

# Pour une production durable des plantations d'eucalyptus au Congo : la fertilisation

Jean-Pierre BOUILLET<sup>1</sup>  
 Rosalie SAFOU-MATONDO<sup>2</sup>  
 Jean-Paul LACLAU<sup>1</sup>  
 Jean de Dieu NZILA<sup>2</sup>  
 Jacques RANGER<sup>3</sup>  
 Philippe DELEPORTE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Cirad-forêt  
 TA 10/C  
 Campus international de Baillarguet  
 34398 Montpellier Cedex 5  
 France

<sup>2</sup> UR2PI  
 BP 1291  
 Pointe-Noire  
 République du Congo

<sup>3</sup> Inra  
 Laboratoire des cycles  
 biogéochimiques  
 54280 Champenoux  
 France

<sup>4</sup> Cirad-forêt/UR2PI  
 BP 1291  
 Pointe-Noire  
 République du Congo

## Dans des plantations clonales d'eucalyptus,

mises en place depuis 1978 sur les savanes côtières autour de Pointe-Noire, des études permettent de définir les fertilisations nécessaires (N, P, K) et de suivre leur évolution au cours des rotations successives. Il en ressort que la durabilité des plantations est principalement liée aux entrées d'azote dans l'écosystème.



Parcelle de taillis d'hybrides naturels d'eucalyptus E.PF<sub>1</sub>.  
 Coppice parcel with *E.PF<sub>1</sub> natural eucalyptus hybrids*.  
 Photo R. Safou-Matondo.

Jean-Pierre BOUILLET,  
Rosalie SAFOU-MATONDO,  
Jean-Paul LACLAU, Jean de Dieu NZILA,  
Jacques RANGER, Philippe DELEPORTE

## RÉSUMÉ

### POUR UNE PRODUCTION DURABLE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS AU CONGO : LA FERTILISATION

Depuis 1978, 42 000 ha de plantations clonales d'eucalyptus ont été mis en place sur les savanes côtières autour de Pointe-Noire. Des études ont été menées depuis 20 ans pour définir les fertilisations à apporter en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) et leur évolution au cours des rotations successives. Les doses à apporter à l'hectare sont de 16 kg N, 7 kg P et 20 kg K à la plantation, puis de 20 kg N, 9 kg P et 25 kg K après deux ans. Durant la première rotation de taillis, les quantités à appliquer après un an et demi sont de 40 kg N, 18 kg P et 50 kg K à l'hectare. En deuxième rotation de taillis, cette fertilisation doit augmenter d'un tiers. Sur replantation, après trois rotations de peuplement, la fertilisation NPK à apporter en starter est deux fois plus élevée que pour la futaie sur savane. L'augmentation de la fertilisation NPK au cours des rotations successives est principalement due à l'accroissement des besoins en fertilisation N des peuplements et est cohérente avec le fort déséquilibre azoté du bilan minéral ( $\approx 500 \text{ kg N ha}^{-1}$  après trois rotations). Ce dernier est surtout lié à l'exportation des éléments contenus dans les troncs et le bois de feu et au lessivage de l'azote durant la décomposition des rémanents. Le déséquilibre azoté représente 30 % du N potentiellement minéralisable dans les 50 premiers centimètres du sol. La durabilité des plantations dépend donc étroitement des entrées de N dans l'écosystème.

**Mots-clés :** fertilisation, azote du sol, propriétés du sol, *Eucalyptus*.

## ABSTRACT

### FERTILISATION: A CRUCIAL FACTOR FOR THE SUSTAINABILITY OF EUCALYPTUS PLANTATIONS IN THE CONGO

Since 1978, 42 000 ha of clonal eucalyptus plantations have been established in the coastal savannah lands around Pointe-Noire. Studies over the last 20 years have been seeking to define nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertiliser requirements and their variation over successive rotations. Starter doses per hectare were established as 16 kg N, 7 kg P and 20 kg K, then 20 kg N, 9 kg P and 25 kg K two years later. During the first coppice rotation, per hectare amounts after one and a half years were 40 kg N, 18 kg P and 50 kg K. These doses had to be increased by one third during the second coppice rotation. On replanting after three stand rotations, NPK starter doses were twice as high as for stands planted on savannah. The increase in NPK fertiliser requirements in successive rotations is mainly due to the increased need for N fertilisation in stands. This is consistent with the high nitrogen unbalance in the mineral budget ( $\approx 500 \text{ kg N ha}^{-1}$  after three rotations). This is mainly due to the removal of elements contained in trunks and firewood and to N leaching from decomposing slashes. The unbalance accounts for 30 % of potential N mineralisation in the first 50 cm of topsoil. The sustainability of these plantations is therefore closely dependent on N inputs into the ecosystem.

**Keywords:** fertilisation, soil nitrogen, soil properties, *Eucalyptus*.

## RESUMEN

### PARA UNA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE LAS PLANTACIONES DE EUCALIPTO EN EL CONGO: LA FERTILIZACIÓN

Desde 1978, se han establecido 42 000 ha de plantaciones clonales de eucalipto en las sabanas costeras alrededor de Pointe-Noire. Desde hace 20 años, se están realizando estudios para concretar las fertilizaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (P) que hay que aportar y su evolución durante las sucesivas rotaciones. Las dosis de fertilizante por ha son de 16 kg N, 7 kg P y 20 kg K en el momento de la plantación, y de 20 kg N, 9 kg P y 25 kg K tras dos años. Durante la primera rotación de monte bajo, las cantidades que hay que aplicar tras un año y medio son de 40 kg N, 18 kg P y 50 kg K por hectárea. En la segunda rotación de monte bajo, debe aumentarse un tercio esta fertilización. En replantación, luego de tres rotaciones de rodal, el abonado NPK de arranque es dos veces superior al del monte alto de sabana. El aumento de la fertilización NPK durante las sucesivas rotaciones se debe principalmente al incremento de las necesidades de fertilización N de los rodales. Esto es coherente con el fuerte desequilibrio de nitrógeno del balance mineral ( $\approx 500 \text{ kg N ha}^{-1}$  luego de tres rotaciones). Este último está fundamentalmente vinculado a la exportación de los elementos contenidos en los troncos y leña y a la lixiviación del N durante la descomposición de restos de corta. Desequilibrio de nitrógeno representa un 30% del N potencialmente mineralizable en los 50 primeros centímetros del suelo. Así pues, la sostenibilidad de las plantaciones depende estrechamente de las entradas de N en el ecosistema.

**Palabras clave:** fertilización, nitrógeno del suelo, propiedades del suelo, *Eucalyptus*.

## Introduction

Depuis 1978, 42 000 ha de plantations clonales d'eucalyptus destinées à la production de bois de pâte à papier ont été mis en place dans les savanes côtières de la région de Pointe-Noire (encadré 1), au Congo. Ces plantations ont été gérées successivement par l'Uaic (Unité d'afforestation industrielle du Congo), jusqu'en 1996, et par Eco Sa (Eucalyptus du Congo, société anonyme). Les deux hybrides naturels (*Eucalyptus PF<sub>1</sub>*; *E. tereticornis* x *E. grandis*) plantés à l'origine sont remplacés, de plus en plus, par l'hybride artificiel *E. urophylla* x *E. grandis*, plus productif (SAFOU-MATONDO *et al.*, 2001). Actuellement, le massif se compose de 8 000 ha de futaie en première rotation, 18 000 ha de taillis en première ou deuxième rotation et de 16 000 ha de futaie replantés après l'exploitation d'une futaie ou d'une première rotation de taillis.

Les sols sableux et acides sur lesquels ont été installées les plantations ont de très faibles réserves en éléments nutritifs (tableau I). Comme les rotations sont courtes (7 ans) et les clones hautement productifs (en volume total sur écorce, jusqu'à 40 m<sup>3</sup> par hectare et par an en tests clonaux et 20 m<sup>3</sup> en moyenne sur le massif; SAFOU-MATONDO *et al.*, 2001), il est rapidement apparu qu'une production soutenue et durable des plantations devait passer par la mise au point de régimes de fertilisation adaptés (encadré 2).

C'est dans cette logique que, à la fin des années 1970, des essais avaient été mis en place par le Ctft Congo, visant à quantifier l'impact de l'apport du chlorure de potasse (KCl) sur la croissance des arbres. Les sols se caractérisent en effet par de faibles réserves en potassium (K) et des mines de KCl étaient en exploitation à 50 km de Pointe-Noire, d'où un approvisionnement aisé et peu onéreux. Mais l'impact sur la production s'est vite révélé limité quand cette fertilisation était apportée à la plantation (BONNEFOI, 1986) et nul quand elle était effectuée en cours de rota-

### Encadré 1.

## Caractéristiques du site

Les plantations ont été installées dans les plaines côtières autour de Pointe-Noire (4° S, 12° E). Le climat est subéquatorial avec une saison des pluies s'étendant d'octobre à mai et une saison sèche de juin à septembre. Les précipitations sont en moyenne de 1 200 mm par an, avec de fortes variations interannuelles, et la température moyenne annuelle est de 25 °C, avec des variations saisonnières de l'ordre de 5 °C. Le relief se caractérise par une succession de collines et de plateaux, séparés par des vallées, l'altitude variant de 40 à 180 m. La végétation d'origine était une savane dominée par la Poacae *Loudetia arundinacea* avec de rares *Anonna arenaria*, arbustes de quelques mètres de hauteur. Les sols se sont développés à partir de dépôts sédimentaires continentaux du plio-pléistocène provenant de l'érosion du massif du Mayombe (NZILA *et al.*, 2001). Ces sols, très profonds (80 à 300 m), de la classe FAO des *ferralic arenosols*, se caractérisent par une texture sableuse homogène, une acidité moyenne, de faibles concentrations en éléments minéraux et en matière organique et de très basses capacités d'échange cationique (tableau I).

tion (HERMELINE, 1985). D'autres études furent donc menées afin de quantifier l'effet de l'apport des autres éléments minéraux, en particulier l'azote (N) et le phosphore (P) (VIGNERON, DELWAULLE, 1990). À partir de 1997, une approche plus globale a été développée au sein de l'UR2PI (Unité de recherche sur la productivité des plantations industrielles), afin d'optimiser les apports de fertilisants (LACLAU, 2001).

Notre objectif est de présenter les résultats obtenus durant les vingt dernières années concernant la fertilisation NPK des plantations d'eucalyptus au Congo. Ces résultats seront rapprochés des bilans minéraux obtenus dans le cadre de l'étude des cycles biogéochimiques (LACLAU, 2001), afin de proposer des régimes de fertilisation permettant le maintien de la fertilité des sols et une production durable du massif.

Tableau I.

Principales propriétés physico-chimiques des sols de la région de Pointe-Noire.

	Profondeur (cm)					
	0-5	5-50	50-70	70-280	280-600	
Argile (%)	7,9	6,6	9,9	10,6	11,4	
Limon (%)	2,1	2,1	2,2	2,4	2,7	
Sable (%)	90,0	91,3	87,9	87,0	85,9	
pH H <sub>2</sub> O	4,38	4,51	4,95	4,81	4,88	
pH KCl	4,00	4,26	4,46	4,57	4,47	
C total (%)	0,85	0,47	0,23	0,10	0,05	
N total (%)	0,063	0,039	0,025	0,019	0,016	
C/N	13,5	12,1	9,2	5,3	3,1	
Complexe d'échanges* (cmol <sub>c</sub> /kg de sol)	Ca <sup>++</sup>	0,11	0,08	0,08	0,09	0,09
	Mg <sup>++</sup>	0,08	0,03	0,03	0,02	0,03
	K <sup>+</sup>	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02
	Na <sup>+</sup>	0,04	0,01	0,00	0,01	0,01
	S	0,26	0,14	0,12	0,14	0,15
	T = Cec	0,53	0,29	0,31	0,28	0,34
S/T (%)	49,1	48,3	38,7	50,0	44,1	

\* Déterminé par extraction à la cobaltihexamine ;  
détermination Icp des cations.

S : somme des cations échangeables. Cec : capacité d'échange cationique.



## Encadré 2.

## Dispositifs expérimentaux et méthodes

### Essais de fertilisation NPK

L'effet de l'apport combiné des éléments N, P et K à la plantation et en cours de rotation a été testé pour les différentes rotations depuis le boisement sur savane : futaie, première rotation de taillis, deuxième rotation de taillis et futaie replantée après exploitation du taillis (tableau II). Les résultats sont intéressants à comparer si on prend en compte la faible variabilité génétique (clones des mêmes hybrides) et environnementale (propriétés des sols et pratiques sylvicoles : préparation du sol, entretiens et écartements de plantation). Par ailleurs, même si les clones utilisés peuvent varier en fonction des essais, la faible interaction « génotype x environnement » généralement observée sur le massif dans les conditions de plantations industrielles (SAYA *et al.*, 2001) permet le rapprochement des données. Il faut préciser que l'effet clone a été systématiquement confondu avec l'effet bloc (un clone par bloc) et que les traitements étaient séparés entre eux par des lignes de bordure non mesurées (1 à 3 suivant les essais).

### Plantations sur savane

#### ▪ Futaie

La fertilisation à la plantation a fait l'objet d'un essai factoriel  $2^3$  N P K pour tester huit traitements : témoin non fertilisé, N (17 g de N par plant), P (10 g de P par plant), K (21 g de K par plant), ainsi que les fertilisations combinées NP, NK, PK et NPK. Les engrais simples utilisés étaient de l'ammonitrate à 33,5 % de N, du superphosphate à 46 % de  $P_2O_5$  et du sulfate de potasse à 50 % de  $K_2O$ . Un autre essai a comparé quatre doses d'engrais ternaire NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) : témoin non fertilisé, 100 g de NPK par plant, 150 g de NPK par plant et 200 g de NPK par plant.

La fertilisation en cours de rotation a fait l'objet d'un essai factoriel  $2^3$  N P K pour tester huit traitements : témoin non fertilisé, N (50 g de N par arbre), P (23 g de P par arbre), K (44 g de K par arbre), ainsi que les fertilisations combinées NP, NK, PK et NPK. Les engrais simples utilisés étaient les mêmes que pour l'essai factoriel à la plantation. Une fertilisation starter de 100 g par plant d'engrais NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) avait été appliquée initialement.

#### ▪ Taillis

Pour la première rotation de taillis, cinq doses d'engrais NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) ont été comparées : témoin non fertilisé, 133 kg/ha de NPK, 200 kg/ha de NPK, 266 kg/ha de NPK, 400 kg/ha de NPK.

Pour la deuxième rotation de taillis, quatre doses d'engrais NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) ont été comparées : témoin non fertilisé, 200 kg/ha de NPK, 300 kg/ha de NPK, 400 kg/ha de NPK.

### Replantation

Pour la replantation, la fertilisation a été appliquée à la replantation de la futaie et au cours des rotations selon les modalités suivantes.

#### ▪ Fertilisation à la plantation

La fertilisation à la plantation a fait l'objet d'un essai factoriel  $3^3$  N P K pour tester 27 traitements : témoin non fertilisé,  $N_1$  (27 g de N par plant),  $N_2$  (54 g de N par plant),  $P_1$  (10 g de P par plant),  $P_2$  (20 g de P par plant),  $K_1$  (20 g de K par plant),  $K_2$  (40 g de K par plant), et les fertilisations combinées  $N_1P_1$ ,  $N_1P_2$ , ...,  $N_2P_2K_2$ . Les engrais utilisés étaient de l'ammonitrate à 33,5 % de N, du superphosphate à 42 % de  $P_2O_5$  et du sulfate de potasse à 50 % de  $K_2O$ . Un autre essai a comparé cinq doses d'engrais ternaire NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) : témoin non fertilisé, 150 g de NPK par plant, 300 g de NPK par plant, 450 g de NPK par plant, 600 g de NPK par plant.

#### ▪ Fertilisation en cours de rotation

La fertilisation en cours de rotation a fait l'objet d'un essai factoriel  $3^3$  N P K pour tester 27 traitements : témoin non fertilisé,  $N_1$  (25 g de N par arbre),  $N_2$  (50 g de N par arbre),  $P_1$  (10 g de P par arbre),  $P_2$  (20 g de P par arbre),  $K_1$  (21 g de K par arbre),  $K_2$  (42 g de K par arbre) et les fertilisations combinées  $N_1P_1$ ,  $N_1P_2$ , ...,  $N_2P_2K_2$ . Les engrais utilisés étaient de l'ammonitrate à 27 % de N, du supertriphosphate à 45 % de  $P_2O_5$  et du sulfate de potasse à 48 % de  $K_2O$ . Une fertilisation starter de 150 g par plant d'engrais NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) avait été appliquée initialement.

### Bilan entrées-sorties

Les bilans entrées-sorties des éléments minéraux ont été estimés sur trois ans pour une savane originelle et une futaie d'eucalyptus, situées à 500 m l'une de l'autre. Pour la méthodologie employée ainsi que les hypothèses retenues pour l'extrapolation de ces bilans aux rotations suivantes, on se reportera à LACLAU (2001) et BOUILLET *et al.* (2001).

## Nécessité d'une fertilisation NPK

L'analyse des essais montre clairement la nécessité d'apporter une fertilisation aux plantations d'eucalyptus, quel que soit le type de peuplement (futaie sur savane, taillis, replantation).

Quand on plante sur savane, on observe pour la fertilisation starter des effets principaux N et K significativement positifs (tableau III). À l'inverse, le phosphore présente un léger effet dépressif mais non significatif. Bien qu'aucune interaction significative ne soit observée, la plus forte croissance est relevée pour la fertilisation complète NPK. La fertilisation

optimale à apporter par arbre est alors d'environ 200 g de NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K), soit, par hectare, 16 kg de N, 7 kg de P et 20 kg de K (figure 1). En cours de rotation, on note un seul effet principal significatif, celui de N, qui est encore observé 24 mois après l'apport à 2 ans (tableau III). Comme pour la fertilisation starter, et bien que l'interaction N-P-K ne soit pas significative, la meilleure production est obtenue avec l'apport combiné des trois éléments N, P et K.

**Tableau II.**  
Principales caractéristiques des essais de fertilisation.

Essai	Dispositif	Peuplement	Clones <sup>(2)</sup>	Placeau mesuré	Préparation du sol	Entretiens	Densité (tiges/ha)	Localisation engrais	Date d'apport
Factoriel 2 <sup>3</sup> N P K à la plantation	Factoriel en blocs 3 blocs	Futaie sur savane	1-131	6 x 6 plants	Pulvériseur	Pulvériseur	496	Au pied	4 semaines
Doses de NPK à la plantation	Bcr <sup>(1)</sup> 4 blocs	Futaie sur savane	1-45 1-96 2-32 L2-123	5 x 5 plants	Pulvériseur	Pulvériseur	709	Au pied	1 semaine
Factoriel 2 <sup>3</sup> N P K en cours de rotation	Factoriel en blocs 6 blocs	Futaie sur savane	1-26 1-41 1-45 2-32 2-86 L2-130	5 x 5 plants	Pulvériseur	Pulvériseur	709	Au pied	24 mois
Doses de NPK en cours de rotation	Bcr 4 blocs	Taillis Première rotation	<i>E. PF<sub>1</sub></i> multiclonal	6 x 7 plants	–	Pulvériseur	400	En plein	19 mois
Doses de NPK en cours de rotation	Bcr 5 blocs	Taillis Deuxième rotation	1-26 1-41 1-48 L2-73	8 x 8 plants	–	Pulvériseur + chimique	666	En plein	17 mois
Factoriel 3 <sup>3</sup> N P K à la plantation	Factoriel en blocs 4 blocs	Futaie en replantation	1-41 18-50 18-69 18-85	5 x 5 plants	Pulvériseur + chimique	Chimiques	800	Au pied	4 semaines
Doses de NPK à la plantation	Bcr 4 blocs	Futaie en replantation	1-41 18-50 18-65 18-69	5 x 5 plants	Pulvériseur + chimique	Chimique	800	Au pied	1 semaine
Doses de NPK à la plantation	Bcr 5 blocs	Futaie en replantation	1-41 18-50 18-85 18-134 18-219	5 x 5 plants	Pulvériseur + chimique	Chimiques	800	Au pied	2 semaines
Factoriel 3 <sup>3</sup> N P K en cours de rotation	Factoriel en blocs 4 blocs	Futaie en replantation	18-50 18-52	5 x 5 plants	Pulvériseur + chimique	Chimiques	600	En plein	16 mois

<sup>1</sup> Bcr : blocs complets randomisés.

<sup>2</sup> 1 = *E. PF<sub>1</sub>* ; 2 = *E. tereticornis* x *E. grandis* ; 18 = *E. urophylla* x *E. grandis*.

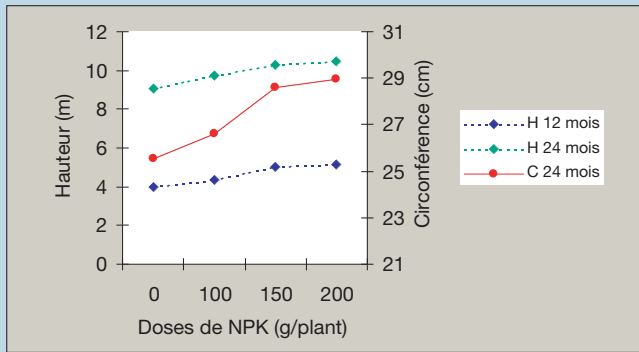


Figure 1.

Réponses en hauteur et circonférence aux doses d'une fertilisation NPK (13 % N, 6 % P, 17 % K) appliquée lors de la plantation d'une futaie sur savane. Résultats à 12 et 24 mois.  
Responses in height and circumference growth to NPK fertiliser doses (13 % N, 6 % P, 17 % K) applied on the initial plantation of a stand on savannah land. Results after 12 and 24 months.

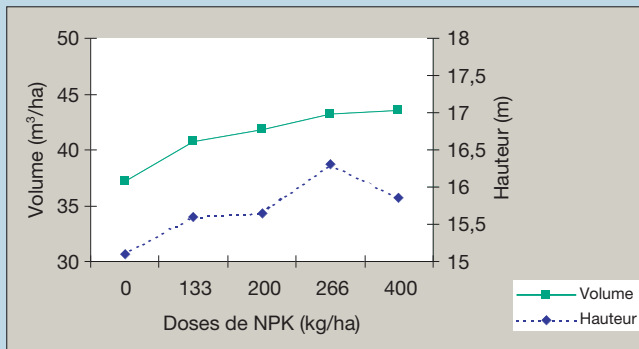


Figure 2.

Réponses en hauteur et volume d'une première rotation de taillis aux doses d'une fertilisation NPK (13 % N, 6 % P, 17 % K). Résultats 12 mois après l'apport de la fertilisation à 19 mois.  
Responses in height and volume during first coppice rotation to NPK fertiliser doses (13 % N, 6 % P, 17 % K). Results 12 months after application at 19 months.

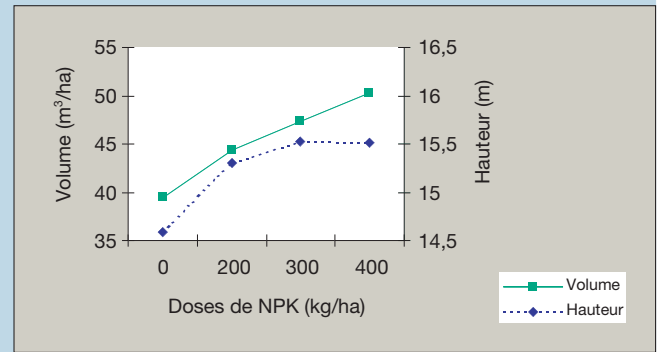


Figure 3.

Réponses en hauteur et volume d'une deuxième rotation de taillis aux doses d'une fertilisation NPK (13 % N, 6 % P, 17 % K). Résultats 24 mois après l'apport de la fertilisation à 17 mois.  
Responses in height and volume in the second coppice rotation to NPK fertiliser doses (13 % N, 6 % P, 17 % K). Results 24 months after application at 17 months.

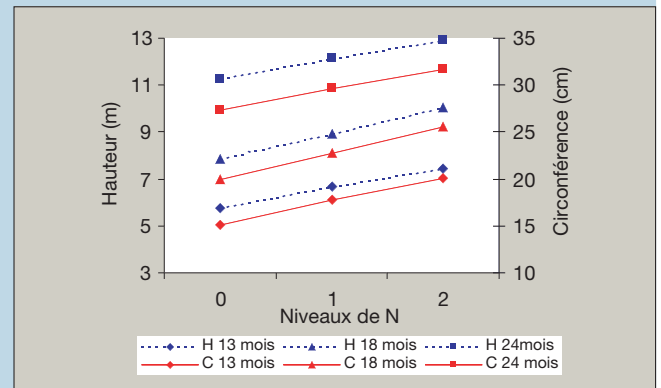


Figure 4.

Effets principaux de la fertilisation azotée en starter sur la hauteur et la circonférence d'une futaie replantée. Essai factoriel  $3^3$  N P K.  
Main effects of nitrogenous starter doses on height and circumference in a replanted stand. Factorial trial  $3^3$  N P K.

Tableau III.

Effets principaux sur les hauteurs ( $\Delta H$ ), circonférence ( $\Delta C_{1,30\text{ m}}$ ) et volume total ( $\Delta V$ ) de N ( $N_{\text{princ}}$ ) P ( $P_{\text{princ}}$ ) et K ( $K_{\text{princ}}$ ) (en valeur absolue et en % de la moyenne des traitements n'ayant pas reçu l'élément). Valeurs des traitements NPK, N et du témoin non fertilisé (T). Futaie sur savane. Essais factoriels  $2^3$  N P K.

	$N_{\text{princ}}$	$P_{\text{princ}}$	$K_{\text{princ}}$		NPK	N	T
Fertilisation starter, valeurs à 21 mois							
$\Delta H$ (m)	+ 0,8 (+ 10 %)*	- 0,4 (- 5 %)	+ 0,8 (+ 10 %)*	H (m)	9,2 <sup>a</sup>	8,5 <sup>ab</sup>	7,5 <sup>b</sup>
$\Delta C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	+ 2,6 (+ 10 %)*	- 0,4 (- 2 %)	+ 1,7 (+ 7 %)*	$C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	28,3 <sup>a</sup>	27,5 <sup>ab</sup>	25,3 <sup>b</sup>
Refertilisation à 24 mois, valeurs 24 mois après l'apport d'engrais							
$\Delta H$ (m)	+ 0,8 (+ 4 %)*	+ 0,2 (+ 1 %)	+ 0,2 (+ 1 %)	H (m)	19,3 <sup>a</sup>	18,9 <sup>a</sup>	17,9 <sup>b</sup>
$\Delta C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	+ 1,4 (+ 4 %)*	+ 0,1 (+ 0,5 %)	+ 0,3 (+ 1 %)	$C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	42,4 <sup>a</sup>	42,2 <sup>a</sup>	40,5 <sup>b</sup>
$\Delta V$ (m³/ha)	+ 5,8 (+ 8 %)*	+ 1,4 (+ 2 %)	+ 0,5 (+ 1 %)	V (m³/ha)	83,6 <sup>a</sup>	81,4 <sup>a</sup>	75,5 <sup>b</sup>

\* Effet significatif au seuil de 5 %.

Les lettres a et b en exposant indiquent les différences significatives ( $p < 0,05$ ) entre traitements.

Quand on refertilise à 1,5 an le taillis rejetant après exploitation de la futaie, l'apport optimal de fertilisation NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) se situe aux environs de 300 kg/ha (soit, par hectare, 39 kg de N, 18 kg de P, 51 kg de K), comme indiqué sur la figure 2.

Au cours de la deuxième rotation de taillis, les quantités de fertilisation NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K) à appliquer sont plus élevées qu'en première rotation. En effet, il est nécessaire d'apporter au moins 400 kg/ha de NPK (soit, par hectare, 42 kg de N, 24 kg de P, 68 kg de K) (figure 3).

Sur futaie replantée après exploitation du taillis, on observe, en fertilisation starter, un effet principal significatif positif de N encore marqué 24 mois après la plantation (tableau IV et figure 4). L'apport de potassium induit significativement une meilleure croissance en hauteur jusqu'à 9 mois après la plantation : en moyenne + 0,3 m (+ 9 %) entre les traitements ayant reçu ou non un apport de K. Par la suite, cet effet principal n'est plus significatif. Le phosphore est significativement dépressif, mais l'effet reste limité, les écarts étant constants entre 9 et 24 mois. On ne note pas d'interaction significative entre éléments et la meilleure croissance en hauteur est relevée pour le traitement  $N_2$ , où seule la plus forte dose d'azote est apportée, à l'exception des autres éléments. Les résultats sont comparables pour les circonférences, mais dans ce cas la meilleure croissance est observée pour le traitement  $N_2P_1K_1$  (tableau V). Si on apporte seulement une fertilisation azotée à la mise en place d'une replantation, la dose à appliquer est alors d'au moins 50 g de N par plant, soit 40 kg de N par hectare. Quand la fertilisation est sous la forme d'un engrais ternaire NPK (13 % de N, 6 % de P, 17 % de K), les doses à appliquer sont deux fois plus élevées que pour les futaies sur savane : environ 400 g de NPK par plant (soit, par hectare, 32 kg de N, 14 kg de P, 40 kg de K) (figure 5).

Quand la fertilisation est appliquée en cours de rotation sur ces futaies replantées, le seul effet principal significatif est celui de l'azote (tableau IV). Il n'existe pas d'interaction significative entre éléments. Cependant, dans cet essai, les plus fortes croissances sont globalement relevées pour les fertilisations ternaires incluant la dose d'azote la plus élevée.



Savane côtière originelle autour de Pointe-Noire, au Congo.  
Original coastal savannah around Pointe-Noire, Congo.  
Photo R. Safou-Matondo.

**Tableau IV.**

**Effets principaux sur les hauteurs ( $\Delta H$ ), circonférence ( $\Delta C_{1,30\text{ m}}$ ) et volume total ( $\Delta V$ ) de N ( $N_{\text{princ}}$ ), P ( $P_{\text{princ}}$ ) et K ( $K_{\text{princ}}$ ) (en valeur absolue et en % de la moyenne des traitements n'ayant pas reçu l'élément). Futaie replantée après exploitation d'un taillis en première rotation. Essais factoriels  $3^3$  N P K.**

	$N_{\text{princ}}$	$P_{\text{princ}}$	$K_{\text{princ}}$
Fertilisation starter, valeurs à 24 mois			
$\Delta H$ (m)	+ 1,3 (+ 11%)*	- 0,2 (- 2 %)*	+ 0,2 (+ 2 %)
$\Delta C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	+ 3,3 (+ 12%)*	- 0,2 (- 1 %)*	+ 0,7 (+ 2 %)
Refertilisation à 16 mois, valeurs 17 mois après l'apport d'engrais			
$\Delta H$ (m)	+ 0,5 (+ 3 %)*	- 0,1 (- 1 %)	+ 0,1 (+ 1 %)
$\Delta C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	+ 1,7 (+ 5 %)*	- 0,1 (- 0,5 %)	+ 0,1 (+ 0,5 %)
$\Delta V$ (m <sup>3</sup> /ha)	+ 3,9 (+ 13 %)*	- 0,4 (- 1%)	+ 0,7 (+ 2 %)

\* Effet significatif au seuil de 5 %.

**Tableau V.**

**Hauteur (H) et circonférence à 1,30 m ( $C_{1,30\text{ m}}$ ) de quelques traitements de l'essai factoriel de fertilisation starter  $3^3$  N P K sur futaie replantée après exploitation d'un taillis en première rotation. Valeurs à 24 mois.**

	Traitement						
	$P_1$	$P_2$	Témoin	$N_1$	$N_2$	$N_2P_1K_1$	$N_2P_2K_2$
H (m)	10,6 <sup>a</sup>	11,2 <sup>ab</sup>	11,4 <sup>ab</sup>	12,2 <sup>ab</sup>	13,2 <sup>b</sup>	13,1 <sup>b</sup>	12,8 <sup>b</sup>
$C_{1,30\text{ m}}$ (cm)	26,4 <sup>a</sup>	27,0 <sup>ab</sup>	27,4 <sup>ab</sup>	29,1 <sup>ab</sup>	31,6 <sup>ab</sup>	32,6 <sup>b</sup>	32,1 <sup>b</sup>

Les lettres a et b en exposant indiquent les différences significatives ( $p < 0,05$ ) entre traitements.

$P_1$  = une dose de P ;  $P_2$  = deux doses de P ;  $N_1$  = une dose de N ;

$N_2$  = deux doses de N.

$N_2P_1K_1$  = deux doses de N + une dose de P + une dose de K.

$N_2P_2K_2$  = deux doses de N + deux doses de P + deux doses de K.

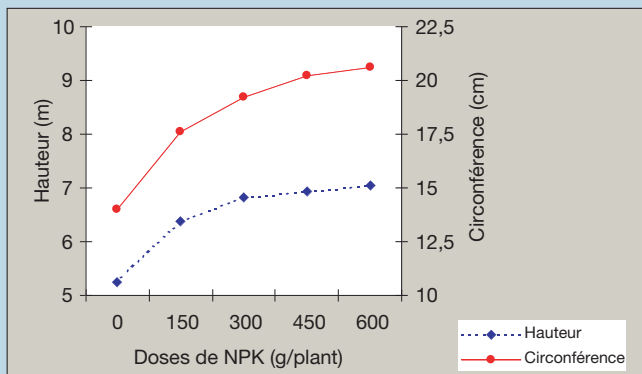




Essai de fractionnement des doses d'ammonitrate à neuf mois. *E. urophylla* x *E. grandis*, clone 18-154. Trial at nine months with fractionised doses of ammonitrate. *E. urophylla* x *E. grandis*, 18-154 clone. Photo R. Safou-Matondo.



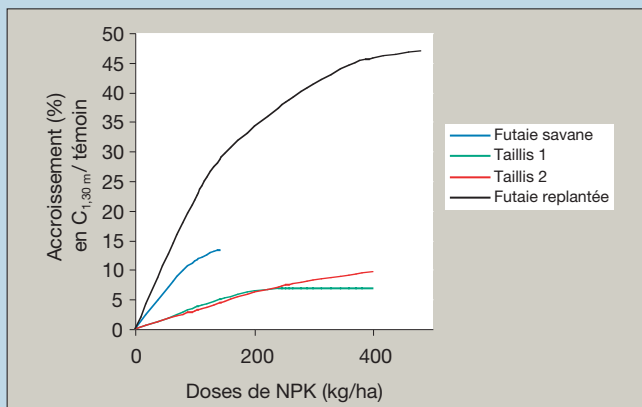
Essai densité de plantation. *E. urophylla* x *E. grandis*, clone 18-52, plantés à 600 tiges/ha et âgés de deux ans. Spacing trial. *E. urophylla* x *E. grandis*, 18-52 clone, 600 stems/ha at planting, aged two years. Photo R. Safou-Matondo.



**Figure 5.** Réponses en hauteur et circonférence d'une futaie replantée aux doses d'une fertilisation starter NPK (13 % N, 6 % P, 17 % K). Résultats à 12 mois. Responses in height and circumference in a replanted stand to doses of NPK starter fertilisation (13 % N, 6 % P, 17 % K). Results after 12 months.



Zone d'essai. Trial zone. Photo R. Safou-Matondo.



**Figure 6.** Courbes de réponse à la fertilisation NPK au cours des rotations successives d'*Eucalyptus*. Valeurs lissées à 12 mois pour la futaie sur savane, 24 mois pour la futaie replantée, et 18 mois après l'apport d'engrais pour les taillis. Response curves to NPK fertilisation during successive *Eucalyptus* rotations. Smoothed values for a stand on savannah land 12 months after fertiliser application, for a replanted stand after 24 months and for coppice after 18 months.



Parcelle de taillis d'hybrides naturels d'eucalyptus E.PF<sub>1</sub>. Coppice stand with E.PF<sub>1</sub> natural eucalyptus hybrids. Photo R. Safou-Matondo.



## Relations avec l'évolution des propriétés des sols

Il apparaît que les besoins en fertilisation NPK augmentent fortement au fur et à mesure des rotations (figure 6). En effet, il faut apporter en fertilisation starter, par hectare, 16 kg de N, 7 kg de P et 20 kg de K pour les futaies plantées sur savane. Mais ces quantités doivent être doublées pour les replantations mises en place après trois rotations d'eucalyptus (une futaie, deux taillis). De même, si pour la première rotation de taillis il faut appliquer, par hectare, 40 kg de N, 18 kg de P et 50 kg de K, il est nécessaire d'augmenter ces quantités au moins d'un tiers lors de la deuxième rotation.

### Effet N

On a mis en évidence que la nécessité d'apports croissants de fertilisation NPK est d'abord liée à l'augmentation des besoins en fertilisation N, cet élément se révélant comme le principal facteur limitant de la croissance.

Ce résultat est cohérent avec le bilan minéral des plantations, qui est très déséquilibré en azote :

- l'étude des cycles biogéochimiques permet d'estimer qu'après une rotation de futaie le déséquilibre est de 165 kg/ha de N (tableau VI) ; à l'inverse, le bilan est assez bien équilibré pour P et K ;
- après deux rotations (futaie + première rotation de taillis), le déséquilibre est de l'ordre de 375 kg/ha de N et atteint 550 kg/ha à la fin de la deuxième rotation de taillis (tableau VII).

Ce déséquilibre est dû principalement, d'une part, à la minéralisation rapide de la matière organique de la savane ou de celle restant sur le sol après exploitation des peuplements, conduisant à un lessivage important d'azote pendant la phase d'installation du peuplement, et, d'autre part, à l'exportation hors de l'écosystème de l'azote contenu dans les troncs et le bois de feu, lors de l'exploitation du peuplement.

**Tableau VI.**  
Bilans entrées-sorties de N, P et K à la fin de la rotation de futaie d'*Eucalyptus* (7 ans) (d'après LACLAU, 2001).

	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
<b>Entrées</b>			
Dépôts atmosphériques	70	5	45
Fertilisation	35	15	48
Altération/fixation biologique	–	–	ε
<b>Sorties</b>			
Drainage profond + ruissellement	80	4,5	16,5
Exploitation <sup>(1)</sup>	190	29	69
<b>Bilans</b>	– 165	– 13,5	+ 7,5

<sup>1</sup> Exploitation du bois de pâte écorcé et du bois de feu.

**Tableau VII.**  
Bilans entrées-sorties d'azote après trois rotations d'*Eucalyptus*.  
Ordre de grandeur à la fin de chaque rotation et valeurs cumulées correspondantes (kg/ha).

	Futaie	Taillis Première rotation	Taillis Deuxième rotation
<b>Entrées</b>			
Dépôts atmosphériques	70	70	70
Fertilisation	35	40	50
<b>Sorties</b>			
Drainage profond + ruissellement	80	150	145
Exploitation	190	170	150
<b>Bilans</b>			
Fin de rotation	– 165	– 210	– 175
Cumulés	– 165	– 375	– 550

**Tableau VIII.**  
Quantités (kg/ha) de N, P et K dans le sol de savane (0-2 m).

Profondeur	N total	P assimilable <sup>(1)</sup>	K échangeable
0-15 cm	574	45	36
15-50 cm	1 159	96	98
50-200 cm	3 084	472	130
Total jusqu'à 2 m de profondeur	4 800	610	260

<sup>1</sup> Méthode de DUCHAUFOUR et BONNEAU (1959).



Savane originelle, galerie forestière et plantation d'eucalyptus.  
*Original savannah, gallery forest and eucalyptus plantation.*  
Photo R. Safou-Matondo.



Parcelle d'eucalyptus en cours d'exploitation.  
*Logging in a parcel of eucalyptus.*  
Photo R. Safou-Matondo.

### Effet K

Ce déséquilibre doit être comparé aux faibles réserves azotées du sol. En effet, si on peut estimer à 4 800 kg/ha l'azote total contenu dans les deux premiers mètres du sol de savane, cette quantité n'est plus que de 2 000 kg/ha dans les cinquante premiers centimètres où s'observe l'essentiel de la minéralisation (tableau VIII). De plus, des études isotopiques ont montré que le tiers de la matière organique de l'horizon A<sub>1</sub> provient d'une forêt naturelle disparue il y a environ 3 000 ans (TROUVÉ, 1992). Or cette matière organique est très résistante à la dégradation et ne participe sans doute pas à la nutrition azotée des plantations.

Les deux approches développées – essais agronomiques et étude des cycles biogéochimiques – permettent de conclure de manière cohérente à une forte diminution des quantités d'azote dans le sol au cours des rotations successives d'eucalyptus. La durabilité de ces plantations dépend donc étroitement d'entrées croissantes de N dans l'écosystème.

On n'a observé qu'un très faible impact de la fertilisation potassique sur la croissance des plantations, et principalement au travers d'une interaction positive entre N, P et K. On peut considérer que ce résultat est cohérent avec le bilan équilibré en K à la fin de la rotation de futaie. Cependant, il faut tenir compte du fait que 50 kg/ha de K avaient été apportés par fertilisation durant cette rotation. De plus, le stock de K du sol est faible (450 kg/ha jusqu'à 6 m de profondeur ; LACLAU, 2001) et l'efficacité de la nutrition minérale (kg de matière sèche produite/kg d'éléments minéraux accumulés dans la biomasse) est parmi les plus fortes observées pour les plantations d'eucalyptus (LACLAU *et al.*, 2000 ; HERBERT, 1996). Enfin, la décomposition de la litière et des rémanents restant sur les parcelles après exploitation du peuplement conduit à un déficit en K estimé à 50 kg/ha par rotation de taillis (BERTAUX, 2001). Des apports de K pourraient ainsi s'avérer nécessaires durant les prochaines rotations, en particulier si seules des fertilisations azotées sont apportées.

### Effet P

L'effet principal nul de P pour les plantations sur savane est cohérent avec les quantités élevées de cet élément trouvées dans les sols côtiers du Congo (2 700 kg de P assimilable par hectare jusqu'à 6 m de profondeur ; LACLAU, 2001) et la très faible efficacité d'utilisation relevée pour cet élément chez les arbres (LACLAU *et al.*, 2000). À l'opposé, le phosphore est souvent le premier facteur limitant de la croissance dans les pays où sont installées les plantations d'eucalyptus (HERBERT, 1996).

L'effet dépressif de P sur la croissance juvénile des replantations pourrait être lié à une augmentation de l'activité microbienne, entraînant une immobilisation de l'azote minéral du sol. De telles observations ont été faites en Australie dans des plantations d'eucalyptus quand les concentrations en carbone soluble du sol augmentent, suite à la décomposition des rémanents d'exploitation (ADAMS, ATTWILL, 1991).



Parcelle industrielle d'hybrides naturels d'eucalyptus  $E.PF_1$ , sur podzol, qui a été parcourue par des feux courants.  
*Industrial stand with  $E.PF_1$  natural eucalyptus hybrids on podzol burned by surface fires.*  
Photo R. Safou-Matondo.



Vue des rémanents d'exploitation laissés sur coupe.  
*Slashes left after felling.*  
Photo R. Safou-Matondo.



Savane originelle et plantation d'eucalyptus.  
*Original savannah and eucalyptus plantation.*  
Photo R. Safou-Matondo.

## Perspectives

Le fort déséquilibre du bilan azoté dans les sols après trois rotations et la réponse marquée à la fertilisation N montrent, de manière cohérente, que la durabilité minérale des plantations congolaises d'eucalyptus est liée aux entrées de N dans l'écosystème. Les fertilisations azotées devront être plus importantes qu'au cours des rotations précédentes, afin d'équilibrer le bilan entrées-sorties en N et de reconstituer, au moins partiellement, le stock d'azote du sol. Ces apports plus élevés seront aussi rendus nécessaires par les plus forts besoins en N du nouvel hybride *E. urophylla* x *E. grandis*, plus productif. Des essais sont en cours pour établir les courbes de réponse des replantations à la fertilisation azotée, tant à la mise en place des peuplements qu'en cours de rotation. De fortes doses y sont testées (jusqu'à 160 kg/ha de N par application) en fonction, en particulier, des densités de plantation et des caractéristiques stationnelles. Les peuplements étant aussi de plus en plus fréquemment parcourus par des feux, il est très important d'étudier l'influence

de ce facteur sur la dynamique de N dans le sol et, par voie de conséquence, sur les modalités d'apport de la fertilisation azotée au cours de la rotation. Afin de réduire le coût des intrants minéraux, des essais d'introduction de légumineuses rampantes (*Pueraria phaseolides*...) ou en sous-étage (*Acacia mangium*...) ont été également mis en place. Un des objectifs est de voir s'il est possible de gérer de façon synergique l'association « eucalyptus + légumineuses », en réduisant la compétition pour l'eau et les éléments minéraux autres que l'azote (BAUHUS *et al.*, 2000).

On n'a pas observé sur les replantations d'effet positif durable de la fertilisation K ou P. Des études sont cependant en cours pour tester si cette réponse évolue au cours du temps, en particulier pour K. Concernant cet élément, il serait intéressant d'étudier si, dans les conditions des savanes littorales du Congo, Na ne se substitue pas partiellement à K. En effet, des études physiologiques ont montré l'existence d'un tel phénomène dans le métabolisme de

certaines végétaux supérieurs, sans perturbation de la croissance (MARSHNER, 1995). Aucune référence n'a été trouvée à ce sujet sur l'eucalyptus, mais il a été observé au Brésil et en Afrique du Sud que la réponse de ces espèces à l'apport de K est beaucoup plus marquée à l'intérieur du pays qu'à proximité de la mer (LACLAU, 2001). Par ailleurs, d'autres expérimentations sont conduites afin de mieux comprendre l'effet dépressif de l'apport de P à la replantation.

Concernant les autres éléments minéraux, on peut préciser que l'apport d'amendements calco-magnésiens n'a pas eu d'effet sur la croissance des plantations sur savane (LEE, 1995). Cependant, si on tient compte des faibles réserves de Ca et Mg dans le sol, de nouveaux essais seront mis en place sur des replantations. Enfin, des études sont en cours pour quantifier l'éventuel impact de l'apport d'oligoéléments.



## Références bibliographiques

ADAMS M. A., ATTIWILL P. M., 1991. Nutrient balances in forests of northern Tasmania. 2. Alteration of nutrient availability and soil chemistry as a result of logging, slash-burning and fertilizer application. *Forest Ecology and Management*, 44 : 115-131.

BAUHUS J., KHANNA P. K., MENDEN N., 2000. Aboveground and below-ground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Canadian Journal of Forestry Research*, 30 : 1886-1894.

BERTAUX P., 2001. Fertilisation « *urophylla x grandis* ». Synthèse des résultats disponibles et éléments de décision. Note technique. Pointe-Noire, Congo, Eco Sa, 8 p.

BONNEFOI B., 1986. Bilan des essais engrais réalisés depuis 1976. Note interne. Pointe-Noire, Congo, Cftf, 8 p.

BOUILLET J.-P., SAFOU-MATONDO R., LACLAU J.-P., NZILA J. D., RANGER J., 2001. Changes over successive rotations in NPK fertiliser needs of Congolese clonal *Eucalyptus* plantations. Relationships with changes in soil fertility. *In* : Developing the Eucalypt of the future. Iufro International Symposium, Valdivia, Chili, 10-15 septembre 2001, 10 p.

DUCHAUFOR P., BONNEAU M., 1959. Une nouvelle méthode de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers. *Bulletin de l'Association française d'étude des sols*, 4 : 193-198.

HERBERT M. A., 1996. Fertilizers and eucalypt plantations in South Africa. *In* : Attiwill P. M., Adams M. A. (éd.). *Nutrition of Eucalypts*. Collingwood (Victoria), Australie, Csiro, p. 303-325.

HERMELINE M., 1985. Second apport de KCl en plein. Note interne. Pointe-Noire, Congo, Cftf, 6 p.



Parcelle industrielle d'hybrides naturels d'eucalyptus *E.PF<sub>1</sub>*, arrivés à l'âge d'exploitation (8 ans).  
*Industrial parcel of 8 year-old E.PF<sub>1</sub> natural eucalyptus hybrids, ready for felling.*  
Photo R. Safou-Matondo.

LACLAU J.-P., 2001. Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquences pour la gestion des plantations industrielles. Thèse, Institut national agronomique Paris-Grignon, France, 146 p.

LACLAU J.-P., BOUILLET J.-P., RANGER J., 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management*, 128 : 181-196.

LEE P., 1995. Nutrition of *Eucalyptus* in the Kouilou region. Review of knowledge 1995. Pointe-Noire, Congo, Cdf, division nutrition, 39 p.

MARSCHNER H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition, Londres, Royaume-Uni, Academic Press, 889 p.

NZILA J. D., TURPAULT M. P., LACLAU J.-P., RANGER J., 2001. Quantification of the input of nutrients by weathering of soil minerals, for ecologically sound management of tropical plantation forests. *In* : Proceedings of the fourth workshop « Site management and productivity in tropical forest plantations », Pointe-Noire, Congo, 8-12 juillet 2001.

SAFOU-MATONDO R., DELEPORTE P., LACLAU J.-P., BOUILLET J.-P., 2001. Hybrid and clonal variability of nutrient accumulation and nutrient use efficiency in eucalypt stands in Congo. *In* : Proceedings of the Iufro symposium « Developing the eucalypt of the future », Valdivia, Chili, 10-15 septembre 2001.

SAYA R. A., VIGNERON P., BOUVET J.-M., CORNILLON P. A., GOUMA R., 2001. Effect of plot size and spacing on assessment of eucalyptus hybrid clonal value. *In* : Proceedings of the Iufro symposium « Developing the eucalypt of the future », Valdivia, Chili, 10-15 septembre 2001.

TROUVÉ C., 1992. Apport de la géochimie isotopique ( $\delta^{13}C$ ) à l'étude du renouvellement des matières organiques et des sucres neutres dans les sols tropicaux soumis à des changements d'écosystèmes. Cas des aménagements forestiers sur les savanes de Pointe-Noire au Congo, Thèse de doctorat, université d'Orléans, France, 112 p.

VIGNERON P., DELWAULLE J.-C., 1990. Sylviculture clonale des *Eucalyptus*. *In* : Proceedings of the XIX Iufro World Congress, Montréal, Canada, août 1990.

## Synopsis

### FERTILISATION: A CRUCIAL FACTOR FOR THE SUSTAINABILITY OF EUCALYPTUS PLANTATIONS IN THE CONGO

J.-P. BOUILLET, R. SAFOU-MATONDO,  
J.-P. LACLAU, J. D. NZILA, J. RANGER,  
P. DELEPORTE

**Since 1978**, 42 000 ha of clonal eucalyptus plantations have been established in the savannahs around Pointe-Noire (4° S, 12° E). The soils (ferralitic arenosols) are sandy, acidic, with very low reserves of available nutrients ( $CEC < 0.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ soil}$ ). Because rotations are short (7 years) and the clones highly productive (up to  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  in clonal tests), it is essential to quantify fertiliser input in order to ensure sustained and sustainable production. For 20 years, experiments have therefore been seeking to define plantation requirements of NPK fertiliser, over successive stand rotations.

#### The experiments

The experiments were as follows:

- Planted crop (starter doses): N-P-K  $2^3$  factorial; NPK (13% N, 6% P, 17% K) amounts.
- Planted crop (mid rotation doses): N-P-K  $2^3$  factorial.
- First rotation coppice (mid-rotation doses): NPK (13% N, 6% P, 17% K) amounts.
- Second rotation coppice (mid-rotation doses): NPK (13% N, 6% P, 17% K) amounts.
- Replanted sites (starter doses): N-P-K  $3^3$  factorial ; NPK (13% N, 6% P, 17% K) amounts.
- Replanted sites (mid-rotation doses): N-P-K  $3^3$  factorial.
- Study of biogeochemical cycles in a savannah and in a planted crop to quantify nutrient fluxes in both ecosystems and establish nutrient budgets.

#### Effects of fertilisers

On the planted crop, N and K fertilisers had positive main effects when applied on planting. At 21 months, the circumference at breast height (CBH) increased by 10% and 7% with N and K fertiliser, respectively. Although no significant NPK interaction was found, the best growth rates were observed with NPK fertiliser, optimal doses being established at  $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ,  $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$  and  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$ . Only a significant positive main effect of N was found for mid-rotation fertilisation. The application of N resulted, after 24 months, in an increase of 4% and 8% in CBH and total volume, respectively. Again, the best stand production was observed with NPK fertiliser.  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ,  $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ ,  $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$  had to be applied after 2 years.

For the first coppice rotation,  $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ,  $18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$  and  $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$  had to be applied after 1.5 years. During the second coppice rotation these amounts had to be increased by one third at least.

On the replanted sites, there was a significant positive main effect of N applied as a starter. At 24 months, CBH was 12% higher where N was applied than without N. A positive main effect for K was observed only during the first year after planting. A depressive main effect for P was still observed 24 months after planting, with the application of P resulting in a decrease of 0.25 m in height (constant value between 9 and 24 months). The NPK fertilizer requirement (13% N, 6% P, 17% K) on planting was twice as high as for the crop planted on savannah land. N was found to have a significant positive main effect in mid-rotation. Main effects for K and P, however, were no longer significant. The application of N resulted, after 17 months, in an increase of 5% and 13% in CBH and total volume, respectively.

Subsequently, NPK fertilizer requirements increased over successive stand rotations. This was mainly linked to the increase in N fertilizer demand and was consistent with the high N unbalance in nutrient budgets ( $-165 \text{ kg N ha}^{-1}$  at the end of the planted crop rotation,  $-375 \text{ kg N ha}^{-1}$  after the first coppice rotation, and  $-550 \text{ kg N ha}^{-1}$  at the end of the second coppice rotation). This unbalance is mostly due to N removal by harvesting and N leaching from decomposing slash. The N unbalance accounts for 30 % of potential N mineralisation in the first 50 cm of topsoil. The sustainability of these plantations is therefore dependent on N inputs into the ecosystem. Mixed stands of *Eucalyptus* and leguminous species (*Acacia* sp., *Pueraria phaseolides*...) will be tested in the near future.

A possible explanation for the depressive effect of P might be an increase in micro-organism biomass, inducing N immobilisation. No K effect has been recorded but, as reserves are low, K inputs might become necessary during the next rotations. Other trials will focus on Ca and Mg application, and on micro-element deficiencies.