

RÔLE DU POTASSIUM ET DU PHOSPHORE SUR LA CROISSANCE DES REBOISEMENTS DE PINUS KESIYA À MADAGASCAR ⁽¹⁾

par
Claude MALVOS * , Maurice BONNEAU **,
Bernard SOUCHIER ***

RESUMEN

PAPEL DESEMPEÑADO POR EL POTASIO Y EL FOSFORO EN EL CRECIMIENTO DE LAS REPOBLACIONES DE PINUS KESIYA, EN MADAGASCAR

En la primera parte de este artículo, que se ha publicado en el número 198, el autor ha estudiado el género de suelos del perímetro de repoblación mediante Pinus kesiya, del Alto Mangoro y asimismo, la necesidad de su fertilización, en caso de que se desee conseguir un rendimiento máximo.

En el artículo que figura a continuación, se trata de la investigación de los criterios analíticos que permiten dar cuenta del género de suelos « in situ » y de los mecanismos de la acción de la fertilización. Los efectos respectivos del potasio y del fósforo permiten establecer la diferencia entre los cuatro tipos principales de estaciones y la investigación de criterios analíticos para permitir evidenciar las particularidades de cada tipo de estación.

SUMMARY

THE ROLE OF POTASSIUM AND PHOSPHORUS IN THE GROWTH OF PINUS KESIYA REAFFORESTATIONS IN MADAGASCAR

In the first part of this article, published in issue n° 198, the author examined the nature of the soils on the perimeter of the Pinus kesiya reafforestation area in the Haut Mangoro, and dealt with the need for their fertilization in order to obtain a maximum yield.

In this part, he deals with the quest for analytical criteria making it possible to take account of the nature of the soils in situ, and the mechanisms of fertilization. The respective effects of potassium and phosphorus differentiate the four main types of stations, and seeking analytical criteria can reveal the particularities of each type of station.

(1) La première partie de cet article a été publiée dans le n° 198.

* C.T.F.T. ** I.N.R.A.-C.N.R.F. — Champenoux. *** C.N.R.S. — Centre de Pédologie Biologique. Vandœuvre-les-Nancy

RECHERCHE DE CRITÈRES ANALYTIQUES PERMETTANT DE RENDRE COMPTE DE LA FERTILITÉ DES SOLS *IN SITU*

Les résultats des essais au champ (essais de fertilisation à la plantation) montrent que les quatre stations présentent une carence générale en *P* (un peu plus accentuée pour les moyennes et mauvaises tanety que pour les autres) et une carence en *K* très variable :

- la bonne tanety a une fertilité moyenne en *K*,
- la moyenne tanety et la terrasse sont très carencées en *K*,
- la mauvaise tanety a une fertilité en *K* un peu plus faible que la bonne tanety.

Les résultats des analyses chimiques de ces sols montrent qu'ils sont tous très fortement carencés en *P* et en *K*.

— Les teneurs en P_2O_5 assimilables sont, pour les quatre sols, respectivement de :

- 16-14-16-20 ppm pour l'horizon superficiel,
- 20-12-12-16 ppm pour l'horizon profond.

— Les teneurs en K^+ échangeable sont respectivement, pour les quatre sols, de :

- 0,11-0,05-0,10-0,04 m.e. pour 100 g pour l'horizon superficiel,
- 0,05-0,02-0,04-0,04 m.e. pour 100 g pour l'horizon profond.

Ces analyses chimiques, bien qu'elles hiérarchisent correctement les carences en *K*, ne suffisent donc pas à expliquer les différences obtenues sur le terrain, ni même à diagnostiquer plus que la réponse à une fertilisation phosphopotassique.

Aussi avons-nous essayé de trouver, par d'autres méthodes, les explications des résultats de terrain. Ces méthodes sont, soit des analyses biologiques (étude des carences par les vases de végétation), soit des analyses chimiques effectuées par des méthodes différentes.

Les tests en vases de végétation.

Nous ne reviendrons pas sur la méthode de détermination des carences d'un sol par la culture d'une plante test en petits vases de végétation, méthode qui a été mise au point par M. CHAMINADE (CHAMINADE — 1965). La plante test choisie était le Ray-Grass. Pour l'interprétation des résultats, nous avons retenu l'échelle ci-après, que l'on a appliqué aux mesures (tableau ci-après). (MALVOS et al., 1980).

Ce tableau met en évidence la validité des essais en vases de végétation en ce qui concerne la nutrition potassique. On a bien une carence moyenne ou faible sur les bonnes tanety et très forte sur les tanety de moyenne fertilité et sur les terrasses. Le schéma n° 7 montre également une carence plus marquée en oligo-éléments sur les mauvaises tanety.

Mais dans tous les cas, la carence en phosphore est très fortement surestimée par rapport aux résultats des essais en place.

En fait, cette méthode d'analyse, avec le Ray-Grass comme plante test, peut-être intéressante en Agronomie, est beaucoup moins adaptée à la Foresterie. L'équipement ectomycorhizien des Pins, que n'ont pas les plantes habituellement utilisées comme le Ray-Grass, peut modifier notablement les résultats. Un seul essai avec des semis de Pins comme plante test, réalisé à Madagascar, a montré la nécessité de maîtriser parfaite-

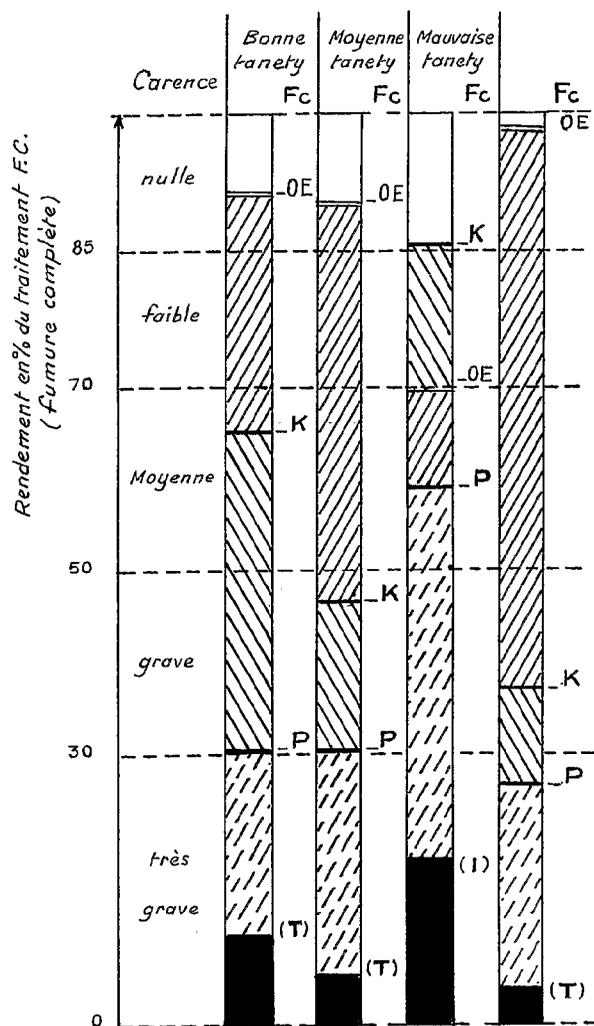


Schéma N° 7

Niveaux des carences en P, K et oligo-éléments des quatre stations

Fumure complète	F.C.	F.C.	O.E. oligoéléments
"	"	F.C.	K potassium
"	"	F.C.	P phosphore
"	"	F.C.	FC=O témoin(T)

		Bonne tanety	Moyenne tanety	Mauvaise tanety	Terrasse
Période de culture du Ray-Grass		Déc. 70 - Janv. 71 Été	Mars-Mai 69 Automne	Juill.-Août 75 Hiver	Mai-Juin 69 Automne
Témoin (en g)		1,99	0,69	0,98	0,64
Fumure complète (en g)		19,9	12,1	5,3	16,5
FC-P	1° coupe (% F.C.)	40	37	53	34
	2° coupe (% F.C.)	20	20	55	29
	3° coupe (% F.C.)	23	26	77	11
	Total (% F.C.)	29,5	30,0	59,0	26,5
	Carence	Très grave	Très grave	Moyenne	Très grave
FC-K	1° coupe (% F.C.)	80	57	83	56
	2° coupe (% F.C.)	60	34	83	46
	3° coupe (% F.C.)	41	35	94	0
	Total (% F.C.)	64,3	46,4	85,4	37,1
	Carence	Moyenne	Grave	Faible	Grave

ment le dispositif (homogénéité des lots de plantules, etc.) pour être interprétable.

moyenne tanety et très nettement inférieures pour la mauvaise tanety.

Phosphore et Potassium, Teneurs et formes.

On pourrait schématiser, comme suit, les niveaux relatifs recherchés :

Analyse du phosphore

Sous l'égide de l'Institut Mondial du Phosphore (IMPHOS), les Instituts du GERDAT ont décidé, en 1976, d'entreprendre une enquête systématique sur le statut phosphorique des sols tropicaux. Le C.T.F.T. a fourni un certain nombre d'échantillons dont sept échantillons correspondent aux quatre types de sols étudiés ici.

La méthode utilisée par le GERDAT a été décrite dans les publications de l'IMPHOS (ROCHE, *et al.*, Juin 1978).

Nous avons reporté, dans le tableau de la p. 32, pour chacun des sols étudiés, les principaux résultats obtenus par les analyses chimiques.

Parmi toutes ces méthodes, il faudrait retenir celles qui fournissent des résultats concordant avec les essais au champ, c'est-à-dire :

— pour les horizons de surface : des valeurs de P voisines pour la bonne tanety, la terrasse et la moyenne tanety et un peu plus faibles pour la mauvaise tanety ;

— pour les horizons de profondeur : des valeurs équivalentes pour la bonne tanety, la terrasse et la

	Bonne tanety	Moyenne tanety	Mauvaise tanety	Terrasse
Horizon de surface ...	_____	_____	_____	_____
Horizon profond	_____	_____	_____	_____

Il n'y a guère que quatre méthodes qui donnent une image relativement fidèle de la réalité :

- P total, bien qu'il pénalise un peu la terrasse dans les horizons superficiels,
- P Truog, malgré ses faibles valeurs absolues,
- P eau, bien qu'il surestime un peu la fertilité de l'horizon de surface de la mauvaise tanety,
- P organique.

Leur utilisation simultanée pourrait fournir un diagnostic amélioré en adoptant les valeurs critiques suivantes :

— P total	700 ppm
— P Truog	30 ppm
— P eau	0,1 ppm
— P organique	50 ppm

Une fois de plus, les analyses agronomiques classiques (Bray, Olsen...) ne donnent pas de résultats satisfaisants pour les expérimentations forestières. Compte

	Horizon de surface				Horizon profond		
	Bonne tanety	Moyenne tanety	Mauvaise tanety	Terrasse	Bonne tanety	Moyenne tanety	Mauvaise tanety
pH (eau)	5,0	5,2	5,6	4,9	5,7	5,2	5,0
P total ppm	555	520	300	340	445	470	235
Olsen ppm	37	28	5	30	19	19	4
Saunders ppm	190	130	61	95	85	95	57
Truog ppm	0,5	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	0,2
Bray n° 2 ppm	1,7	3,5	0,4	5,2	0,8	0,8	0,2
Dalal ppm	140	91	43	79	78	38	44
P eau ppm	0,07	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,01
Valeur L ppm	17	7	6	9	5	2	2
PF Gachon	574	1.210	946	432	824	554	1.312
Indice Gachon ppm	0,49	0,04	0,04	0,18	0,04	0,01	0,01
P-AL ppm	75	10	4	22	42	37	3
P-Fe ppm	67	45	33	28	45	35	37
P-Ca ppm	7	7	3	5	5	5	3
P Occlus ppm	364	404	236	235	324	358	179
P organique ppm	41	53	23	49	28	34	12
P désorbé résine en 48 h ppm	0,95	0,62	4,26	0,75	0,55	0,66	1,86

tenu du faible nombre d'échantillons analysés, tous ces résultats devront être confirmés avant conclusions définitives.

Analyse du potassium

Nous disposons d'une part du potassium échangeable extrait à l'acétate d'ammonium normal et, d'autre part,

du dosage du potassium dit total après attaque nitrique ou fluoperchlorique. Les analyses ont été effectuées sur les deux horizons de chaque type, non seulement avant la mise en place des essais, mais aussi après quelques années de croissance et, par conséquent, de consommation potassique des Pins.

Les résultats sont les suivants :

		Horizon de surface				Horizon profond		
		Bonne tanety	Moyenne tanety	Mauvaise tanety	Terrasse	Bonne tanety	Moyenne tanety	Mauvaise tanety
avant plantation	K échangeable m.e./100 g	0,11	0,05	0,10	0,04	0,05	0,02	0,4
après plantation	K échangeable m.e./100 g	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02
	K échangeable ppm	11	11	7	11	3	11	7
	K total nitrique ppm	84	31	80	34	26	24	45
	K total fluoperchlorique ppm	154	118	100	107	68	125	88
	% saturation dans la CEC		0,6	1,6	0,2	0,6	0,5	0,6

On admet, pour un sol de texture moyenne (Quémener) (15 à 25 % d'argile), que le seuil critique, à partir duquel le sol présente une carence en potassium, se situe aux environs de 0,15 à 0,20 m.e. pour 100 g de K, ou encore pour des teneurs inférieures à 1,5 % du pourcentage de saturation de K dans la CEC.

En appliquant ces seuils critiques, tous les sols du Mangoro apparaissent comme carencés en potassium d'une façon plus ou moins grave.

Le potassium échangeable, mesuré avant les plantations, et le potassium nitrique après plantation, reflètent très bien les résultats obtenus avec les essais au champ :

- la bonne tanety et la mauvaise tanety sont peu carencées en K_2O échangeable (0,10 m.e. pour 100 g) avec 80 ppm de K_2O nitrique ;
- la moyenne tanety et la terrasse sont très caren-

cées en K_2O échangeable (0,05 et 0,04 m.e. pour 100 g) avec 30 ppm de K_2O nitrique.

Les teneurs en potassium échangeable, mesurées quelques années après plantation, deviennent uniformément pauvres : 0,02 à 0,03 m.e. pour 100 g. Les plantations ont donc, en quelques années, pratiquement épuisé le potassium échangeable.

Sur le vu de ces résultats, on serait tenté de fixer un seuil pour le niveau de fertilité potassique qui se situerait aux environs de 100 p.p.m. pour le K total nitrique.

En conclusion, on dispose de 2 bons critères de classement et des prévisions de carences potassiques de ces types de stations :

- le potassium échangeable, mais seulement avant plantation,
- le potassium total nitrique après plantation.

MÉCANISMES DE L'ACTION DE LA FERTILISATION

Les réponses à la fertilisation, en termes de croissance et de production, ont été quantifiées.

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'aborder les mécanismes de cet effet fertilisation :

— effet sur l'absorption des éléments minéraux, soit action directe et éphémère, soit surtout action indirecte et prolongée sur le développement racinaire que l'on a donc étudié sur quelques cas ;

— équilibre de la nutrition : nous avons utilisé le diagnostic de la composition foliaire ;

— enfin, nous avons essayé d'établir le bilan : « apport de la fertilisation — consommation minéral-masse (approchée d'un arbre de 10 ans) » que nous avons confronté aux réserves du sol.

Enfin, un rappel des résultats obtenus en lysimétrie montre la mobilité de certains éléments dans les eaux de drainage.

Prospection racinaire

L'étude de l'enracinement du Pinus kesiya en fonction du travail du sol et de la fertilisation a été réalisée en 1978 sur l'essai n° 2 par Madame RATSIMALA Ramonta Isabelle (diplôme d'Etudes Approfondies de Sciences Biologiques Appliquées — option Agronomie).

De cette étude (RATSIMALA, 1979) il ressort qu'à l'âge de 9 ans 1/2, les Pins ont largement dépassé les limites de leur espace imparti par la densité de plantation (2.000 plants/ha, soit 5 m² par plant = 2 m × 2,5 m — graphique n° 8).

La longueur de la racine la plus longue en fonction du traitement est la suivante :

	Sans engrais	Avec engrais
Trouaison	5,95 m	5,15 m
Sous-solage	9,10 m	7,20 m
Billonnage	6,90 m	6,00 m
Sous-solage-billonnage	9,80 m	7,50 m
Labour en bande	9,80 m	6,50 m
Moyenne	8,30 m	6,50 m

On constate que :

1) Les racines les plus longues correspondent aux traitements sans fertilisation mais avec travail du sol.

2) La densité des racines est beaucoup plus importante dans les parcelles avec engrais que dans celles sans engrais et l'horizon rhizosphérique y est toujours plus épais comme en témoigne le tableau ci-après.

La profondeur exploitée par le système racinaire, hormis le pivot, est la suivante :

	Sans engrais	Avec engrais
Trouaison	0,15 m	0,60 m
Sous-solage	0,20 m	0,70 m
Billonnage	0,20 m	0,60 m
Sous-solage-billonnage	0,25 m	0,80 m
Labour en bande	0,20 m	0,70 m
Moyenne	0,20 m	0,70 m

	Profondeur du pivot		Circonférence du pivot à 50 cm de profondeur	
	Sans engrais	Avec engrais	Sans engrais	Avec engrais
Trouaison	0,65 m	0,70 m	10,0 cm	20,5 cm
Sous-solage	0,80 m	1,00 m	18,0 cm	24,5 cm
Billonnage	0,80 m	0,80 m	11,0 cm	20,5 cm
Sous-solage-billonnage	0,85 m	0,90 m	14,5 cm	11,0 cm
Labour en bande	0,80 m	0,90 m	9,5 cm	14,0 cm
Moyenne	0,80 m	0,85 m	12,5 cm	18,0 cm

3) Le pivot également est beaucoup plus développé dans les parcelles avec engrais, surtout en grosseur. Il descend également un peu plus profondément (cf. tableau ci-dessus).

On peut, selon ces chiffres, estimer rapidement le volume de sol prospecté par le système racinaire tout entier. Nous ne retiendrons que les deux types de traitements : avec et sans engrais.

Racines	Surface	5 m ²	5 m ²
	Profondeur	0,20 m	0,70 m
	Volume	1 m ³	3,5 m ³
Prospection complémentaire (reste du pivot)	Surface	0,25 m ²	0,25 m ²
	Profondeur	0,60 m	0,15 m
	Volume	0,15 m ³	0,03 m ³

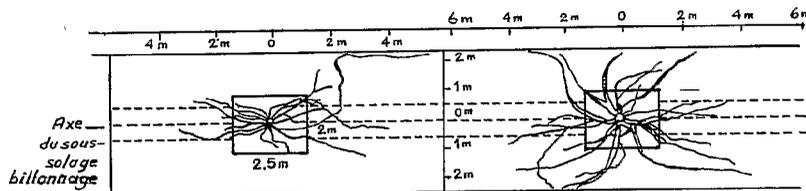
Étude comparative de l'enracinement

Sur sous-solage billonnage

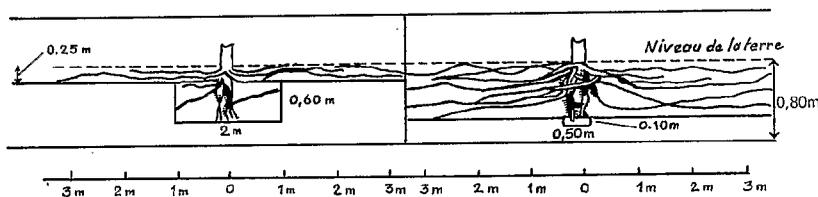
Sans engrais

Avec engrais

VUE DE DESSUS



VUE DE PROFIL



	0	PK
H. Superficiel	1,02 m ³	1,5 m ³
H. Profond	0,13 m ³	2,0 m ³
Total	1,15 m ³	3,5 m ³

Graphique N° 8

Les arbres ayant reçu de l'engrais à la plantation occupent donc un volume de terre au moins trois fois supérieur à ceux qui n'en ont pas reçu (1,15 m³ et 3,50 m³). Cela est intéressant pour estimer les réserves disponibles dans le sol pour les deux types de plantation et l'on peut noter que dans le cas du traitement fertilisé, l'enracinement dépasse très largement l'horizon superficiel de l'ordre de 30 cm.

La fertilisation joue donc un rôle important dans le développement racinaire, qui se traduit par la mise à la disposition du plant fertilisé d'une quantité d'éléments minéraux pratiquement triple.

Diagnostic foliaire.

Des études de diagnostic foliaire ont été réalisées par le Département des Recherches Forestières et Piscicoles à Madagascar (Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies de Sciences Biologiques Appliquées — option Agronomie) par Madame RAMPANANA (1979) en collaboration avec le C.T.F.T. (M. BRUNCK) et le GERDAT.

Ces travaux convergent pour donner de précieuses indications sur l'utilisation du diagnostic foliaire, en particulier pour l'appréciation de la nutrition potassique et de la carence en zinc.

Cette technique, facile à appliquer, pourrait être systématiquement utilisée pour situer le niveau de nutrition *K* et des besoins en zinc pour lutter contre le dessèchement des cimes. Il faut rappeler que le seuil de carence en potassium pour le *Pinus kesiya* du Mangoro semble se situer à 0,18 % de *K* et pour le zinc de 7 à 8 ppm de zinc (aiguilles d'un an).

Nous trouvons des teneurs en *K* (% de matière sèche) :

- de 0,16 pour les parcelles sans *K*,
- et de 0,20 pour les parcelles ayant reçu *K* sur la terrasse

et

- de 0,18 pour les parcelles sans *K*,
- et de 0,26 à 0,28 pour les parcelles ayant reçu *K* sur les mauvaises tanety.

L'état actuel des travaux ne permet pas de faire des propositions en ce qui concerne le phosphore et les autres éléments. Nous pouvons seulement affirmer que le phosphore apparaît un élément limitant dans les plantations âgées seulement de trois ou quatre ans.

La teneur en *P* (% de matière sèche) varie de 0,079 à 0,089 indépendamment de l'apport ou non de phosphore et indépendamment des sols (terrasse ou mauvaise tanety).

Mobilisation des éléments : Bilan Fertilisation — Exportations — Réserves.

Le calcul de la minéralomasse *P* et *K* d'un arbre de 10 ans non fertilisé a été fait à partir de l'estimation des compartiments de la biomasse (racines, écorces, bois, branches, aiguilles, cônes) et de la litière (ou nécromasse) et des teneurs en *P* et *K* de ces compartiments.

Pour établir la comparaison avec des arbres fertilisés *P*, *K* ou *PK*, faute de temps et de moyens analytiques suffisants, nous avons dû faire de nombreuses approximations en considérant notamment que :

- les arbres fertilisés avaient la même composition que les arbres non fertilisés ;
- les parties végétales mortes avaient la même composition minérale (en *P* et *K*) que les parties végétales vivantes ;
- la biomasse et la nécromasse étaient proportionnelles à la surface terrière.

Le tableau ci-après récapitule ces résultats qui ne sont que des estimations et des ordres de grandeur qui conduisent cependant à quelques conclusions importantes :

Traitement		<i>O</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>PK</i>
Surface terrière (m ²)		17,5	22,5	33,5	35,5
Elément <i>P</i>	Biomasse	12,1 kg	15,6 kg	23,2 kg	24,6 kg
	Nécromasse	8,9 kg	11,4 kg	17,0 kg	18,0 kg
	Immobilisation totale	21,0 kg	27,0 kg	40,2 kg	42,6 kg
	Fertilisation apportée	—	33,0 kg	—	33,0 kg
	Volume sol exploré/ha	2.300 m ³	7.000 m ³	7.000 m ³	7.000 m ³
	Estimation réserve sol <i>P-Fe</i>	45/35 ppm	45/35 ppm	45/35 ppm	45/35 ppm
	Réserve totale <i>P-Fe</i> /ha	141 kg	388 kg	388 kg	388 kg
Elément <i>K</i>	Biomasse	35,3 kg	45,5 kg	67,6 kg	71,7 kg
	Nécromasse	21,7 kg	27,8 kg	41,4 kg	43,9 kg
	Immobilisation totale	57,0 kg	73,2 kg	109,0 kg	115,6 kg
	Fertilisation apportée	—	—	40,0 kg	40,0 kg
	Estimation réserve sol <i>K</i> échangeable <i>K</i> total nitrique	11 ppm 31/24 ppm	11 ppm 31/24 ppm	11 ppm 31/24 ppm	11 ppm 31/24 ppm
	Réserve totale <i>K</i> échangeable à l'ha	36 kg	110 kg	110 kg	110 kg
	<i>K</i> total nitrique à l'ha	100 kg	265 kg	265 kg	265 kg

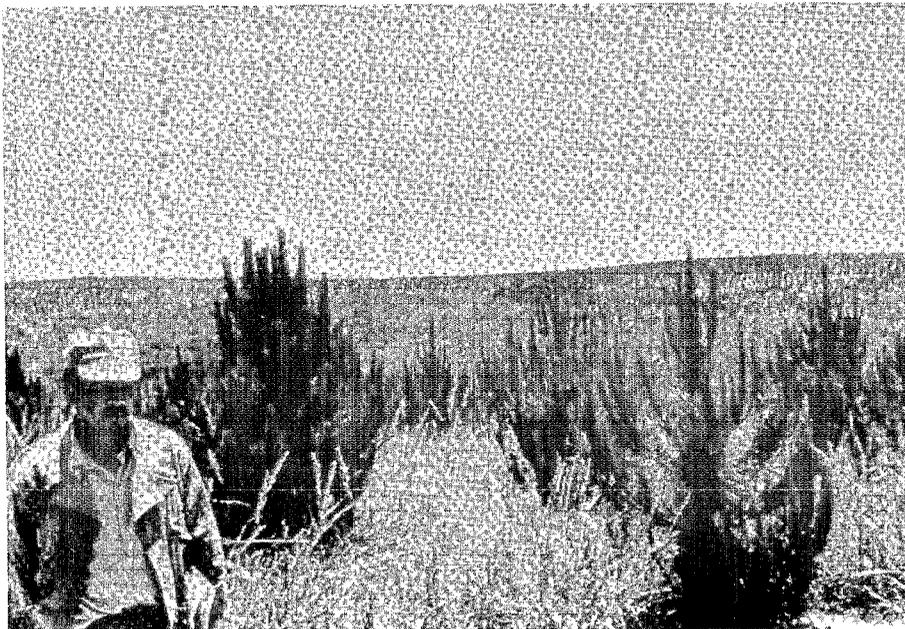
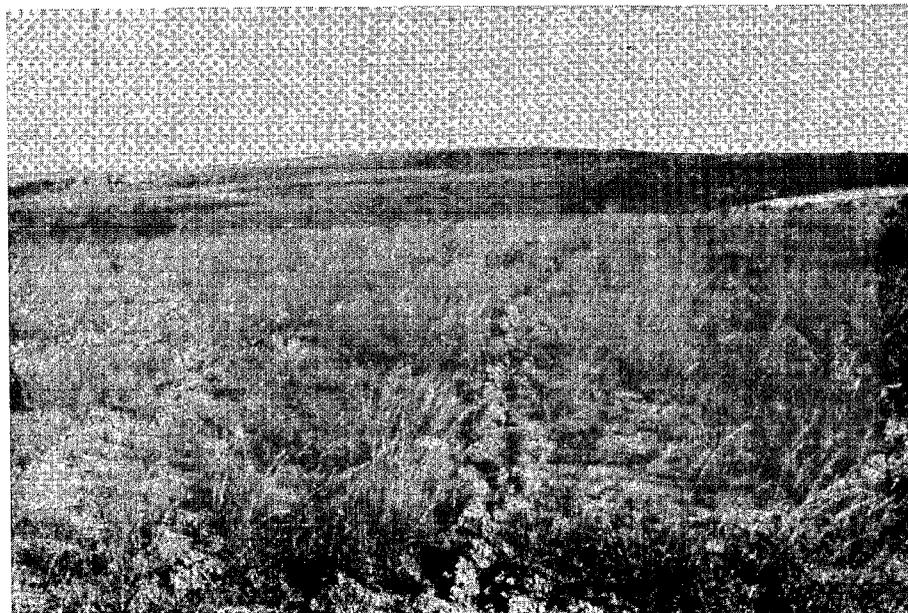


Photo Malvos

*Plantation
de Pinus kesiya.*



*Plantation de P. kesiya sur
sous-volage, plantation de
quelques mois.*

Photo Malvos

— **Bilan du phosphore :** La consommation totale du témoin comme des traitements avec engrais est inférieure à l'estimation des réserves totales du sol (en P assimilable $P-Fe$). Le traitement P n'a pas utilisé tout l'engrais qui a été apporté. Le traitement PK a absorbé plus, mais si l'on se réfère aux témoins O ou K , on peut penser que tout n'a pas été consommé.

— **Bilan de la potasse :** L'immobilisation (consommation par la plante) est 2,5 fois plus forte que celle de

P et on voit que tout ce qui a été apporté a été consommé et au-delà. Il est, d'autre part, surprenant de voir que K continue à marquer alors que l'apport a été entièrement consommé.

Résultats lysimétriques.

Les travaux réalisés par l'I.R.A.T. (M. ARRIVETS en particulier sur les sols de tanety des Hauts Plateaux) ont montré que :

Plantation en courbes de niveau.

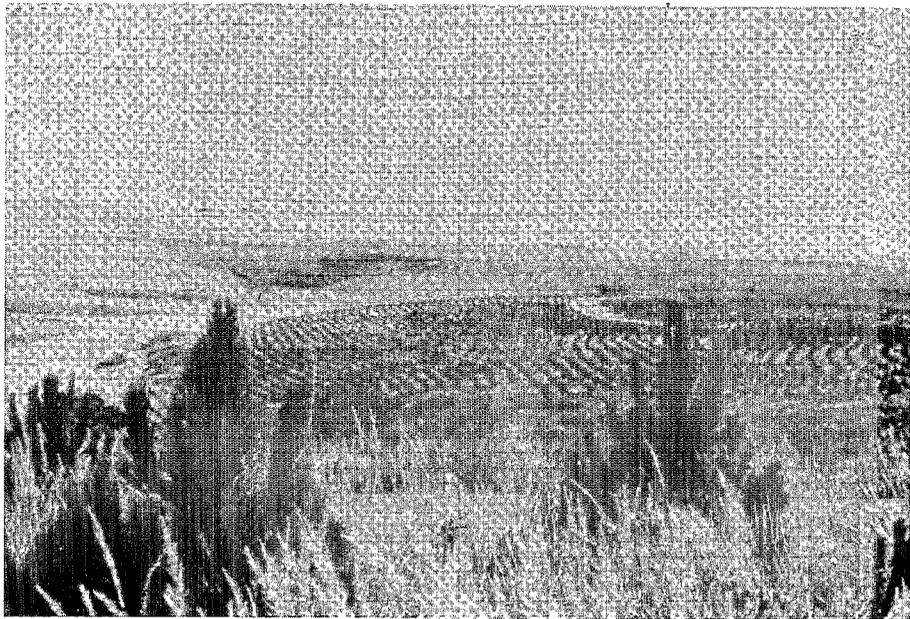
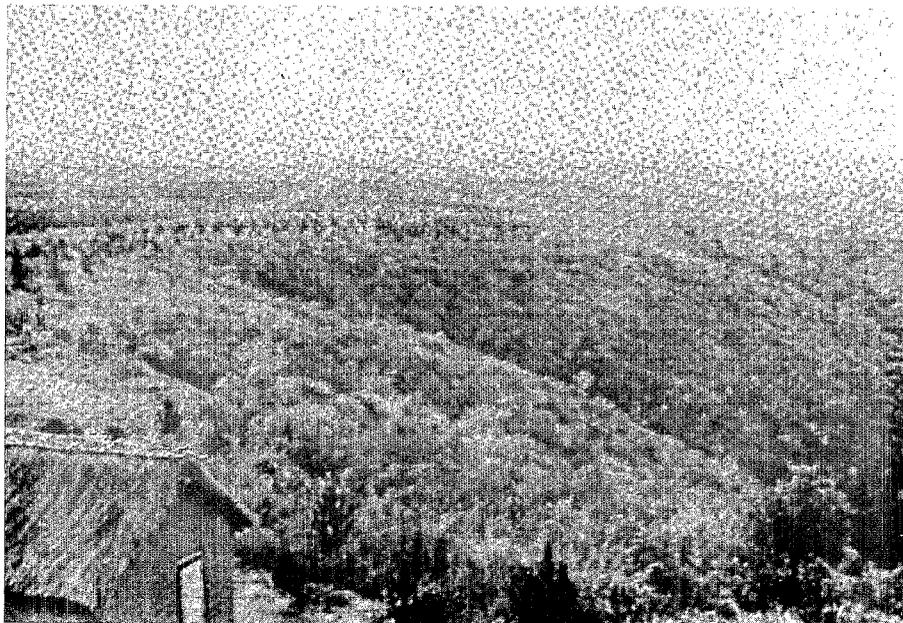


Photo Malvos.



Plantation des sommets.

Photo Malvos.

— il n'y a jamais perte de phosphore par lixiviation ; tout ce qui est apporté est consommé ou fixé.

Par contre, pour le potassium, il peut y avoir une légère perte, mais nous avons vu que tout ce qui a été apporté a été consommé par les Pins. En fait, puisque K peut être lessivé, on peut donc penser qu'une partie s'est perdue par drainage. Les Pins ont donc utilisé plus que le K échangeable et ont donc puisé dans les réserves de K .

Conclusions

Ces quelques tentatives d'explications sur le mécanisme des effets de la fertilisation permettent de dégager les conclusions suivantes :

— L'effet de la fertilisation est au moins aussi fort sur le système racinaire que sur la partie aérienne.

— Si l'augmentation de croissance due à la fertilisation n'a consommé qu'une partie du phosphore apporté

par cette fertilisation, la potasse des engrais a été entièrement consommée et même au-delà.

— Le maintien de l'effet de la fertilisation pendant les dix premières années au moins, tient davantage à l'effet sur le système racinaire qu'à la quantité d'éléments apportés.

La fertilisation agit donc de deux manières successives :

— d'abord en facilitant le développement du système racinaire par une meilleure nutrition ;

— ensuite, en permettant, grâce à des racines puissamment développées, un meilleur prélèvement d'éléments minéraux.

Les analyses foliaires montrent que, malgré cela, la nutrition reste difficile. Il est d'ailleurs paradoxal de constater qu'on ne trouve plus de différences dans la composition foliaire en *P* entre le témoin et les traitements fertilisés, alors que tout le phosphore apporté n'a pas encore été consommé. On est donc amené à penser à une rétrogradation dans ces sols riches en alumine libre.

Il est également paradoxal de constater l'inverse pour la potassium dont tout l'apport a été consommé. Dans ce cas, l'augmentation de la prospection racinaire a vraiment permis d'amplifier l'effet de la fertilisation. Ce développement racinaire a même joué plus que proportionnellement au développement de la partie aérienne, puisque la concentration foliaire a augmenté. Les réserves en *K* échangeable ont été estimées à 36 kg pour le témoin sans engrais et à 100 kg pour les traitements fertilisés. Or, la consommation du témoin est de 57 kg. Il faut penser que la plante a prélevé sur une partie des réserves en *K*. Les réserves pour *K* total nitrrique seraient voisines de 100 kg à l'hectare pour le témoin et de 265 kg pour les traitements fertilisés. Il faut donc penser que les Pins prélèvent le potassium qui leur est nécessaire, non seulement sous forme de *K* échangeable, mais aussi à partir de formes moins facilement extractibles. La consommation réelle et la croissance encore active après plusieurs années confirment donc que le potassium extractible à l'acide nitrique constitue une réserve susceptible d'être utilisée et de passer dans le compartiment échangeable.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Une étude du comportement stationnel de *Pinus kesiya* à la fertilisation phosphatée et potassique a été menée sur le Périmètre de Reboisement Industriel du Haut Mangoro, zone représentative du premier gradin de la falaise orientale de Madagascar. Le réseau d'expérimentations a été suivi systématiquement pendant plus de 10 ans et a permis de différencier des réponses suivant les caractéristiques pédologiques, physiques et physicochimiques de quatre types de stations représentatives du périmètre.

Les quatre types de stations sont classés par leur niveau de fertilité et leur réponse à la fertilisation phosphopotassique.

— Sol ferrallitique, jaune, remanié, formé sur *alluvions fluvialacustres anciennes*. C'est ce que nous avons appelé « bonne tanety » car la croissance des Pins sur ces collines est bonne. La topographie est régulière : plateaux de faible pente.

— Sol ferrallitique, induré, typique, formé également sur *alluvions fluvialacustres anciennes*. La croissance des Pins est moyenne sur ces « moyennes tanety » de faible pente.

— Sol ferrallitique, jaune, remanié, typique, formé sur *migmatites*. La croissance des Pins est mauvaise sur ces « mauvaises tanety », généralement de forte pente.

— Sol ferrallitique *hydromorphe, lessivé, formé sur alluvions fluviales relativement récentes*. La croissance des Pins est généralement bonne sur ces « terrasses sableuses ».

L'ensemble des recherches présentées ici a connu plusieurs étapes :

— Les essais de fertilisation ont permis de mettre en évidence des niveaux de fertilité très nettement différenciés.

En l'absence de fertilisation, à 4 ans 1/2, par exemple, les hauteurs moyennes sont de :

— 4,30 m pour les bonnes tanety ;

— 3,60 m pour les terrasses ;

— 2,60 m pour les moyennes tanety ;

— 1,85 m pour les mauvaises tanety, mais la hauteur des jeunes Pins sur cette station remonte à 2,80 m, chiffre sensiblement égal à celui observé sur les moyennes tanety par la seule correction de la carence en zinc.

L'application d'une fertilisation phosphopotassique a un effet variable puisque, à 4 ans 1/2, les hauteurs obtenues dans les parcelles fertilisées sont de :

— 5,80 m pour les terrasses ;

— 5,60 m pour les bonnes tanety ;

— 5,20 m pour les moyennes tanety ;

— 4,00 m pour les mauvaises tanety, lorsque la carence en zinc a été également corrigée ;

ce qui représente un gain de :

— 1,20 m pour les mauvaises tanety ;

— 1,30 m pour les bonnes tanety ;

— 2,20 m pour les terrasses ;

— 2,60 m pour les moyennes tanety.

— Secondairement, le programme d'études expéri-

mentales a permis de préciser les modalités pratiques d'application des engrais :

a) La forme des engrais phosphatés et potassiques n'a que peu d'incidence sur l'effet des éléments apportés. Il est en particulier très intéressant de constater que le chlorure de potassium n'exerce, du fait de la présence de l'ion Cl^- , aucun effet dépressif par rapport au sulfate, plus coûteux.

b) Des apports de 150 g d'engrais composés 20-20 ou 21-16 effectués à la plantation donnent de bons résultats pratiques : gain de 30 à 100 % sur les hauteurs à 4 ans 1/2 et de 100 à 200 % sur le volume à 10 ans.

Ils correspondent à un apport suffisant de P_2O_5 (30 g) qu'il ne semble pas y avoir intérêt à augmenter à la plantation ; il est probablement préférable de renouveler l'apport quelques années après pour éviter une rétrogradation du phosphore. Par contre, ces doses pratiques n'apportent peut-être pas tout à fait la quantité optimale de potassium, car une quantité plus élevée de potassium (48 g) entraîne un gain léger de hauteur à 5 ans 1/2 par rapport à la dose de 24 g (apportée par 150 g d'engrais 21-16 par exemple).

c) La localisation directe de l'engrais dans le trou de plantation ne comporte aucun risque si l'on plante en pleine période pluvieuse et assure une réaction des plants plus rapide que ne le font d'autres méthodes d'apport. C'est là une différence à souligner, avec les précautions d'emploi à observer en zone tempérée, et qui tient au fait que les pluies tombent en période de végétation. Cependant, les mortalités observées en pays tempérés à la suite du mélange d'engrais solubles dans les trous de plantation apparaissent aussi au Mangoro, si l'on est amené à planter à une période faiblement pluvieuse (« petite saison des pluies »). Il vaut mieux alors renoncer à l'apport d'engrais et pratiquer, l'année suivante, une fertilisation de rattrapage appliquée en surface. Plusieurs essais montrent l'efficacité de cet apport après plantation.

Les effets respectifs de P et K différenciant les quatre grands types de station.

La comparaison des effets des différents éléments permet de caractériser comme suit les quatre stations :

— Les bonnes tanety sont faiblement carencées en P et assez fertiles en K. L'effet du phosphore n'est important qu'en première année, mais à 4 ans 1/2, il n'excède pas 25 %. Le gain dû au potassium n'est que de 10 %.

— Sur les sols ferrallitiques indurés des moyennes tanety, l'effet du phosphore est légèrement plus fort (35 % à 4 ans 1/2), mais celui du potassium est spectaculaire (75 % à 4 ans 1/2), témoignant d'une très grande pauvreté du sol en cet élément.

— Sur les mauvaises tanety (sols ferrallitiques sur migmatites), lorsqu'on a corrigé la carence en zinc, on n'a qu'un effet assez faible du phosphore sur les jeunes plantations (20 % à 4 ans 1/2). Il est plus fort sur les plantations âgées de quelques années. L'action du potassium, un peu plus importante que sur les bonnes

tanety, est beaucoup plus faible que sur les sols ferrallitiques indurés (moyennes tanety).

— Sur les terrasses sableuses, on constate un faible effet du phosphore (15 %), mais le potassium agit presque aussi fortement que sur les moyennes tanety.

Pour ces divers essais, il convient de souligner la persistance, au moins jusqu'à la dixième année, de l'effet très visible du potassium, considéré pourtant comme un élément très mobile, surtout dans ces conditions de drainage climatique important.

Ces résultats et les analyses physico-chimiques classiques permettent de caractériser les quatre stations du Haut-Mangoro quant à leur fertilité vis-à-vis du *Pinus kesiya*.

Les sols ferrallitiques remaniés des bonnes tanety, grâce à leur horizon A_1 épais et à une teneur relativement bonne en P_2O_5 , K, Ca et Mg se montrent d'une bonne productivité, augmentée au maximum de 20 % par une fertilisation phosphopotassique.

Les sols ferrallitiques indurés des moyennes tanety s'en distinguent par une fertilité plus médiocre en P_2O_5 et en bases échangeables, mais surtout par une très grande pauvreté en potassium.

Les sols ferrallitiques sur migmatites ne paraissent pas considérablement plus pauvres en P_2O_5 et K_2O que les bonnes tanety. La moindre épaisseur de l'horizon A_1 , la forte teneur en argile de l'horizon profond et le manque de calcium et de magnésium échangeables paraissent, *a priori*, responsables de la faible croissance des plantations. Mais les essais de fertilisation ont montré qu'en réalité une forte carence en zinc en était la cause essentielle.

Les sols ferrallitiques hydromorphes sur alluvions des terrasses, de fertilité phosphorique comparable à celle des bonnes tanety, s'en distinguent par un horizon A_1 plus mince, une texture très sableuse, une grande pauvreté en calcium et en magnésium échangeables et une déficience en potassium échangeable aussi accusée que celle des moyennes tanety.

Sur un fond de carence généralisée en acide phosphorique, se distinguent donc deux stations originales par leur forte carence en potassium (moyenne tanety au sol ferrallitique induré et terrasse), une station à fertilité moyenne en potassium mais carencée en zinc (mauvaise tanety sur migmatites), et une station assez favorable à tous points de vue (bonne tanety).

Recherche de critères analytiques rendant compte des particularités de chaque type de station.

Bien que la reconnaissance globale de chaque type de station permette d'avoir une idée générale des problèmes de fertilité, il est cependant possible que celle-ci varie à l'intérieur d'un même type ; aussi serait-il souhaitable de pouvoir ajuster la fertilisation, dans chaque cas particulier, à partir de critères analytiques fiables.

Les essais en vase de végétation ne fournissent pas de renseignements valables pour la fertilité en phosphore, mais rendent bien compte des besoins en potassium. Plus longs et plus complexes, ils n'apportent cependant

pas de meilleures données que les analyses de laboratoire.

En ce qui concerne le phosphore, aucun procédé ne semble totalement valable. On peut toutefois retenir quatre méthodes dont les résultats sont assez bien en rapport avec les réponses au phosphore obtenues dans les essais de terrain :

— **Phosphore total** : la teneur minimale au-dessus de laquelle on pourrait se passer de fertilisation serait de 700 ppm.

— **Phosphore Truog** : avec un seuil critique de 30 ppm.

— **Phosphore soluble dans l'eau** : la fertilisation serait indispensable si le sol en contient moins de 0,1 ppm.

— **Phosphore organique** : pour lequel le seuil d'efficacité de la fertilisation serait de 50 ppm.

Pour les plantations existantes, le diagnostic foliaire pourrait sans doute fournir aussi des indications valables, mais la teneur optimale, qui semble se situer vers 0,09 ou 0,10 % de *P*, devrait être précisée.

En ce qui concerne le potassium, la forme échangeable rend bien compte de la fertilité de chaque station avant plantation. Sur les stations peu carencées, la teneur des horizons de surface est de l'ordre de 0,10 m.e. pour 100 g et celle des horizons profonds de 0,05 m.e. La fertilisation doit certainement intervenir dès que le sol contient moins de 0,15 m.e. en surface et 0,10 m.e. en profondeur.

Mais, après quelques années de culture de Pins, la consommation des arbres a uniformisé le potassium échangeable à une valeur très basse qui ne rend alors plus compte, ni des différences de fertilité entre sols, ni de la quantité de potassium réellement consommée. Le potassium, extrait à l'acide nitrique, se révèle alors comme un moyen de diagnostic bien meilleur, le seuil critique de fertilisation se situant approximativement à 100 ppm.

Les analyses foliaires pratiquées ont permis de situer la teneur optimale des aiguilles entre 0,25 et 0,30 % et le seuil de carence à 0,18 % de *K*.

En ce qui concerne le zinc, il est actuellement impossible d'avancer un diagnostic à partir des analyses de sol, mais le seuil de carence foliaire peut être situé à 7 ppm.

Essai d'interprétation : Mécanismes d'action et bilan d'utilisation des apports minéraux.

Des examens détaillés des racines des jeunes Pins et une estimation des quantités d'éléments immobilisés dans la biomasse ont permis de comprendre la manière dont la fertilisation a agi.

L'effet de la fertilisation est au moins aussi fort sur le système racinaire que sur la partie aérienne. Les racines des plants fertilisés colonisent une épaisseur de sol bien plus grande que celle des témoins. Ceci permet d'affirmer que la fertilisation agit de deux manières :

— directement au début, en facilitant à la fois le développement du système racinaire et celui de la partie aérienne par une meilleure nutrition ;

— indirectement ensuite, en permettant, grâce à des racines puissamment développées, un meilleur prélèvement d'éléments minéraux.

Ceci explique le maintien de l'effet de la fertilisation pendant 10 ans au moins, et plus particulièrement la persistance de l'action du phosphore, les plants fertilisés ayant beaucoup mieux prospecté les réserves des horizons profonds.

Une estimation des quantités d'éléments consommés à 10 ans montre que les plants fertilisés ont eu une surconsommation de *P*, par rapport aux plants témoins, plus faible que la quantité apportée par l'engrais (20 kg contre 33 kg). En ajoutant les deux phénomènes : meilleure prospection racinaire et persistance vraisemblable d'une petite fraction du phosphore apporté par l'engrais, on n'a donc aucun mal à s'expliquer la persistance de l'effet *P*.

Il n'en est pas de même pour *K* : les plants fertilisés ont consommé, par rapport aux témoins, une quantité supplémentaire de potassium plus forte que celle que leur a apportée la fertilisation (50 à 60 kg contre 40 kg). On s'explique donc plus difficilement la persistance de l'effet *K* qui, au contraire, ne devrait plus se faire sentir.

En effet, deux plants fertilisés en *P*, et donc prospectant le même volume, ont en principe, à leur disposition, la même quantité totale de potassium, échangeable ou nitrique. Or, celui qui a reçu au départ une quantité de *K* très faible par rapport à sa consommation totale continue à avoir, non seulement une meilleure croissance, mais aussi une concentration plus élevée en potassium dans ses aiguilles.

Il faut probablement, pour expliquer tout ceci, faire appel à des phénomènes qui n'ont pas pu être pris en considération dans le cadre de ce travail :

— La fertilisation simultanée en phosphore et en potassium a peut-être engendré une dynamique racinaire plus forte que chez les plants fertilisés uniquement en phosphore et permis une prospection d'horizons encore plus profonds, mieux alimentés en eau et où la diffusion du potassium vers les racines se fait plus facilement.

— Le potassium apporté par l'engrais, bien que totalement épuisé dans le sol, exerce peut-être encore, à l'intérieur de l'arbre, un effet dynamique important par le jeu des transferts internes.

Autant de questions auxquelles devraient essayer de répondre des travaux approfondis sur le cycle du potassium.

Le bilan effectué pour le potassium montre aussi que les plants fertilisés, outre le potassium apporté par l'engrais, ont consommé la quasi-totalité du potassium échangeable et même une part non négligeable (la moitié) du potassium extractible à l'acide nitrique. C'est une preuve que les arbres sont capables de s'alimenter

dans un complexe beaucoup plus vaste que le simple pool des éléments échangeables. Mais c'est aussi l'indice que, malgré le développement du système racinaire, un freinage de la production en cours de révolution, par manque de potassium, est à envisager.

La fertilisation minérale apparaît donc ici comme une technique indispensable, qui, dans les conditions du Mangoro, revêt des aspects originaux par rapport à beaucoup de situations mondiales connues :

- prédominance de l'effet du potassium,
- forte interaction des carences en zinc.

Malgré les succès rencontrés depuis 10 ans dans ce domaine, la très grande pauvreté en potasse et en bases échangeables des sols ferrallitiques du Mangoro doit inciter à la vigilance : le climat favorable permet des productions élevées fortement consommatrices d'éléments biogènes et de nouveaux problèmes peuvent apparaître d'un instant à l'autre.

BIBLIOGRAPHIE

- ANON, 1974. — Memento de l'Agronome, 1.590 p. (Ministère de la Coopération).
- ANON, 1975. — Les recherches en Agronomie à l'IRAT de 1969 à 1974, 90 p. (Agronomie Tropicale n° 2).
- ANON, 1976. — Memento du Forestier, 830 p. (Ministère de la Coopération).
- ASLYNG (H. C.), 1964. — Phosphate potential and phosphate status of soils. *Acta Agric. Scand* 14.
- AUBREVILLE (A.), 1949. — Climats, Forêts et Désertification de l'Afrique Tropicale.
- AZEVEDO (O. V.), 1970. — Reboisement industriel du Haut Mangoro. Prospection des sols, 141 p. (Doc. FAO — Rapport technique n° 7 MAG 8).
- BAILLY (C.), 1964. — Recueil des analyses pratiquées au laboratoire du C.T.F.T. Madagascar, 49 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 24 A).
- BAILLY (C.), de VERGNETTE (J.), BENOIT DE COIGNAC (G.), MALVOS (C.), 1969. — Etude de la reconnaissance du périmètre de reboisement en Pins d'Ampangabe. Reboisement industriel du Haut Mangoro, 120 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 158).
- BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), MALVOS (C.), GACHET (C.), 1970. — Problèmes relatifs à l'installation des peupliers à Madagascar. Reconnaissance des sols. Premières expérimentations, 150 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 185).
- BAILLY (C.), 1972. — Les recherches sur la conservation des sols et la reforestation à Madagascar. 26 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 243).
- BAILLY (C.), BONNEAU (M.), 1974. — Rapport de mission à Madagascar, 36 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 356 A).
- BAULE (H.), FRICKER (C.), 1969. — La fertilisation des arbres forestiers, 256 p. (Ed. BLV).
- BLANCHET (R.), BOSC (M.), 1969. — Réactions d'échanges et principaux facteurs de l'alimentation potassique des plantes, dans deux sols de textures différentes, 18 p. (Ann. Agron. n° 20).
- BONNEAU (M.), 1975. — Quelques idées générales sur la fertilisation en forêt. Conférence faite en 1974 à Madagascar, 13 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 375 A).
- BONNEAU (M.), SOUCHIER (B.), 1979. — Pédologie. Constituants et propriétés du sol, 459 p. (Ed. Masson).
- BOUCHARD (L.), 1969. — Reconnaissance pédologique de la zone de reboisement du Haut Mangoro, 25 p. (Doc. IRAM n° 186).
- BOUCHARD (L.), MALVOS (C.), 1970. — Rapport de tournée sur la reconnaissance des terrasses à Peupliers du Mangoro, 20 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 177 A).
- BOURGEAT (F.), 1972. — Sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du Quaternaire. 335 p. (Mém. ORSTOM n° 57).
- CHAMINADE (R.), 1960. — Expérimentation en vases de végétation (Ann. Agronomiques).
- CHAMINADE (R.), 1965. — Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols tropicaux. Principes de base et techniques, 4 p. (Agronomie tropicale n° 10).
- CHAMINADE (R.), 1965. — Bilan de trois années d'expérimentations en petits vases de végétation. Mise au point technique. Résultats, 60 p. (Agronomie tropicale n° 11).
- CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL, 1966. — Les plantations de Pins à Madagascar et au Cameroun, 260 p. (Doc. Ministère de la Coopération).
- C.T.F.T., I.R.A.T., O.R.S.T.O.M., I.E.M.V.T., 1978. — Bassins versants à Madagascar. Bilan de l'eau sous prairies naturelles et artificielles. Opération DGRST, 60 p. (Rapport de fin d'étude).
- DABIN, 1967. — Méthode Olsen modifiée. Cahiers ORSTOM.
- DALAL (R. C.), 1974. — Desorption of soil phosphate by anion. Exchange resin. *Comm. Soil Science Pl Anal* 5.
- DALAL (R. C.), HALLSWORTH (E. G.), 1976. — Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors unpredicted yields response and phosphorus uptake. *Soil Science Soc. Ann. J.*, vol. 40.
- DEMOLON (A.), 1960. — Dynamique du sol, 520 p. (Ed. Dunod).
- DIEHL (R.), 1957. — Les bases scientifiques de la production végétale, 264 p. (Ed. Baillière).
- DIEHL (R.), 1959. — Les techniques de la production végétale, 218 p. (Ed. Baillière).
- Divers auteurs, 1967. — Colloque sur la fertilité des sols tropicaux à Tananarive, 19-25 novembre 1967. 2.233 p. (Doc. IRAT).
- DUCHAUFOUR (P.), 1965. — Précis de pédologie (Ed. Masson).
- GACHON (L.), 1966. — Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C.R. Acad. Agric.*
- GACHON (L.), 1968. — Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols. AFES 4.
- HENIN (H.), 1960. — Le profil cultural. Principes de physique du sol (Ed. SEIA).
- HERVIEU (J.), 1967. — Géographie des sols malgaches. Cahiers ORSTOM Pédologie n° 1.
- HOLFORD (I. C. R.), MATTINGLY (G. E. G.), 1976. — A model for the behaviour of labile phosphate in soil. *Plant and Soil* 44.
- KILLIAN (J.), VELLY (J.), 1964. — Diagnostic des carences minérales en vases de végétation sur quelques sols de Madagascar. 36 p. (Agronomie tropicale n° 5).
- LECOMPT (M.), 1965. — L'expérimentation et les engrais. 91 p. (Ed. SPIEA).

- MALVOS (C.), BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), RAMANANTSOAVINA (G.), RAKOTOMANAMPISON (A.), 1973. — La fertilisation des plantations de Pins à Madagascar. Expérimentations et mise en œuvre. 236 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 290).
- MALVOS (C.), 1978. — Note sur les essais du Mangoro. 52 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 428).
- MALVOS (C.), BAILLY (C.), 1979. — Contribution à l'étude des problèmes de fertilisation en milieu tropical et subtropical. Les expériences sur la fertilisation des plantations de Pins à Madagascar. 46 p. (Doc. CTFT/Nogent-sur-Marne).
- MALVOS (C.), BAILLY (C.), 1980. — Expérimentation réalisées à Madagascar sur la fertilisation des boisements de Pins après plantation. 108 p. (Cahier Scientifique n° 5 de Bois et Forêts des Tropiques).
- MALVOS (C.), VERBEQUE (D.), RAKOTOMANANA (J. L.), 1980. — Essai de synthèse des expérimentations en vases de végétation réalisées par le C.T.F.T. à Madagascar de mai 1969 à janvier 1975. 80 p. (Doc. CTFT/DRFP).
- MAUGE (J. P.), BAILLY (C.), 1975. — Rapport de mission à Madagascar. 31 p. (Doc. CTFT/DRFP n° 394 A).
- NGO CHAN BANG, 1964. — Diagnostic des carences des sols par la méthode des vases de végétation. 50 p. (Doc. IRAM).
- PICHOT (J.), ROCHE (P.), 1972. — Phosphore dans les sols tropicaux. *Agro. Trop.* 27.9.
- RAMPANA (L.), 1979. — Etude de la nutrition minérale du Pinus kesiya par la méthode du diagnostic foliaire. 50 p. (Mémoire de DEA EESS Tananarive).
- RATSIMALA RAMONTA (I.), 1979. — Etude de l'enracinement du Pinus kesiya en fonction du travail du sol (essai n° 2 du Mangoro). 42 p. (Mémoire de DEA EESS Tananarive).
- ROCHE (P.), VELLY (J.), 1965. — Les méthodes utilisées pour reconstituer la fertilité des sols tropicaux. Etudes des carences. Essais au champ. Courbes de réponse. Résultats obtenus à Madagascar. 6 p. (Agronomie tropicale n° 10).
- ROCHE (P.), GRIERE (L.), BABRE (D.), CALBA (H.), FALLAVIER (P.), 1978. — La carence en phosphore des sols intertropicaux et ses méthodes d'appréciation. Premières conclusions et premiers résultats. 25 p. (IMPHOS Edmonton, juin 1978).
- ROEDERER (P.), 1971. — Les sols de Madagascar. 56 p. (Doc. ORSTOM n° 5).
- SAUNDER (D. H.), 1956. — Determination of available phosphorus in tropical soils by extraction with sodium hydroxyde. *Soil Science* 82-6.
- VELLY (J.), NGO CHAN BANG, LATRILLE (E.), KILLIAN (J.), 1964. — Essais de diagnostic de carences minérales en vases de végétation sur quelques sols de Madagascar. 110 p. (Doc. IRAM n° 51).
- VELLY (J.), CELTON (J.), ROCHE (P.), 1967. — Comparaison des résultats obtenus par la technique des diagnostics de carences du sol en vases de végétation et des résultats obtenus par les essais au champ. Cas du phosphore. 30 p. (Doc. IRAM n° 105).
- VELLY (J.), 1972. — Fertilisation potassique des sols tropicaux. Communication au Séminaire d'Ibadan, 22 au 26 mai 1972. 22 p. (Doc. IRAM).
- DE VERGNETTE (J.), BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), MALVOS (C.), 1969. — Fertilisation minérale des plantations de Pinus patula sur les Hauts Plateaux malgaches. 15 p. (Bois et Forêts des Tropiques, n° 125).
- TOUZET (G.), 1973. — Analyse foliaire de l'Epicéa et diagnostic des carences. 8 (Symposium international sur la fertilisation forestière, Paris, 3 au 7 décembre).
- ZEBROWSKI (C.), 1967. — Moramanga. Note explicative de la carte pédologique au 1/50 000°. 141 p. (Doc. ORSTOM Tananarive).