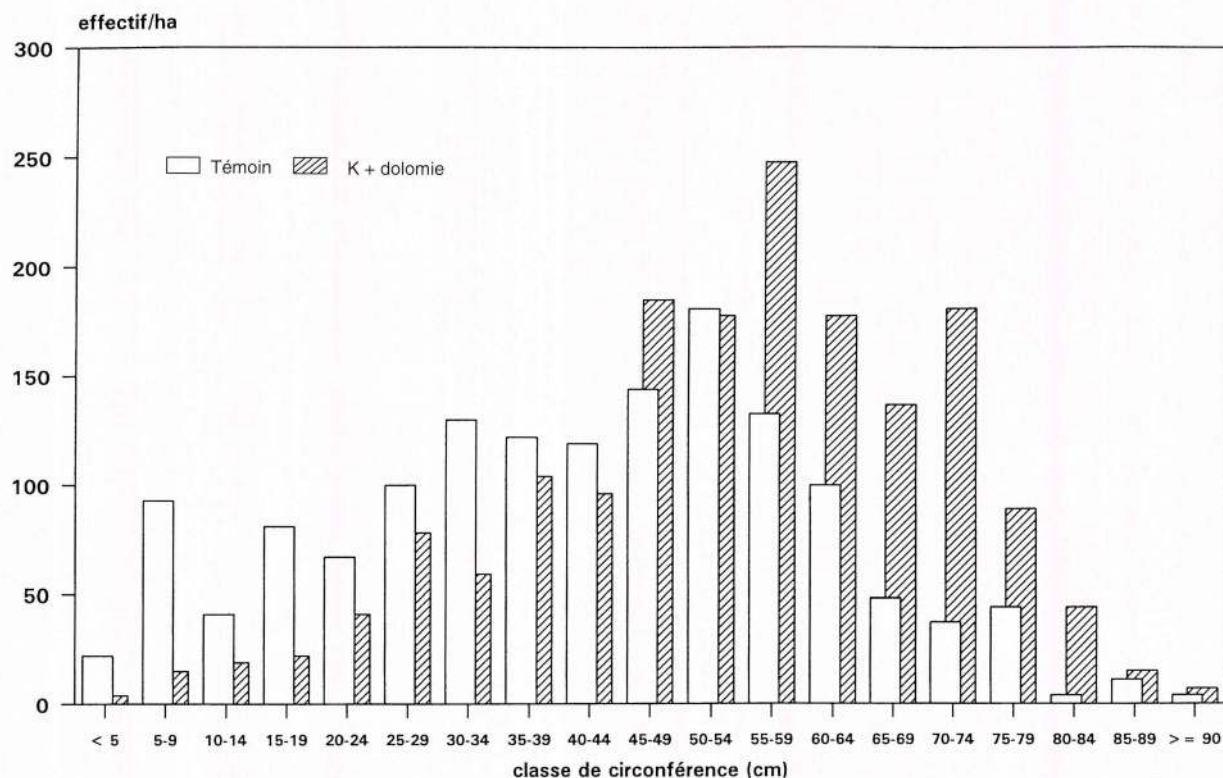


Figure 3. Distribution des tiges par classe de circonférence des traitements-témoins et fertilisation potasse + dolomie (ensemble des tiges des 4 blocs d'un essai situé sur un ancien terrain de culture).

ÉTUDE ÉCONOMIQUE

Le tableau III montre que, en prenant le cas des meilleurs sols :

- la meilleure rentabilité (valeur actualisée formée) est obtenue avec la fertilisation P + dolomie sans préparation mécanisée du terrain,
- la fertilisation PK associée à un sous-solage billonage conduit au plus mauvais résultat économique,
- le bénéfice moyen annuel est maximal pour une durée de révolution d'environ 15 ans, soit 3-4 ans après l'accroissement moyen maximal en volume total.

CONCLUSION DISCUSSION

Les résultats précédents démontrent que la fertilisation doit être adaptée à chaque type de station et qu'il est possible de se passer d'une préparation mécanisée du terrain. Mais

beaucoup de points restent encore à éclaircir.

□ La fertilisation à la plantation recommandée aujourd'hui n'est pas forcément la meilleure. On manque, par exemple, d'essais d'équilibre ou de doses pour fixer des rapports optimaux entre éléments fertilisants.

□ Les expérimentations mises en place ne permettent pas de se prononcer sur la formule à adopter pour entretenir la fertilité des sols. Les essais de refertilisation en cours de révolution n'ont toujours testé que deux types de fumures (PK ou NPK).

□ On connaît mal le mode d'action des engrais et l'évolution des besoins nutritifs de la plante, sujet dont l'intérêt dépasse le simple cas de *Pinus kesiya* à Madagascar. Par exemple, dans le cas des savanes naturelles :

- le phosphore est l'élément essentiel de la fumure de départ mais c'est la potasse qui le devient dans le cas d'une fertilisation de rattrapage,

- il existe des facteurs limitants non identifiés à l'action du phosphore,

- la plupart des interactions entre facteurs (éléments minéraux, travail du sol) deviennent très vite négatives,

- le déterminisme de la rémanence de l'engrais n'est pas connu.

□ A un moment où l'une des priorités mondiales est de mettre au point des modèles de développement durable, il est impératif d'établir un bilan minéral des plantations en fin de première révolution afin de mesurer les conséquences, positives ou négatives, des pratiques sylvicoles adoptées sur la fertilité des sols. □

► Laurent SCHMITT
Jean-Pierre BOUILLET
CIRAD-Forêt
B.P. 745
ANTANANARIVO (Madagascar)

► Tsoa RAFALY
D.R.F.P./FOFIFA
B.P. 904
ANTANANARIVO (Madagascar)

TABLEAU III

VALEUR ACTUALISÉE FORMÉE PAR AN, EN MOYENNE DEPUIS LE DÉBUT DE LA PLANTATION
POUR DIFFÉRENTS SCÉNARIOS SYLVICOLES SUR SAVANE NATURELLE

Calculs au 1.6.94 sur les bases d'un taux d'actualisation de 5 % et de 350 FMG = 1 FF

Date (ans)	13	14	15	16	17
Scénario n° 1 : trouaison		(Investissement initial = 190 000 FMG)			
Bois fort sur pied (m ³ /ha)	136,9	152,2	167,0	181,0	194,4
Valeur ajoutée actualisée (FMG/ha/an)	14 700	15 255	15 450	15 330	15 015
Scénario n° 2 : trouaison fumure P + dolomie		(Investissement initial = 325 000 FMG)			
Bois fort sur pied (m ³ /ha)*	229,0	250,4	270,6	289,6	307,5
Valeur ajoutée actualisée (FMG/ha/an)	24 050	24 135	23 890	23 220	22 315
Scénario n° 3 : sous-solage billonage fumure PK		(Investissement initial = 535 000 FMG)			
Bois fort sur pied (m ³ /ha)	229,0	250,4	270,6	289,6	307,5
Valeur ajoutée actualisée (FMG/ha/an)	7 890	9 210	9 890	10 095	9 960

* Production estimée : équivalente à celle du scénario n° 3.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARMITAGE (F. B.), BURLEY (J.), 1980.
Pinus kesiya. Commonwealth Forestry Institute, Tropical Forestry Papers n° 9, 199 p.
- BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC, MALVOS (C.), 1971.
 Essais sur *Pinus patula* à la Matsiatra. Note C.T.F.T./Madagascar n° 195, 65 p.
- GROS (A.), 1979.
 Engrais. Guide pratique de la fertilisation. Paris, France, la Maison Rustique, 370 p.
- IRAT, 1967.
 Actes du Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, Madagascar, 19-25 novembre, tome I, 1 254 p.
- MALVOS (C.), 1980.
 Rôle du potassium et du phosphore sur la croissance des reboisements de *Pinus kesiya* à Madagascar. Université de Nancy I, 134 p. Thèse de docteur ingénieur.
- NGUYEN (K.), 1966.
 Les forêts de *Pinus kesiya* et de *Pinus merkusii* du Centre-Vietnam. Etude de la dynamique des sols en liaison avec celle de la végétation. Annales des Sciences Forestières, tome XXIII, fascicule 2, p. 213-372.

R É S U M É

LA FERTILISATION DES PLANTATIONS INDUSTRIELLES DE *PINUS KESIYA* À MADAGASCAR

Cette communication traite des facteurs stationnels et culturaux (fertilisation et travail du sol) qui conditionnent la réussite d'une plantation industrielle de *Pinus kesiya* dans le bassin du Mangoro à Madagascar. Une analyse préalable montre l'influence de la topographie et de l'antécédent cultural sur l'aptitude au boisement des différents types de sols ferrallitiques présents dans la région. Il n'est pas souhaitable de rechercher la croissance juvénile la plus forte qu'on obtient après travail du sol et apport localisé d'engrais phospho-potassique. L'avantage revient à un système cultural simplifié consistant à se passer de labours et à n'apporter que l'élément minéral le plus limitant : le potassium pour les anciennes terres agricoles, le phosphore pour les savanes naturelles. Beaucoup de sujets dont l'intérêt dépasse le simple cas de *Pinus kesiya* à Madagascar restent encore à étudier, tels le mode d'action des engrais, l'évolution des besoins nutritifs de la plante et l'impact des pratiques sylvicoles adoptées sur la fertilité.

Mots-clés : Fertilisation. Croissance. Plantation forestière. Facteur lié au site. *Pinus kesiya*. Madagascar.

A B S T R A C T

THE FERTILIZATION OF INDUSTRIAL *PINUS KESIYA* PLANTATIONS IN MADAGASCAR

This study concerns the effects of land fertilization and preparation on the success of *Pinus kesiya* plantations in Madagascar (Mangoro basin). A preliminary analysis shows the influence of topography and cultural antecedence on the suitability for afforestation of the different types of ferrallitic soils in the region. There is no point in going after the strongest form of juvenile growth, which is obtained after working the land, with localized input of phospho-potassic fertilizer. The advantage lies in a simplified farming system consisting in bypassing ploughing and only adding the most limiting mineral element : potassium for cold croplands, phosphorus for natural savanna. Many topics, which extend beyond the individual case of *Pinus kesiya* in Madagascar, still remain to be studied. One such is the way fertilizer functions. Others include the development of the plant's nutritive requirements, and the impact of the silvicultural methods adopted on fertility.

Key words : Fertilizer application. Growth. Forest plantations. Site factors. *Pinus kesiya*. Madagascar.

R E S U M E N

LA FERTILIZACIÓN DE LAS PLANTACIONES INDUSTRIALES DE *PINUS KESIYA* EN MADAGASCAR

Se estudia en este artículo la influencia de la fertilización y de la preparación del terreno con respecto al logro de las plantaciones de *Pinus kesiya* en Madagascar (cuenca del Mangoro). Un análisis preliminar viene a demostrar la influencia de la topografía y del antecedente cultural sobre la aptitud para la plantación de bosques de diferentes tipos de suelos ferralíticos existentes en esta región. No parece deseable tratar de conseguir el crecimiento juvenil más acusado que se obtiene tras labores del suelo y aportación localizada de fertilizantes fosfo-potásicos. Por ello, presenta mayores ventajas un sistema de cultivo simplificado que consiste en prescindir de labores y aportar únicamente el elemento mineral más limitante : el potasio para las antiguas tierras agrícolas, el fósforo para las sabanas naturales. Son muchos los temas cuyo interés sobrepasa el simple caso de *Pinus kesiya* de Madagascar que aún quedan por estudiar, por ejemplo, el modo de acción de los fertilizantes, la evolución de las necesidades nutritivas de la planta y el impacto de las prácticas sylvícolas adoptadas acerca de la fertilidad.

Palabras clave : Aplicación de abonos. Crecimiento. Plantación forestal. Características del sitio. *Pinus kesiya*. Madagascar.