

Jean-Paul LACLAU¹
Jacques RANGER²
Jean de Dieu NZILA³
Jean-Pierre BOUILLET¹
Dominique GELHAYE²
Philippe DELEPORTE¹

¹ Cirad-forêt (UR2PI)
Programme arbres et plantations
TA/10C
34398 Montpellier Cedex 5
France

² Inra
Biogéochimie des écosystèmes
forestiers
54280 Champenoux
France

³ UR2PI
BP 1291
Pointe-Noire
République du Congo

Eucalyptus et fertilité des sols au Congo

À partir de la quantification, pendant une durée de trois ans, des principaux flux d'éléments nutritifs et des bilans entrées-sorties dans deux écosystèmes, une savane herbacée et une plantation d'eucalyptus, des recommandations sont faites pour optimiser les apports de fertilisants et les techniques culturales, afin d'assurer la durabilité de la production de bois tout en respectant l'environnement.



Photo 1.

Vue générale de la plantation d'eucalyptus dans laquelle le dispositif d'étude des cycles biogéochimiques a été installé.

Overall view of the eucalyptus plantation where the study of biogeochemical cycles was carried out.

Photo D. Gelhaye.

RÉSUMÉ

EUCALYPTUS ET FERTILITÉ DES SOLS AU CONGO

Les plantations d'*Eucalyptus* du littoral congolais produisent de fortes quantités de biomasse dans des sols très pauvres en éléments nutritifs. Le fonctionnement minéral de ces plantations et leur impact sur le statut organo-minéral des sols de savane ont été étudiés. La dynamique des principaux flux d'éléments minéraux dans les arbres a été mesurée à partir d'une chronoséquence couvrant la rotation de futaie. Les stocks d'éléments nutritifs dans les sols ont été quantifiés dans une savane originelle et une plantation monoclonale d'eucalyptus adjacente. Sur ce site, les dépôts atmosphériques, les échanges foliaires et le drainage dans les horizons de sol prospectés par les racines (6 m) ont été mesurés pendant trois années. Le fonctionnement minéral de l'écosystème évolue fortement après boisement. En particulier, les dépôts secs ainsi que les prélèvements hydriques et minéraux sont nettement plus élevés dans la plantation que dans la savane. Un recyclage intense d'éléments nutritifs dans cet écosystème permet de fortes productions de biomasse, avec des transferts internes dans les arbres et des retours au sol par les litières importants, ainsi que de faibles pertes par drainage. Les apports atmosphériques, la fertilisation et la minéralisation de la matière organique jouent un rôle crucial dans la nutrition des arbres. Le bilan entrées-sorties d'azote nettement déficitaire dans l'écosystème d'*Eucalyptus* indique que les fertilisations azotées devront augmenter au cours des rotations successives. En revanche, les bilans sont pratiquement équilibrés pour les autres éléments. Ces résultats sont cohérents avec les essais de fertilisation et suggèrent l'intérêt d'introduire un sous-étage fixateur d'azote dans ces plantations.

Mots-clés : *Eucalyptus*, savane, cycle biogéochimique, élément nutritif, durabilité.

ABSTRACT

EUCALYPTUS AND SOIL FERTILITY IN THE CONGO

Eucalyptus plantations along the Congolese coast produce large quantities of biomass on nutrient-poor soils. The mineral cycle in these plantations and their impact on the organic and mineral status of savannah soils were studied, with measurements of the dynamics of the main mineral flows in trees over a time series covering the full rotation period of the eucalyptus stand. Nutrient stocks in the soil were quantified for native savannah land and for an adjacent monoclonal eucalyptus plantation. Atmospheric deposition, canopy exchanges and drainage in the soil horizons through the full rooting depth (6 m) were measured over three years in the site. The ecosystem's mineral cycle changed considerably after afforestation. In particular, deposition of dry matter and water abstraction were much higher in the plantation than in the native savannah. Intensive recycling of nutrients in the ecosystem produced large quantities of biomass, with internal retranslocation in trees and matter returning to the soil in large amounts of leaf litter, as well as low drainage losses. Atmospheric deposition, fertilisation and mineralisation were crucial to tree nutrition. The clearly negative nitrogen budget in the *Eucalyptus* ecosystem indicates that nitrogenous inputs needs to be increased through successive rotations. On the other hand, budgets for other minerals are practically balanced. These results are consistent with the fertilisation tests and suggest that establishing a nitrogen-fixing understorey in these plantations could be of interest.

Keywords: *Eucalyptus*, savannah, biogeochemical cycle, nutrient, sustainability.

RESUMEN

EUCALIPTO Y FERTILIDAD DE LOS SUELOS EN EL CONGO

Las plantaciones de eucalipto del littoral congoleño producen grandes cantidades de biomasa en suelos muy pobres en elementos nutritivos. Se estudió el funcionamiento mineral de estas plantaciones y su impacto en el estado organo-mineral de los suelos de sabana. Se midió la dinámica de los principales flujos de elementos minerales en los árboles a través de una cronosecuencia que cubría la rotación de bosques. Se estimaron las reservas de elementos nutritivos en los suelos en una sabana original y una plantación monoclonal de eucalipto contigua. En este lugar y durante tres años, se midieron los depósitos atmosféricos, intercambios foliares y drenaje en los horizontes de suelo colonizados por las raíces (6 m). El funcionamiento mineral del ecosistema evoluciona mucho tras repoblación forestal. En particular, las deposiciones secas así como las muestras hídricas y minerales son mucho más altas en la plantación que en la sabana. Un reciclaje intenso de elementos nutritivos en este ecosistema permite grandes producciones de biomasa, con transferencias internas en los árboles y un retorno al suelo mediante importantes capas de hojarasca y escasas pérdidas por drenaje. Los aportes atmosféricos, la fertilización y la mineralización de la materia orgánica desempeñan un papel crucial en la nutrición de los árboles. El balance entradas/salidas de nitrógeno claramente deficitario en el ecosistema de eucalipto indica que las fertilizaciones nitrogenadas deberán incrementarse durante las sucesivas rotaciones. En cambio, los balances se encuentran prácticamente equilibrados en los demás elementos. Estos resultados son coherentes con los ensayos de fertilización y muestran el interés de introducir un piso inferior fijador de nitrógeno en estas plantaciones.

Palabras clave: eucalipto, sabana, ciclo biogeoquímico, elemento nutritivo, sostenibilidad.

Introduction

Environ 42 000 ha de peuplements clonaux d'*Eucalyptus* ont été plantés depuis 1978 dans les savanes littorales du Congo, autour de la ville de Pointe-Noire. La sylviculture à courtes rotations pratiquée dans ces sols à très faibles réserves en éléments nutritifs est destinée à la production de bois de trituration pour la pâte à papier. Des expérimentations sylvicoles ont été mises en place depuis plusieurs dizaines d'années au Congo, mais une approche plus globale a été engagée, à partir de 1997, au sein de l'Unité de recherche sur la productivité des plantations industrielles (UR2PI), afin d'optimiser les apports de fertilisants et les techniques culturales (figure 1). Dans le cadre de l'étude de la durabilité de ces plantations, les cycles d'éléments nutritifs ont été évalués pendant trois années dans une savane herbacée originelle et une plantation monoclonale d'*Eucalyptus*.

Les études de cycles biogéochimiques quantifient les stocks d'éléments nutritifs dans les différents compartiments de l'écosystème (sol et formation végétale), les transferts d'éléments entre ces compartiments et les flux entrants et sortants dans l'écosystème. Ce type d'approche permet de calculer des bilans entrées-sorties d'éléments nutritifs dans les sols et d'identifier des indicateurs fiables des tendances évolutives d'un système, en fonction des caractéristiques propres du système. Ces indicateurs peuvent déceler des changements des propriétés des sols avant qu'ils se traduisent par une modification de la croissance des peuplements. Les bilans entrées-sorties calculés pour l'ensemble de la rotation forestière conduisent à des recommandations pratiques concernant la longueur des rotations, l'intensité de la récolte, ou le raisonnement de la fertilisation pour maintenir la production en respectant l'environnement (fertilité des sols et caractéristiques des eaux de surface).

Certains flux d'éléments comme l'incorporation dans la biomasse aérienne des arbres ou les retours au sol avec les litières ont été intensivement étudiés dans les plantations d'*Eucalyptus*, mais d'autres flux importants comme les transferts sous forme dissoute dans les eaux gravitaires n'ont été que très rarement quantifiés. Les travaux les plus complets dans des peuplements d'*Eucalyptus* ont été réalisés dans des forêts naturelles en Australie, mais le comportement minéral de ce type d'écosystème est susceptible de différer fortement de celui de plantations gérées intensivement pour la production de biomasse.

L'étude menée au Congo s'est fixé plusieurs objectifs : améliorer la compréhension du fonctionnement

minéral des deux écosystèmes ; établir des bilans entrées-sorties d'éléments nutritifs dans les sols afin de quantifier l'influence de la plantation sur la fertilité minérale des sols ; fournir des informations concernant les quantités d'engrais à apporter pour assurer à la fois la durabilité de la production de bois et la conservation des paramètres majeurs de l'environnement (en particulier le sol et les eaux superficielles). Cet article présente la quantification, pendant une durée de trois ans, des principaux flux d'éléments nutritifs et des bilans entrées-sorties dans les deux écosystèmes (encadré 1 : matériel et méthodes ; figure 2). Les conséquences pratiques de ces résultats pour la gestion des plantations sont abordées.

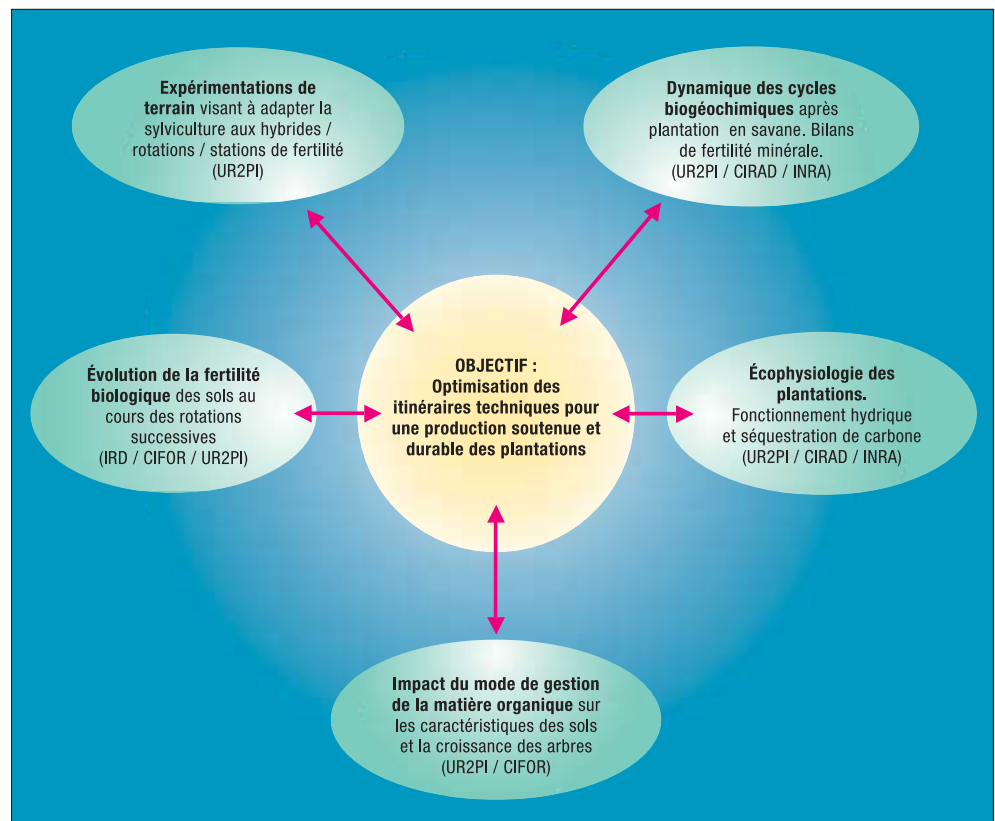


Figure 1.

Études menées au Congo sur la durabilité des plantations d'eucalyptus.

Les équipes impliquées sont indiquées entre parenthèses.

Studies carried out in the Congo on the sustainability of eucalyptus plantations.

The teams involved are indicated in brackets.

Encadré 1. Matériel et méthodes

Situation écologique et matériel végétal

La plantation d'*Eucalyptus* et la savane étudiées sur le site de Kondi sont situées à 10 km de la mer, à environ 40 km au nord de Pointe-Noire (figure 2). Les principales caractéristiques du climat sont une très forte humidité atmosphérique (85 % en moyenne), avec de faibles variations saisonnières, une pluviosité annuelle oscillant autour de 1 200 mm, avec deux paroxysmes (novembre et février-mars) et une saison sèche marquée entre mai et septembre. La température moyenne de 25 °C présente de faibles variations saisonnières (5 °C).

Les sols sont des *Ferralsic Arenosols* (classification Fao) développés sur d'épais dépôts de sédiments d'origine continentale datés du pliopléistocène. Ils sont caractérisés par leur homogénéité en texture (teneur en sable > 85 %), leur profondeur importante et leur pauvreté en éléments nutritifs.

Les *Eucalyptus* hybrides étudiés ici proviennent de croisements naturels entre deux ou trois individus d'*Eucalyptus alba* Reinw. ex-Blume (arbres mères) et un groupe d'*Eucalyptus* hybrides mal identifiés, issus d'un arboretum brésilien (arbres pères). L'âge optimal d'exploitation de ces plantations est de 7 ans, mais la coupe a lieu fréquemment entre 6 et 9 ans, en fonction des fluctuations du marché du bois de pâte à papier.

Le dispositif d'étude des cycles biogéochimiques a été installé dans un peuplement monoclonal âgé de 6 ans, du clone d'*Eucalyptus* le plus représenté dans le massif industriel, ainsi que dans une savane herbacée située sur le même type de sol, à environ 500 m (photos 1 et 2). À l'âge de 6 ans, le volume moyen sur écorce de la plantation était de 158 m³/ha. La biomasse aérienne de la savane atteignait environ 5 t/ha de matière sèche à la fin de la saison des pluies. Cette savane a été brûlée chaque année en saison sèche, comme la plupart des savanes du littoral congolais.



Photo 2.

Vue générale de la savane dans laquelle le dispositif d'étude des cycles biogéochimiques a été installé.
Overall view of the savannah area where the study of biogeochemical cycles was carried out.
Photo D. Gelhaye.

Méthodologie

Une description précise de la méthodologie employée est présentée par LACLAU (2001). Seuls les principaux points sont indiqués ici.

Échantillonnage

Les stocks d'éléments ont été quantifiés au début de l'étude dans le peuplement d'*Eucalyptus* âgé de 6 ans et dans la savane (photo 3). Nous avons considéré que la profondeur de sol intervenant dans la nutrition des formations végétales est de 6 m dans la plantation et 3 m dans la savane. En effet, au-delà de ces profondeurs, la densité de racines est extrêmement faible (LACLAU *et al.*, 2001, 2002). La dynamique d'incorporation des éléments minéraux dans les arbres a été mesurée à partir d'une chronoséquence de peuplements pour le même clone d'*Eucalyptus* et par des mesures de biomasse et minéralomasse tous les mois, entre deux feux annuels, dans la savane.

Les autres mesures ont été réalisées pendant trois années dans des placeaux de 0,25 ha situés dans chaque écosystème : chute de litière, apports par les pluies au-dessus de la savane, pluviolessivats sous le feuillage, écoulements de tronc, ruissellement superficiel, composition chimique des eaux gravitaires sous la litière au sol et des solutions du sol collectées par des lysimètres à différentes profondeurs, jusqu'à 4 m en savane et 6 m dans la plantation (photos 4 à 9).

Analyses chimiques

Les solutions ont été collectées chaque semaine et les échantillons ont été conservés à + 4 °C. Des échantillons composites ont été préparés toutes les quatre semaines pour limiter le nombre d'analyses chimiques. Les solutions ont été filtrées à Pointe-Noire et les mesures de pH et SO₄²⁻ ont été effectuées aussi vite que possible. Les échantillons ont ensuite été acidifiés avec H₂SO₄ et envoyés au laboratoire du Cirad en France, où des balances ioniques complètes ont été établies. Les analyses chimiques de végétaux et de sols ont été effectuées au laboratoire de l'Ird à Pointe-Noire et du Cirad à Montpellier, avec des intercalibrations régulières entre ces laboratoires.

Quantification des flux d'éléments nutritifs

Les flux d'éléments nutritifs ont été mesurés pendant trois années dans les deux écosystèmes, entre les âges de 6 et 9 ans dans la plantation. Les dépôts atmosphériques d'aérosols ont été évalués en considérant le sodium comme un traceur pour lequel les échanges foliaires sont négligeables. Un modèle hydrique a été utilisé pour quantifier les flux de drainage. Ce modèle a été validé à partir de la mesure en continu de l'humidité du sol jusqu'à 5 m de profondeur par des sondes Tdr.

Les flux d'éléments minéraux dissous dans les eaux de drainage n'ont pas été mesurés pendant la croissance juvénile de la plantation. Les hypothèses formulées pour l'évaluation de ces flux, nécessaires au calcul des bilans d'éléments nutritifs pour l'ensemble de la rotation, sont présentées par LACLAU (2001).

Flux d'eau et d'éléments minéraux

Production de biomasse

Les dynamiques d'accumulation de biomasse dans les différents compartiments aériens des arbres et de la savane sont présentées dans la figure 3. La production de biomasse aérienne reste élevée dans la plantation jusqu'à l'âge d'exploitation. Elle représente environ 15 tonnes par hectare et par an à partir de deux ans et s'accumule essentiellement dans le compartiment bois de tronc. Dans la savane, des feuilles mortes apparaissent sur les touffes de graminées environ trois mois après les premières pluies (décembre). La biomasse de feuilles vivantes reste stable autour de 3 t/ha pendant toute la saison des pluies, puis diminue considérablement en saison sèche. Les chutes de litière, nettement supérieures dans le peuplement d'*Eucalyptus*, contribuent à une production primaire nette beaucoup plus importante qu'en savane.

Dynamiques d'incorporation des éléments dans les peuplements

Au cours de la croissance des arbres, les dynamiques d'incorporation dans la biomasse diffèrent fortement selon les éléments (figure 4) :

- l'incorporation de phosphore (P) et de calcium (Ca) est proportionnelle à l'accumulation de biomasse dans les plantations entre les âges de un et sept ans ; dans la plantation de sept ans de la chronoséquence, 47 kg/ha de P et 91 kg/ha de Ca ont été accumulés dans la partie aérienne des arbres ;
- le magnésium (Mg) est principalement incorporé au cours de la phase de croissance juvénile, 80 % des 46 kg/ha accumulés dans la partie aérienne des arbres à sept ans ayant été incorporés au cours des deux pre-

mières années ; à partir de quatre ans, l'incorporation de cet élément dans les arbres est très faible ;

- la dynamique d'incorporation d'azote (N) et de potassium (K) est intermédiaire, 50 % de N et 65 % de K accumulés dans la partie aérienne des arbres en fin de rotation ayant déjà été incorporés à l'âge de deux ans. La minéralomasse de N dans la partie aérienne des arbres de sept ans est de 234 kg/ha et celle de K de 62 kg/ha.

Ces informations concernant les dynamiques d'incorporation d'éléments nutritifs dans les arbres seront utilisées pour orienter les futures expérimentations de fertilisation, afin d'adapter les apports aux besoins courants des peuplements.

Dans la savane, la dynamique d'incorporation dans la partie aérienne après le brûlis annuel diffère aussi selon les éléments : l'incorporation de Ca se poursuit jusqu'à la fin de la sai-

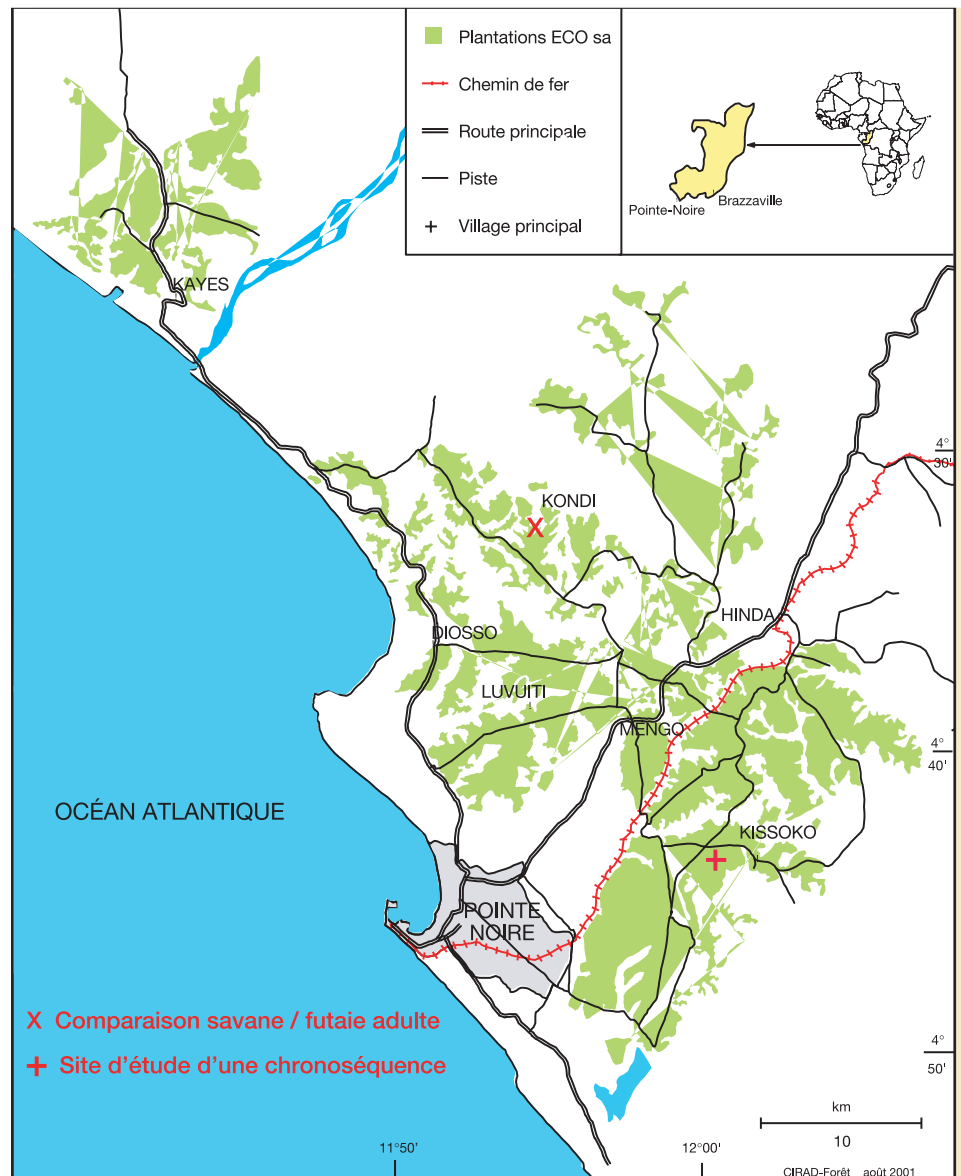
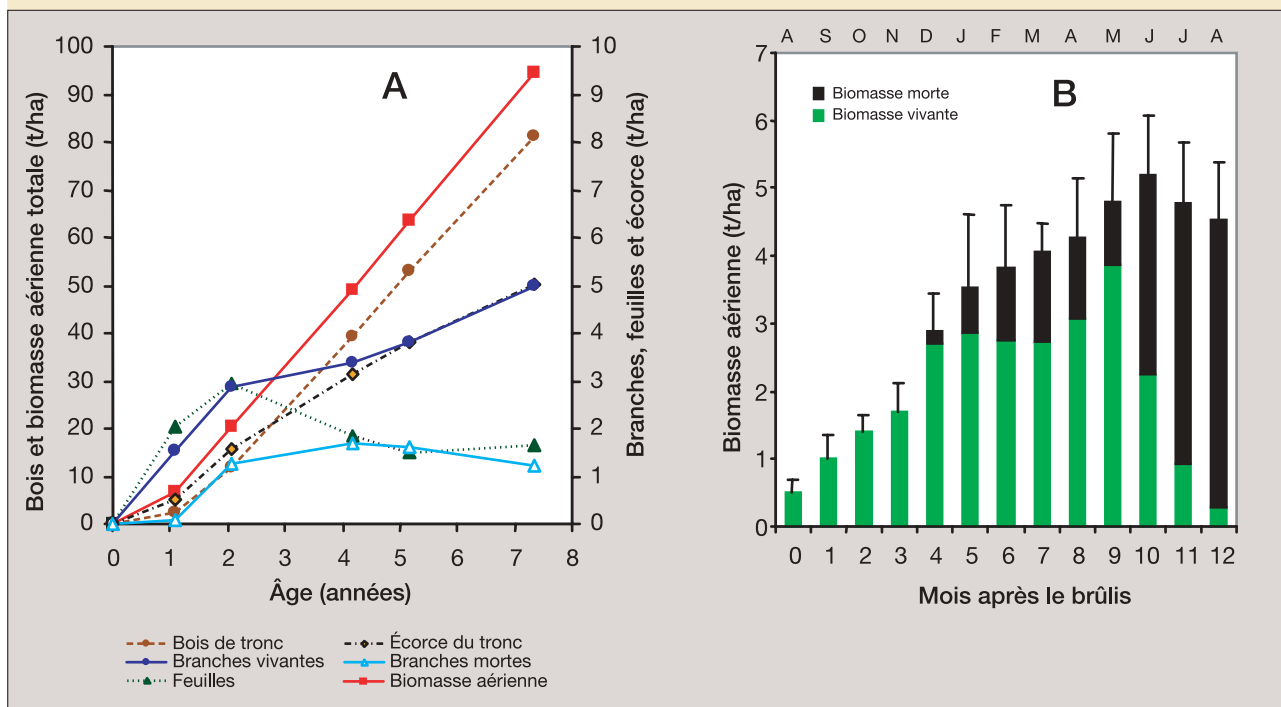


Figure 2.

Localisation des plantations industrielles d'eucalyptus au Congo. Le site d'étude des cycles biogéochimiques est indiqué ainsi que la zone où la chronoséquence de peuplements a été échantillonnée.

Location of industrial eucalyptus plantations in the Congo. The site used to study biogeochemical cycles is shown, as well as the zone where stands were sampled to produce time series.

**Figure 3.**

Dynamique de la biomasse des différents compartiments aériens au cours de la rotation d'eucalyptus (A) et entre deux brûlis annuels de la savane (B).
Comparative biomass dynamics in the various aerial compartments during eucalyptus stand rotation (A) and between two yearly savannah burn-offs (B).

Tableau I.

Principaux flux d'éléments nutritifs (en kg/ha/an) dans l'écosystème d'*Eucalyptus* et dans la savane (valeurs entre parenthèses) étudiés à Kondi.

	Flux (mm)	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	P-HPO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	S-SO ₄ ²⁻
Apports atmosphériques ⁽¹⁾	1 493	3,3 (2,1)	6,8 (2,8)	0,7 (0,3)	6,5 (2,8)	8,2 (3,5)	3,3 (1,4)	17,5 (7,5)	5,7 (4,9)
Pluiolessivats	1 402 (1 304)	1,6 (2,9)	1,7 (0,7)	1,0 (3,0)	5,8 (13,3)	9,5 (9,7)	3,0 (8,9)	15,5 (7,0)	5,5 (4,5)
Écoulements de tronc	24	0,0	0,0	0,1	0,4	0,4	0,3	2,0	0,2
Chutes de litière ⁽²⁾			52,9 (4,1)	3,6 (0,2)	3,8 (0,4)	21,0 (1,5)	18,0 (1,1)	11,8	5,0
Drainage sous la litière au sol	1 426 (1 304)	1,8 (2,0)	0,9 (1,6)	3,7 (4,6)	5,9 (14,6)	8,0 (23,4)	4,7 (8,0)	29,8 (10,5)	9,3 (8,8)
Drainage profondeur 4 m	423 (796)	4,0 (2,7)	0,1 (1,2)	0,16 (0,10)	0,8 (0,8)	0,8 (0,6)	0,3 (0,3)	2,2 (6,2)	5,4 (6,0)
profondeur 6 m	363	3,5	0,1	0,23	1,1	0,9	0,9	2,1	5,2

⁽¹⁾ Les apports atmosphériques concernent les dépôts totaux (humides + secs).

⁽²⁾ Les concentrations dans les litières concernent les éléments totaux.

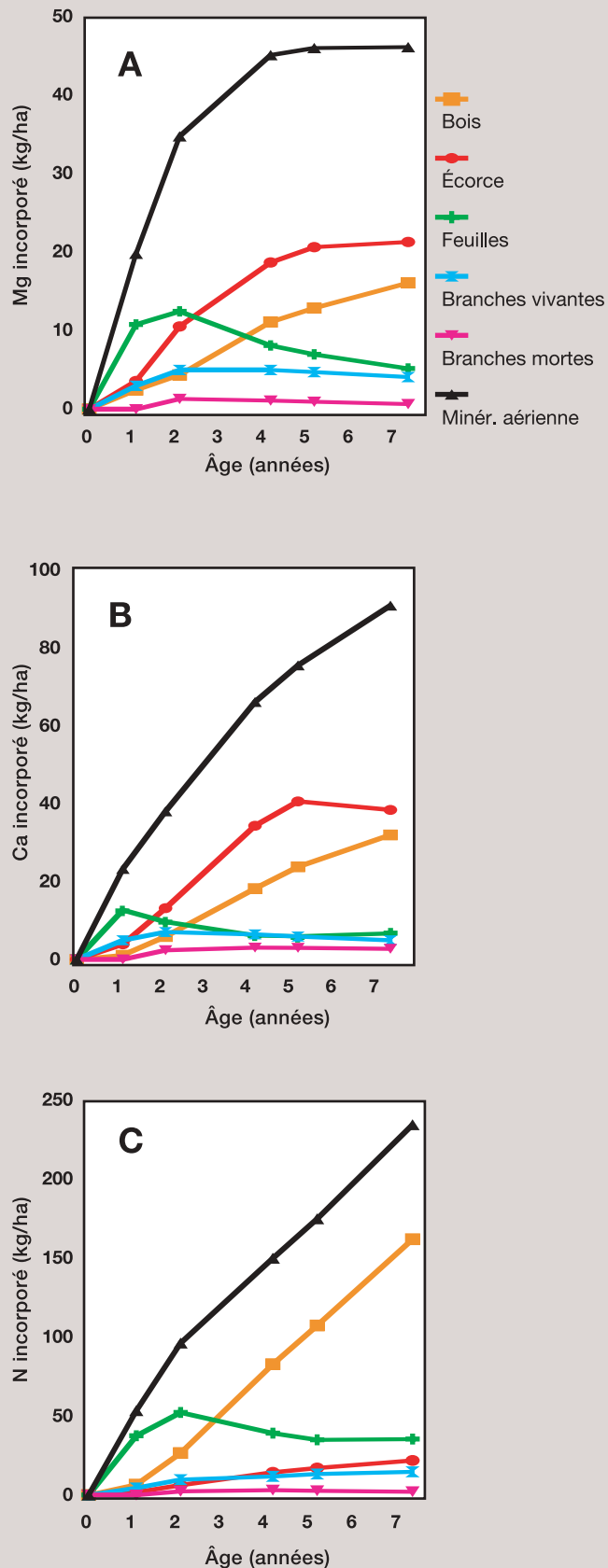


Figure 4. Dynamique d'incorporation de Mg (A), Ca (B) et N (C) dans la partie aérienne des arbres au cours de la rotation d'eucalyptus.

Dynamics of Mg (A), Ca (B) and N (C) incorporation in the aerial parts of the trees during one eucalyptus rotation.

son des pluies proportionnellement à l'accumulation de biomasse totale, alors que la dynamique d'incorporation de K est semblable à celle de la biomasse vivante et atteint un maximum quatre mois après le brûlis (figure 5). Le comportement de N, P et Mg dans la savane est intermédiaire. Environ 80 % de la minéralomasse d'azote dans la savane est incorporée dans le système racinaire (100 kg/ha à la fin de la saison des pluies). L'accumulation dans le système racinaire est du même ordre de grandeur que dans la partie aérienne pour P et Ca, alors qu'elle est nettement inférieure pour K et Mg (LACLAU *et al.*, 2002).

Flux d'éléments minéraux en solution

Les dépôts atmosphériques totaux sont difficiles à évaluer précisément dans les écosystèmes forestiers, en raison de difficultés méthodologiques pour quantifier les dépôts secs (LINDBERG *et al.*, 1986). Dans cette étude, les dépôts humides ont été mesurés plus précisément que les dépôts secs, mais l'utilisation de plusieurs types de collecteurs de précipitations brutes a permis d'évaluer leur ordre de grandeur.

Les dépôts atmosphériques représentent un apport important d'éléments nutritifs dans les sols fortement altérés du Congo (tableau I). Ce flux représente 4,9 kg/ha/an de N ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$), 0,3 kg/ha/an de P, 2,8 kg/ha/an de K, 3,5 kg/ha/an de Ca et 1,4 kg/ha/an de Mg dans la savane. Dans la plantation d'*Eucalyptus*, les apports atmosphériques sont environ deux fois supérieurs, en raison de dépôts importants d'aérosols dans la canopée. Les dépôts secs ont plusieurs origines dans cette zone :

- des aérosols marins sont responsables des dépôts importants de Na^+ et Cl^- , en raison de la proximité de la mer (10 km) ;
- une influence tout au long de l'année de sources biogènes (principalement le brûlis de biomasse) est révélée, en particulier par les fortes

concentrations de N-NO_3^- , N-NH_4^+ , K^+ et S-SO_4^{2-} dans la pluie ;
 ■ les fortes concentrations de Ca^{2+} dans les précipitations proviennent, dans une large mesure, du dépôt de poussières venant des déserts africains (LACAUX *et al.*, 1992).

Un prélèvement foliaire de N dans les eaux de pluie a été observé dans la plantation d'*Eucalyptus* et dans la savane. Ce comportement a été fréquemment décrit dans des écosystèmes forestiers où la disponibilité de N est faible (notamment LINDBERG *et al.*, 1986 ; ADAMS, ATTIWILL, 1991). Les phénomènes de récrétion (mise en solution d'éléments minéraux dans les tissus foliaires au contact des eaux de pluie) sont très faibles dans cette plantation, alors qu'ils sont importants pour P, K et Mg dans la savane.

Bien que la décomposition de la litière au sol libère des quantités importantes d'éléments nutritifs dans la plantation d'*Eucalyptus*, les flux de solutés dans les pluviessivats évoluent peu au cours de la traversée de la litière au sol. Un réseau dense de racines fines adhérant aux fragments en cours de décomposition dans la litière au sol permet un prélèvement très rapide d'éléments nutritifs par les arbres (photo 10). Un comportement analogue a été constaté en forêt dense tropicale, où l'essentiel de la biomasse de racines fines se trouve au-dessus du sol minéral, dans une couche de litière et d'humus. Un recyclage direct d'éléments entre la litière au sol et les racines a en particulier été démontré par des études isotopiques (^{32}P) en forêt amazonienne (HERRERA *et al.*, 1978). Ce phénomène permet de limiter les pertes d'éléments nutritifs par drainage dans ces milieux pauvres.

Les pertes de $\text{P-H}_2\text{PO}_4^-$, K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} par drainage profond ont été très limitées en plantation comme en savane (moins de 1,5 kg/ha/an), ainsi que les pertes de N (environ 3,5 kg/ha/an). Les pertes les plus élevées par drainage ont concerné S-SO_4^{2-} dans les deux écosystèmes et Na^+ en savane (5-6 kg/ha/an).

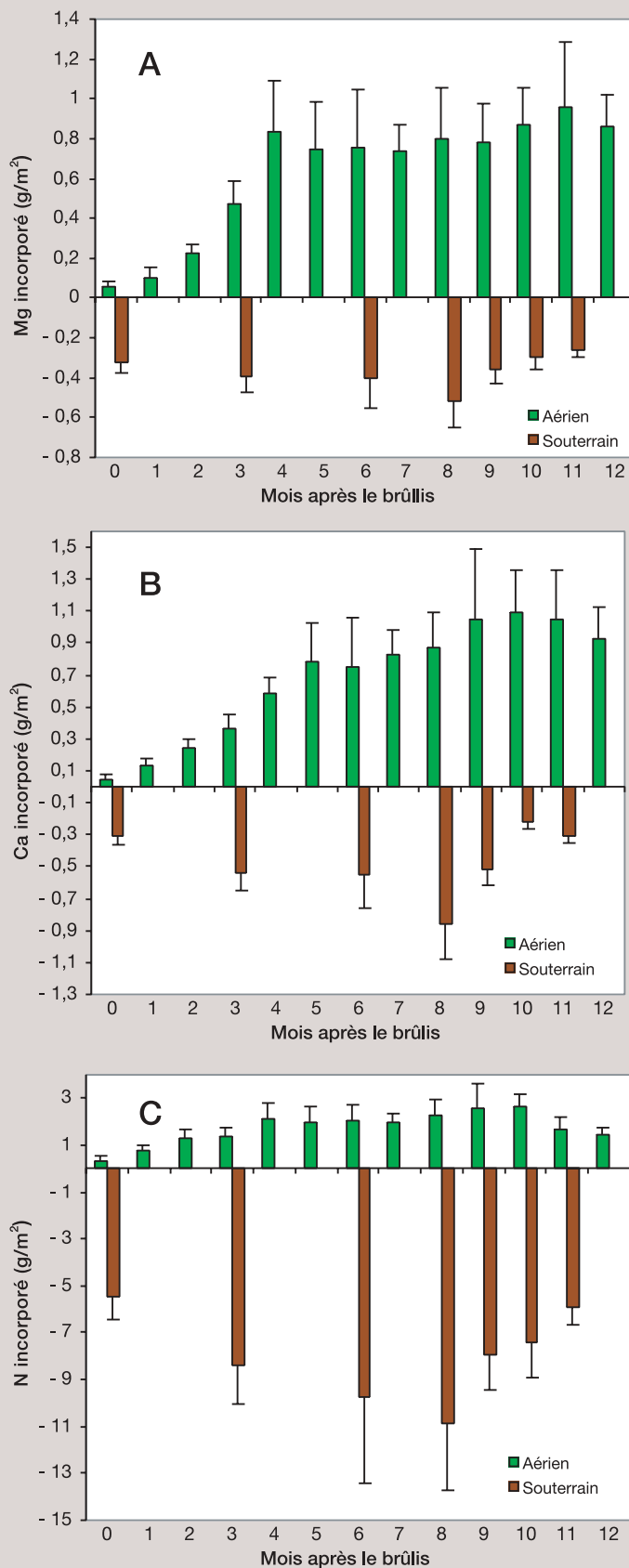


Figure 5.

Dynamique d'incorporation de Mg (A), Ca (B) et N (C) dans les parties aérienne et souterraine de la savane entre deux brûlis annuels.

Dynamics of Mg (A), Ca (B) and N (C) incorporation in the aerial and subterranean parts of the native savannah between two yearly burn-offs.

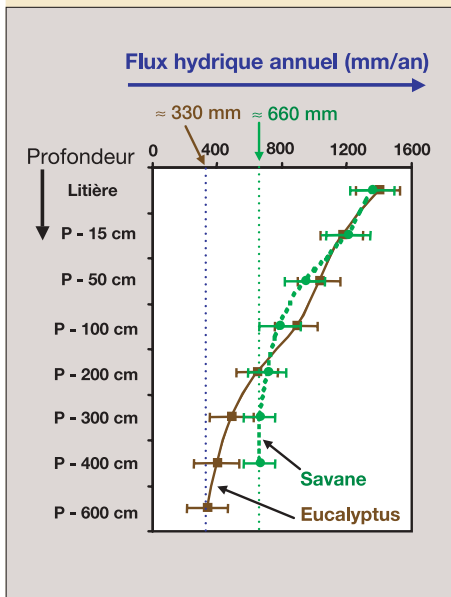


Figure 6.

Flux hydrique (moyennes et écarts-types au cours des trois années de suivi) calculé à partir du modèle hydrique. *Water flows (averages and standard deviations during the three study years) calculated from the water model.*

Influence de la plantation sur l'alimentation des nappes phréatiques

La différence d'évapotranspiration entre la plantation d'*Eucalyptus* et la savane originelle conduit à un flux d'eau drainé en profondeur deux fois plus faible, en moyenne, dans la plantation que dans la savane au cours des trois années de suivi (figure 6). Une recharge des nappes phréatiques a néanmoins eu lieu sous *Eucalyptus*, puisque le drainage moyen calculé à 6 m de profondeur est de 330 mm/an. La pluviosité de la période d'observation a cependant été supérieure à la pluviosité moyenne à Pointe-Noire depuis 50 ans et il serait intéressant de simuler les flux de drainage profond sur une longue période, afin d'évaluer leur variabilité interannuelle. Les études écophysiologicals en cours, au Congo, permettront de modéliser plus précisément la consommation hydrique de ces plantations et son influence sur l'alimentation des nappes phréatiques.

Par principe de précaution, nous recommandons que la mise en place de grandes surfaces de plantations d'*Eucalyptus* fasse l'objet d'un aménagement raisonné du territoire, afin



Photo 3.

Description pédologique lors du creusement d'une fosse pour la collecte des solutions du sol (profondeur de 6 m). *Pedological description made while digging a trench to collect soil solutions (6 m in depth).*
Photo D. Gelhaye.



Photo 4.

Creusement de fosses pour l'installation des lysimètres dans la plantation d'*eucalyptus*. *Digging trenches to install lysimeters in the eucalyptus plantation.*
Photo J.-P. Laclau.

de préserver des surfaces importantes de végétation naturelle au sein du massif d'*Eucalyptus*. Toutefois, les faibles différences de composition chimique des solutions du sol entre les deux formations végétales suggèrent que la plantation d'*Eucalyptus* n'induit pas d'altération particulière des nappes phréatiques. Au Congo, les 42 000 ha du massif d'*Eucalyptus*

sont morcelés dans un périmètre d'environ 200 000 ha, les forêts naturelles et certaines zones de savane autour des villages n'ayant pas été plantées. Compte tenu de la pluviosité annuelle élevée dans cette zone, le massif d'*Eucalyptus* ne présente pas de risque important de dégradation de la ressource hydrique autour de Pointe-Noire.

**Photo 5.**

Gouttière en Pvc et capteur pyramidal en plexiglas pour la collecte des apports atmosphériques.
PVC guttering and cone-shaped plexiglas collector to measure atmospheric deposition.
 Photo J.-P. Laclau.

Transferts internes dans les arbres

Les transferts internes d'éléments dans les arbres sont très limités la première année de croissance (en raison des faibles chutes de litière), puis relativement stables pour chaque élément à partir de la deuxième année (figure 7). Ils ont respectivement représenté environ 40, 5, 25, - 5 et 2 kg/ha/an de N, P, K, Ca et Mg à partir de la deuxième année de croissance.

L'essentiel des remobilisations de N, P et K dans les arbres a lieu au cours de la sénescence des feuilles tout au long de la rotation. Une accumulation de Ca dans les tissus âgés a, en revanche, été observée. Ce phénomène peut être à l'origine de l'incorporation régulière de cet élément dans la biomasse des arbres, tout au long de la rotation (figure 4).

**Photo 6.**

Gouttières en Pvc installées sous la canopée pour la collecte des pluviollessivats.
PVC guttering installed under the canopy to collect rain-leached material.
 Photo J.-P. Laclau.

Les transferts internes totaux dans les différents compartiments des arbres ne représentent que 4-8 % des besoins en N, P et K au cours de la première année de croissance, alors qu'ils couvrent environ 30-50 % de ces besoins entre la deuxième année de croissance et la fin de la rotation. Pour Mg, ils ne représentent, par contre, qu'une faible part des besoins annuels (< 20 %) tout au long de la rotation. Pour Ca, les transferts internes négatifs indiquent que le prélèvement au sol de cet élément doit être supérieur à la quantité accumulée dans les tissus produits au cours de l'année.

Flux d'éléments dans les chutes de litière

Les chutes de litière représentent environ 6 t/ha/an de matière sèche dans les plantations entre les âges de 2 et 7 ans, soit presque dix fois plus que dans la savane, où elles ne sont que d'environ 0,7 t/ha chaque année. Ce phénomène est très limité en savane, en raison du brûlis annuel qui élimine l'essentiel de la nécromasse.

Les chutes de litière renferment des quantités importantes d'éléments nutritifs dans la plantation d'*Eucalyptus* et représentent un flux majeur d'éléments dans cet écosystème. Environ 50 kg/ha de N, 4 kg/ha de P et K ainsi que 20 kg/ha de Ca et Mg retournent au sol chaque année avec les chutes de litière. Des valeurs du même ordre ont été mesurées dans d'autres plantations d'*Eucalyptus* au Congo (BERNHARD-REVERSAT *et al.*, 2001).

Bilans entrées-sorties

Bien que le fonctionnement minéral de la plantation d'*Eucalyptus* soit différent de celui de la savane (transferts internes, chutes de litière, récréation, dépôts secs, volatilisation lors du brûlis...), les écarts des bilans entrées-sorties de P, K, Ca et Mg sont faibles entre les deux écosystèmes (tableau II). L'influence de la plantation sur les stocks de P, K, Ca et Mg biodisponibles dans les sols a donc été modérée au cours de la première rotation.

Le bilan azoté est plus contrasté. Des études isotopiques ont montré que la savane couvre cette zone depuis environ 3 000 ans (TROUVÉ, 1992). Les bilans entrées-sorties devraient donc être globalement équilibrés pour expliquer le maintien de cette savane malgré les faibles stocks d'éléments nutritifs dans les sols. L'espèce légumineuse nodulée (*Eriosema erici-rosenii* R.E. Fries), présente dans toutes les savanes côtières du Congo, pourrait avoir un rôle important dans l'équilibre du cycle de N. En effet, une entrée de N par fixation biologique d'environ 20 kg/ha/an est nécessaire pour équilibrer le bilan de N dans le sol. La fixation non symbiotique de N semble négligeable dans la savane congolaise étudiée ici (LE MER, ROGER, 2001), mais la forte biomasse de l'espèce légumineuse (800 à 1 000 kg/ha en fin de saison des pluies) pourrait expliquer une entrée

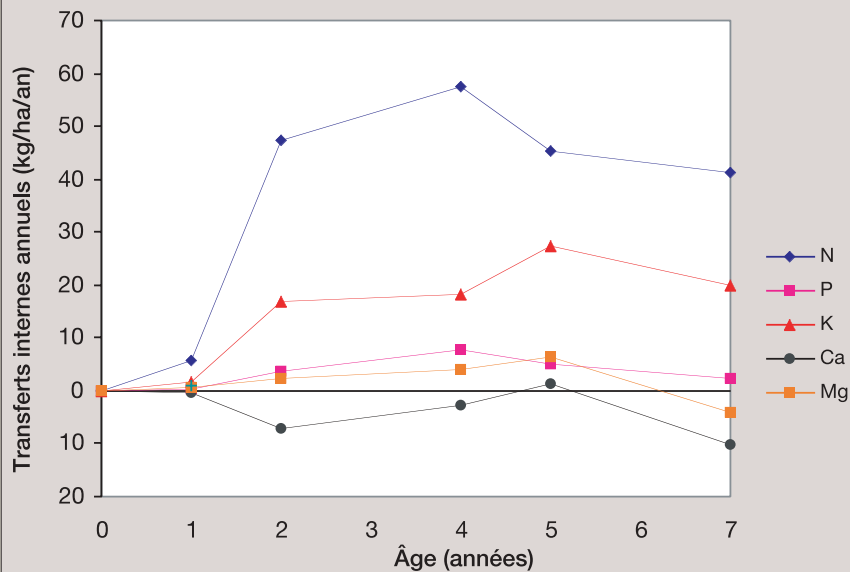


Figure 7.

Dynamique des transferts internes d'éléments minéraux dans les arbres au cours de la rotation d'eucalyptus.

Dynamics of internal translocation of minerals in trees during one eucalyptus rotation.

de N dans l'écosystème suffisante pour compenser les pertes. Les bilans des autres éléments sont pratiquement équilibrés si on tient compte des incertitudes de détermination des flux.

Dans l'écosystème d'*Eucalyptus*, le bilan de N est nettement déficitaire (environ -165 kg/ha au cours de la rotation de futaie), alors que les bilans sont pratiquement équilibrés pour P, K, Ca et Mg. Les essais de fertilisation montrent de façon cohérente une faible réponse des arbres à l'apport de P, K, Ca ou Mg en fertilisation, alors que les fertilisations azotées doivent augmenter au cours des rotations successives pour maintenir la production (BOUILLET *et al.*, 2001).

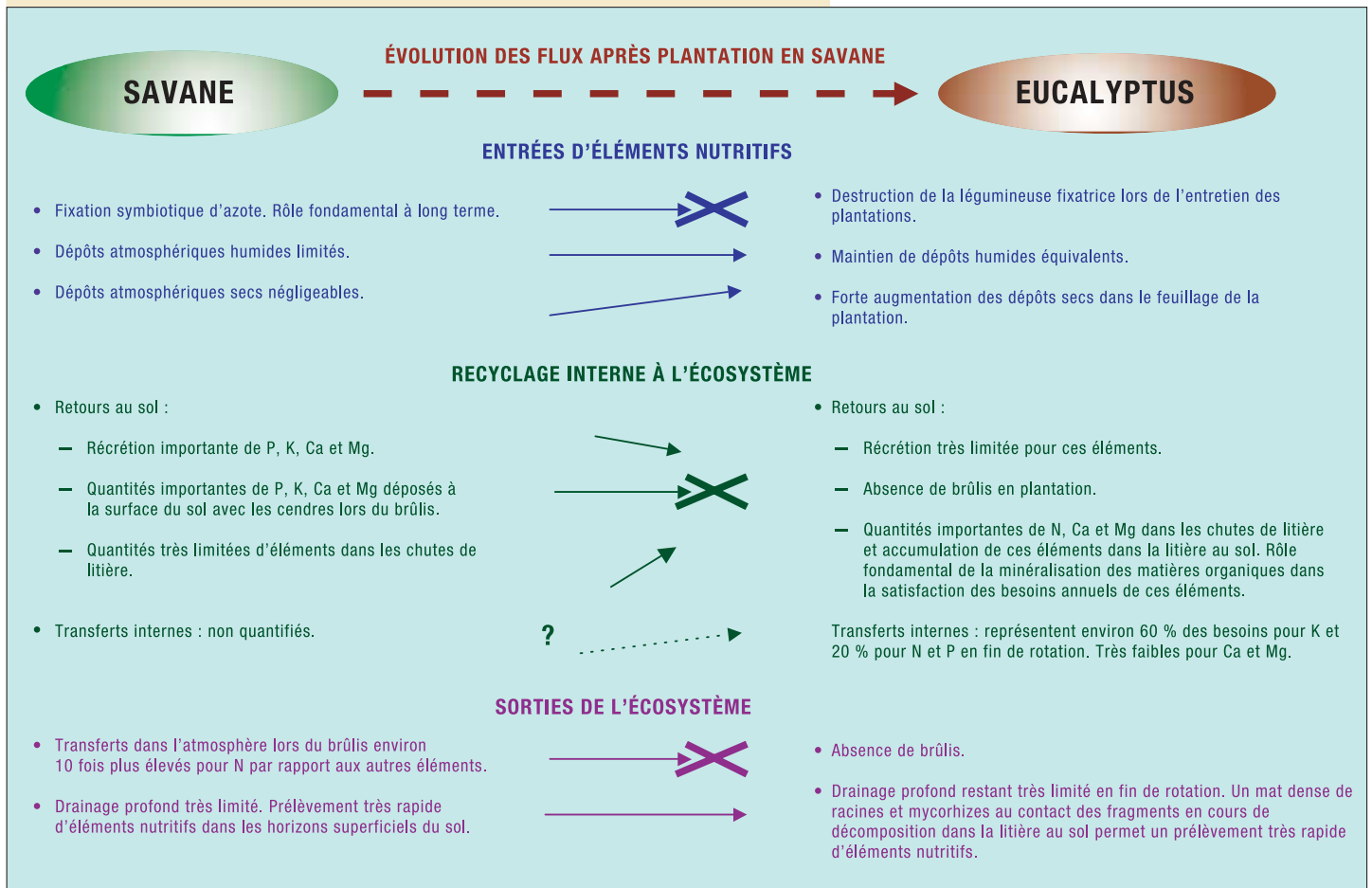


Figure 8.

Évolutions des cycles biogéochimiques après boisement de l'écosystème de savane par des plantations d'eucalyptus, au Congo. Une flèche ascendante représente un flux d'éléments qui croît après le boisement, une flèche descendante un flux décroissant et une flèche horizontale un flux stable ; une croix un flux qui devient nul après la plantation.

Change in biogeochemical cycles after afforestation of the savannah ecosystem with eucalyptus, in the Congo. Upward arrows show increased flows after afforestation, downward arrows show decreased flows and horizontal arrows show stable flows; crosses show where flows ceased after afforestation.

Tableau II.
Bilans entrées-sorties annuels moyens (en kg/ha/an) pour la première rotation d'*Eucalyptus* et pour la savane (valeurs entre parenthèses).

	N	P	K	Ca	Mg
Entrées					
Dépôts atmosphériques	10,1 (4,9)	0,7 (0,3)	6,5 (2,8)	8,2 (3,5)	3,3 (1,4)
Fertilisation	5,1 (0)	2,2 (0)	6,9 (0)	0 (0)	0 (0)
Altération des minéraux	-	-	ε	ε	ε
Fixation symbiotique	(21) ⁽²⁾				
Total	15,2 (25,9)	2,9 (0,3)	13,4 (2,8)	8,2 (3,5)	3,3 (1,4)
Sorties					
Drainage profond	11,9 (3,9)	0,55 (0,10)	2,2 (0,8)	1,9 (0,6)	1,8 (0,3)
Ruissellement	0,0 (0,0)	0,07 (0,02)	0,2 (0,1)	0,4 (0,2)	0,1 (0,0)
Exploitation ⁽¹⁾	27	4,1	9,9	5,0	3,2
Brûlis annuel	(22)	(2,0)	(2,4)	(3,0)	(2,7)
Total	38,9 (25,9)	4,7 (2,1)	12,3 (3,3)	7,3 (3,8)	5,1 (3,0)
Bilan					
	- 23,7 (0 ?)	- 1,8 (- 1,8)	1,1 (- 0,5)	0,9 (- 0,3)	- 1,8 (- 1,6)

⁽¹⁾ Les peuplements d'*Eucalyptus* sont exploités tous les sept ans au Congo. Le bois de pâte est écorcé dans les parcelles et le bois de feu (diamètre > 2 cm) commercialisé.

⁽²⁾ Calculé pour équilibrer le bilan de N en savane.

La destruction d'*Eriosema erici-rose-nii* dans les plantations d'*Eucalyptus* lors des entretiens réduit l'entrée de N dans cet écosystème, ce qui risque de limiter la nutrition azotée des arbres à moyen terme. En effet, ce déficit du bilan entrées-sorties de N est élevé par rapport au stock d'environ 2 t/ha de N présent dans l'horizon A₁ (0-50 cm), où l'essentiel de la minéralisation a lieu. De plus, environ 30 % de la matière organique dans cet horizon provient d'une forêt naturelle préexistante qui a été remplacée par la savane il y a environ 3 000 ans (Trouvé, 1992). Cette matière organique de forêt a été datée au ¹⁴C à - 8 000 ans, ce qui indique une très

forte résistance à la dégradation. La minéralisation de cette matière organique étant extrêmement lente, elle n'intervient pratiquement pas dans la nutrition azotée des *Eucalyptus*.

Les pertes par drainage ont été estimées sommairement pendant la phase de croissance juvénile des *Eucalyptus*. Néanmoins, les valeurs prises en compte aboutissent à une perte moyenne par drainage profond, au cours de la rotation, de 11,9 kg/ha/an (tableau II), cohérente avec les informations disponibles dans la littérature. De plus, une imprécision dans l'estimation de ce flux n'est pas susceptible de modifier les conclusions concernant l'in-

fluence de la plantation sur la fertilité minérale des sols. Les pertes par drainage profond après l'exploitation n'ont pas été prises en compte dans les bilans établis ici au cours de la première rotation. Or il s'agit d'une période critique pour le maintien des stocks d'éléments nutritifs dans les sols (Dyck *et al.*, 1994) et les pertes par drainage au cours des premiers mois après l'exploitation devront être estimées précisément pour établir des bilans entrées-sorties plus précis couvrant plusieurs rotations.

Les deux formations végétales étudiées ont été plantées récemment : la savane avec le même clone d'*Eucalyptus*, la futaie a été exploitée

**Photo 7.**

Collier de collecte des écoulements le long du tronc.

Ring used to collect fluids running down tree trunks.

Photo J.-P. Laclau.

Modifications des cycles biogéochimiques induites par la plantation

La quantification des principaux flux révèle que les grands principes de circulation des éléments nutritifs dans l'écosystème originel de savane sont maintenus après le boisement en *Eucalyptus*. En effet, les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs dans ces plantations restent très conservatoires des stocks biodisponibles dans les sols, avec :

- un prélèvement très rapide dans les horizons superficiels, conduisant à des pertes par drainage extrêmement limitées ;
- un recyclage intense des éléments nutritifs par les cycles biologique et biochimique ;
- une incorporation limitée dans la biomasse par rapport aux besoins annuels.

L'incorporation minérale en plantation est nettement supérieure à celle mesurée en savane, car la production primaire nette est plus élevée. Toutefois, l'efficacité d'utilisation de K, Ca et Mg pour la production de bois est remarquablement élevée chez le clone étudié (1 000 à 2 000 kg de matière sèche produite par kilogramme d'élément incorporé dans les arbres) par rapport aux valeurs indiquées dans la littérature pour d'autres plantations d'*Eucalyptus* (LACLAU *et al.*, 2000).

Dans le détail, les mécanismes mis en œuvre varient néanmoins fortement entre les deux écosystèmes. Le cycle de N est, en particulier, plus ouvert sur l'extérieur en savane, avec des pertes importantes lors du brûlis, probablement compensées par la fixation symbiotique d'une légumineuse (figure 8). Les principales évolutions après le boisement proviennent des pratiques sylvicoles qui détruisent l'espèce légumineuse de savane, lors des entretiens herbicides, et évitent les feux. Le mode de croissance des plantations d'*Eucalyptus* génère en outre des modifications fortes de certains flux. Des retours au sol importants d'éléments nutritifs avec les chutes de litière apparaissent en particulier après le boisement, et un apport non négligeable d'éléments nutritifs est observé dans cet écosystème, grâce à un « effet filtre » du feuillage des arbres sur les aérosols.

Bien que les *Eucalyptus* soient exotiques au Congo, ils se révèlent très efficaces pour produire de fortes biomasses, en valorisant les ressources minérales disponibles en faibles quantités dans les sols. La décomposition rapide des litières indique une bonne adaptation de la faune du sol et des micro-organismes au changement brutal de matériel végétal. La minéralisation de la litière au sol d'*Eucalyptus* a un rôle crucial dans la satisfaction des besoins nutritifs des arbres en fin de rotation.

et replantée avec un clone plus productif. L'étude des cycles biogéochimiques dans les deux peuplements est en cours. Elle permettra une quantification précise des pertes par drainage pendant la phase de croissance juvénile des plantations, en comparant le boisement en savane avec la replantation après une rotation d'*Eucalyptus*. Des bilans entrées-sorties fiables pourront ainsi être calculés en intégrant l'ensemble de la rotation de futaie et l'influence de l'exploitation.

Des expérimentations d'introduction d'un sous-étage de légumineuses fixatrices d'azote dans les plantations d'*Eucalyptus* sont en cours. Cette technique semble prometteuse pour réduire le déficit du bilan entrées-sorties d'azote dans ces sols et donc le coût des apports d'engrais nécessaires pour maintenir la production. La sylviculture de ces plantations mélangées devra être optimisée afin de limiter la compétition interspécifique pour l'accès aux autres éléments nutritifs et à l'eau.

**Photo 8.**

Dispositif lysimétrique installé dans le sol de savane.

Lysimetric apparatus installed in savannah soil.

Photo J.-P. Laclau.

Conclusion

Des informations importantes ont été obtenues pour améliorer la gestion du massif d'*Eucalyptus* de Pointe-Noire, tant pour la sylviculture de chaque parcelle que pour l'aménagement global du massif. Des modifications des pratiques sylvicoles seront nécessaires, afin de maintenir la capacité des sols de la région de Pointe-Noire à assurer durablement une production soutenue de bois d'*Eucalyptus*.

À l'échelle de la parcelle

Les bilans d'éléments nutritifs pendant la première rotation sont relativement équilibrés pour P, K, Ca et Mg, à la fois dans la plantation et dans la savane. Par contre, un déficit important du bilan entrées-sorties de N a été mis en évidence dans l'écosystème d'*Eucalyptus*. Cette étude fournit en particulier les indications suivantes :

- La fertilisation en azote de ces plantations est indispensable. Compte tenu des très faibles stocks de N dans les sols, le maintien de fortes productions de bois d'*Eucalyptus* nécessitera d'équilibrer les bilans entrées-sorties de cet élément au cours des rotations

successives. Le déficit d'environ 160 kg/ha de N au cours de la première rotation d'*Eucalyptus* devra donc être compensé par des fertilisations.

- Les pertes d'éléments nutritifs par lessivage sont très faibles au sein des plantations d'*Eucalyptus* et de la savane, en raison notamment d'un prélèvement rapide par les racines dans les eaux gravitaires. Les risques d'altération de la qualité des eaux des nappes phréatiques sont donc très limités, à condition que les apports d'engrais soient dosés en fonction des besoins des arbres.

- La sylviculture doit limiter au maximum les exportations d'éléments nutritifs hors de cet écosystème. Les bilans entrées-sorties d'éléments nutritifs montrent, en particulier, l'importance de l'écorçage des troncs en parcelle et d'un délai réduit entre l'exploitation des peuplements et la replantation suivante, pour maintenir la fertilité des sols.

- Des plantations mixtes d'*Eucalyptus* et d'espèces légumineuses pourraient être une voie prometteuse pour limiter les apports de N minéral, qui constituent un des coûts majeurs de gestion des peuplements.

À l'échelle du massif

Les diverses expérimentations ont montré que la plantation d'*Eucalyptus* diminue la recharge des nappes phréatiques par rapport à la végétation initiale de savane. En revanche, le boisement n'a pas modifié sensiblement la composition chimique des eaux de surface. Ce type de plantation doit donc être réalisé dans le cadre d'un aménagement du territoire évitant la plantation de blocs monospécifiques d'*Eucalyptus* de plusieurs milliers d'hectares. Les plantations mises en place au Congo ont maintenu de grandes surfaces de végétation naturelle (savanes et forêts-galeries) au sein du massif d'*Eucalyptus*. Compte tenu de la pluviosité annuelle importante (autour de 1 200 mm), ces plantations ne constituent pas un risque majeur de dégradation de la ressource hydrique.

Les bilans entrées-sorties montrent clairement que les plantations d'*Eucalyptus* bénéficient d'une fertilité du sol en azote héritée de l'écosystème originel de savane. Cette tendance pourrait être générale pour la plupart des plantations tropicales gérées en courtes rotations en l'absence d'espèces fixatrices d'azote. En effet, les apports d'azote par les dépôts atmosphériques et les fertilisations sont, en général, nettement inférieurs aux quantités exportées par la biomasse récoltée. Des études complémentaires seraient intéressantes, pour vérifier dans d'autres situations que la réponse des arbres à la fertilisation azotée est fortement dépendante du temps écoulé depuis le remplacement de l'écosystème d'origine par des plantations ainsi que des caractéristiques de la matière organique du sol de l'écosystème initial.



Photo 9.

Dispositif de collecte des solutions du sol prélevées par des bougies poreuses dans les horizons superficiels du sol de la plantation d'eucalyptus.

Apparatus used to collect soil solutions running into porous cups in the superficial soil horizons of the eucalyptus plantation.

Photo J.-P. Laclau.

Références bibliographiques

ADAMS M. A., ATTIWILL P. M., 1991. Nutrient balances in forests of northern Tasmania. 1. Atmospheric inputs and within-stand cycles. *Forest Ecology and Management*, 44 : 93-113.

BERNHARD-REVERSAT F., LOUMETO J. J., LACLAU J.-P., 2001. Litterfall, litter quality and decomposition changes with eucalypt hybrids and plantation age. *In* : Bernhard-Reversat F. (éd.). Effect of exotic tree plantations on plant diversity and biological soil fertility in the Congo savanna : with special reference to Eucalypts. Bogor, Indonésie, Center for International Forestry Research, p. 23-29.

BOUILLET J.-P., SAFOU-MATONDO R., LACLAU J.-P., RANGER J., 2001. Changes in N-P-K fertilisation over successive rotations in Eucalypt plantations in the Congo. *In* : Developing the eucalypt of the future, Valdivia, Chili, 11-15 septembre 2001, IUFRO, 42.

DYCK W. J., COLE D. W., COMERFORD N. B., 1994. Impacts of forest harvesting on long-term site productivity. Londres, Royaume-Uni, Chapman and Hall, 371 p.

HERRERA R., MERIDA T., STARK N., JORDAN C. F., 1978. Direct phosphorus transfer from leaf litter to roots. *Naturwissenschaften*, 65 : 208-209.

LACAUX J.-P., DELMAS R., KOUADIO G., CROS B., ANDREAE M. O., 1992. Precipitation chemistry in the Mayombé forest of equatorial Africa. *Journal of Geophysical Research*, 97 : 6195-6206.

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, 148 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.

LACLAU J.-P., ARNAUD M., BOUILLET J.-P., RANGER J., 2001. Spatial distribution of *Eucalyptus* roots in a deep sandy soil in the Congo : relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. *Tree Physiology*, 21 : 129-136.

LACLAU J.-P., SAMA-POUMBA W., NZILA J. D., BOUILLET J.-P., RANGER J., 2002. Dynamics of nutrient accumulation in a Congolese savanna submitted to annual fires. *Acta Oecologica*, 23 : 41-50.

LE MER J., ROGER P., 2001. N₂ fixation assessment in soil and litter samples from Congolese savanna and eucalypt plantations under various managements. *In* : Bernhard-Reversat F. (éd.). Effect of exotic tree plantations on plant diversity and biological soil fertility in the Congo savanna : with special reference to Eucalypts. Bogor, Indonésie, Center for International Forestry Research, p. 39-41.

LINDBERG S. E., LOVETT G. M., RICHTER D. D., JOHNSON D. W., 1986. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science*, 231 : 141-145.

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, université d'Orléans, France, 112 p.



Photo 10.

Matelas dense de racines fines situées au-dessus du sol minéral, au contact des fragments de litière au sol en cours de décomposition.

Dense mattress of fine roots above the mineral soil layer and in contact with fragments of decaying leaf litter on the soil.

Photo J. Ranger.

Synopsis

EUCALYPTUS AND SOIL FERTILITY IN THE CONGO

Jean-Paul LACLAU, Jacques RANGER, Jean de Dieu NZILA, Jean-Pierre BOUILLET, Dominique GELHAYE, Philippe DELEPORTE

Clonal eucalyptus plantations

have been established since 1978 on savannah soils along the coastal plains of the Congo. The short-rotation forestry methods used in these plantations causes high nutrient removal in biomass every 7 years, on soils with very poor chemical fertility (Ferralic Arenosol). Sustainable management of these short-rotation forests depends on enhancing stand productivity (constant genetic improvement) and on maintaining the soil's production capacity over the long term (sustainability).

Using age series to quantify flow dynamics

A age series method was used to quantify the dynamics of the main biological flows through the first rotation after afforestation: nutrient content in trees, uptake from the soil, internal retranslocation, litter fall and litter decay. Comparisons of the biogeochemical cycles were made between a clonal eucalyptus stand aged 6 - 9 years (stands are usually harvested around 7 years) and an adjacent savannah ecosystem. Atmospheric deposition, canopy exchanges and drainage through the soil through the full rooting depth (6 m) were measured over three years in both ecosystems. Current nutrient budgets were compared for the eucalyptus stand at the end of the rotation and for the native savannah ecosystem. Budgets were also calculated for the entire eucalyptus rotation, using a hypothesis based on nutrient flows in gravitational solutions during the early growth of the stands.

Changes since afforestation

Considerable changes in the ecosystem's mineral cycle occurred after afforestation. The dynamics of accumulation in the eucalyptus stands varied for the different elements: whereas P and Ca were incorporated in proportion to the accumulation of dry matter, Mg was essentially incorporated during the early growth period. The curve for N and K lay in between. Dry deposition of Na⁺, Ca²⁺ and Cl⁻, as well as water and nutrient uptake, were significantly higher in the eucalyptus stand than in the savannah. Atmospheric deposition amounted to 4.9, 0.3, 2.8, 3.5 and 1.4 kg/ha/year for N, P, K, Ca and Mg respectively in the savannah, and were about twice as high in the eucalyptus stand, owing to dry deposition in the canopy. Large amounts of litter fall resulted in the accumulation of a forest floor in the eucalyptus stand. In contrast, dead material was burned every year during the dry season in the savannah.

High production was achieved in this plantation of an alien species thanks to effective nutrient recycling both in the plant (internal retranslocation) and in the soil. Despite large amounts of nutrients returning to the soil in leaf litter in the eucalyptus stand, nutrient concentrations in the solutions were not greatly enhanced through the forest floor. A dense network of fine roots adhering to decaying organs allowed quick nutrient uptake and improved mineral recovery while reducing mineral losses from the ecosystem. External inputs (atmospheric deposition and fertiliser) and the mineralisation of organic matter played a crucial role in the supply of nutrients to the trees in this highly eroded soil. Weeding in the plantations destroyed one leguminous species, which was responsible for N input of around 20 kg/ha/year by symbiotic fixation in the savannah.

Fertilisation needs to be adjusted

Fertilisation needs to be reconsidered in the light of these results. Quantification of the main nutrient flows in the eucalyptus plantations throughout stand rotation highlighted the changing requirements for each nutrient during tree growth. This information allows fertiliser inputs to be adjusted to stand requirements. Input-output budgets during the first rotation of eucalyptus plantations quantify the impact of afforestation on stocks of available nutrients in savannah soils. Although these budgets need to be refined to take account of drainage losses after stand harvesting, they show that the impact of afforestation is low on soil stocks of P, K, Ca and Mg. These budgets are consistent with the poor response of trees to fertilisation with these minerals. In contrast, the N budget deficit is large in these plantations (-165 kg/ha during stand rotation) as compared to N stocks in the A₁ soil horizon (about 2 t ha⁻¹). This feature is of concern for the sustainability of N nutrition in eucalyptus plantations and shows that high N inputs are necessary to balance the N budget. Field trial results are consistent with these budgets and show that N fertiliser inputs have to increase over successive rotations. Trials to establish an N-fixing understorey in eucalyptus stands are in progress. This technique holds out promise as a way of reducing the cost of N fertilisation in these plantations, provided that competition for other nutrients and water remains low.