

Biodisponibilité d'éléments minéraux dans les sols des plantations d'eucalyptus de la zone côtière de la République du Congo

Fanny Diane Armelle BIKINDOU¹, Hugues-Yvan GOMAT^{1,2,3}, Martin Darius BENGO³, Gilles GUILOU⁴, Laurent SAINT-ANDRE⁴, Jacques RANGER⁴,

Résumé

Cette étude examine la biodisponibilité des éléments minéraux dans les sols du littoral de la République du Congo, où coexistent des dispositifs expérimentaux et de plantations industrielles d'eucalyptus. Malgré une relative homogénéité physico-chimique des sols, des variations marquées de productivité sont observées, suggérant un rôle déterminant de la matière organique (MO), principale source de nutriments dans ces arénosols ferralitiques à très faible capacité d'échange cationique (CEC). L'objectif est d'évaluer la biodisponibilité de plusieurs éléments essentiels (NH_4^+ , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) sur deux sites contrastés avec trois traitements de gestion des rémanents à Kondi (BL0, BL3, BL4) et trois niveaux naturels de fertilité à Kissoko. La méthode repose sur l'utilisation de résines échangeuses d'ions, enfouies à 5 et 10 cm et incubées trois semaines pour simuler le prélèvement racinaire. Après récupération, les ions adsorbés sont désorbés à l'HCl et analysés par spectrométrie, colorimétrie et chromatographie. Les résultats ont permis de comprendre la dynamique nutritionnelle des plantes dans ces sols tropicaux pauvres et d'identifier des indicateurs fiables de fertilité, utiles pour optimiser la gestion des résidus et renforcer la durabilité des plantations.

Mots-clés : Biodisponibilité, matière organique, résines échangeuses d'ions, éléments minéraux, fertilité des sols.

Abstract

Bioavailability of Mineral Elements in the Soils of Eucalyptus Plantations in the Coastal Zone of the Republic of Congo

This study examines the bioavailability of mineral elements in the coastal soils of the Republic of Congo, where experimental setups and industrial eucalyptus plantations coexist. Despite the relative physico-chemical homogeneity of these soils, marked variations in productivity are observed, suggesting a determining role of organic matter (OM), the main source of nutrients in these ferralitic arenosols with very low cation exchange capacity (CEC). The objective is to assess the bioavailability of several essential elements (NH_4^+ , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) at two contrasting sites, with three residue-management treatments at Kondi (BL0, BL3, BL4) and three natural fertility levels at Kissoko. The method is based on the use of ion-exchange resins, buried at 5 and 10 cm and incubated for three weeks to simulate root uptake. After recovery, the adsorbed ions are desorbed with HCl and analyzed by spectrometry, colorimetry and chromatography. The results provide insight into the nutritional dynamics of plants in these nutrient-poor tropical soils and help identify reliable fertility indicators, useful for optimizing residue management and strengthening the sustainability of the plantations.

Keywords: Bioavailability, organic matter, ion-exchange resins, mineral elements, soil fertility.

1. Centre de Recherche sur la Durabilité et la Productivité des Plantations Industrielles, BP 1291, Pointe-Noire, République du Congo
2. Laboratoire de Télédétection et Ecologie Forestière, École Normale Supérieure, Université Marien N'Gouabi, BP 69, Brazzaville, République du Congo
3. École Normale Supérieure, Université Marien N'Gouabi, BP 69, Brazzaville, République du Congo
4. Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers (BEF), 54280 Champenoux, INRAE Grand Est Nancy, France
5. Contact auteur : bikindoufanny@yahoo.fr

Introduction

La productivité contrastée observée dans les plantations d'eucalyptus établies sur les sols pauvres des savanes de Pointe-Noire demeure en grande partie inexpliquée (Nzobaldila, 2002 ; Nzila *et al.*, 2002 ; Saint-André *et al.*, 2007). Pourtant, il est admis que le rendement, d'un écosystème forestier est contrôlé par un ensemble complexe de facteurs dont les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol, les conditions climatiques, ainsi que la topographie.

Des études pédologiques menées dans cette région ont mis en évidence une faible variabilité des propriétés physiques et chimiques des sols (Jamet, 1975 ; Malvos & Ranger, 1983 ; Barthès, 1995 ; Trouvé, 1992 ; Nzila, 1996). Les différences localisées observées ont été attribuées au relief, générant des phénomènes d'érosion ou d'accumulation (colluvionnement), ou à la nature du couvert végétal influençant la formation d'humus et la teneur en matière organique (Malvos & Ranger, 1983 ; Chauvière & Vigneron, 1987 ; Barthès, 1995 ; Nzila, 1996).

Face à une relative homogénéité des caractéristiques des sols, il devient nécessaire d'explorer d'autres facteurs pour expliquer les variations de croissance des plantations. Des essais conduits par le CIFOR, testant différents niveaux d'apports de résidus d'exploitation (BL0 à BL5), ont révélé un gradient de productivité corrélé à l'enrichissement du sol en matière organique (Saint-André *et al.*, 2007). Ceci souligne le rôle central de la matière organique, tant comme source directe d'éléments minéraux que son influence sur la dynamique des nutriments dans le type de sols sableux de Pointe-Noire.

Cependant, les analyses de la matière organique dans ces essais montrent une complexité des réponses : malgré un doublement des apports de résidus, aucun enrichissement significatif en azote total n'a été observé (D'Annunzio, 2008 ; Laclau *et al.*, 2009). Ces observations suggèrent que probablement d'autres mécanismes, tels que le recyclage via le système racinaire ou l'activation de la minéralisation par la microfaune du sol, pourraient expliquer ces variations

(Recous *et al.*, 1998 ; Harmand *et al.*, 2003). Notons toutefois que la fixation symbiotique de l'azote reste très limitée dans ces écosystèmes à cause de la rareté des Fabaceae.

Sous climat tropical, et plus particulièrement dans les savanes du Congo, la fertilité des sols repose majoritairement sur la dynamique de la matière organique et sur les processus de décomposition assurant le recyclage rapide des nutriments. En contexte d'arénosols ferralitiques, les minéraux altérables sont rares, ce qui confère à la matière organique un rôle central dans la nutrition minérale des plantes (Nzila *et al.*, 2001).

Ainsi, la gestion durable des plantations forestières implique une surveillance continue de la qualité des sols à travers des indicateurs fiables de fertilité. Cette dernière repose sur trois composantes interdépendantes : (i) physique, pour la structure et la gestion de l'eau, (ii) chimique, pour la disponibilité et l'équilibre des nutriments, et (iii) biologique, liée à l'activité microbienne et à la minéralisation (Barber, 1984 ; Bonneau, 1994 ; Soltner, 2005 ; Genot *et al.*, 2009).

Dans cette optique, la présente étude vise à évaluer quelques indicateurs chimiques de fertilité des sols. L'identification de différences significatives dans la disponibilité des nutriments du sol permettra d'expliquer la variabilité de productivité observée à travers l'estimation de la biodisponibilité des principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) et anions (NO_3^-) par l'utilisation de résines échangeuses d'ions. Les expérimentations ont été faites sur deux sites : Kondi sur trois modalités du dispositif CIFOR (BL0, BL4, BL3) et Kissoko sur trois placettes à indices de fertilité contrastés ayant reçu des fertilisants (N, P, K).

2. Matériel et méthodes

2.1 Matériel

2.1.1 Sites d'étude

Les plantations d'eucalyptus étudiées sont situées sur le littoral de la République du Congo, autour de 4° de latitude Sud et 12° de longitude Est (Figure 1). L'étude a été conduite dans deux zones localisées au nord de Pointe-Noire :

- Kondi (4°55'48,6"S ; 11°91'36,8"E), site expérimental du Centre de Recherche sur la Durabilité des Plantations Industrielles (CRDPI) ;
- Kissoko (4°45'51"S ; 11°59'21"E), unité de gestion du partenaire industriel EFC MagAlloy.

Le relief de cette région est faiblement accidenté, et seules les zones planes ou à pente modérée (< 12 %) ont été mises en plantation. Le climat est de type équatorial de transition (Jamet & Rieffel, 1976) ; à Pointe-Noire, la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 1190 mm et la température moyenne avoisine 25 °C, avec de faibles variations saisonnières (< 5 °C).

Les études pédologiques menées dans les savanes reboisées du littoral (Jamet, 1975 ; Malvos & Ranger, 1983 ; Nzila, 1996) montrent une faible variabilité physico-chimique des sols dont la fertilité est généralement limitée. Le paramètre le plus discriminant est la profondeur des horizons, notamment celle de l'horizon A1, identifiée comme un bon indicateur de la productivité des plantations d'eucalyptus (Malvos & Ranger, 1983 ; Bouillet *et al.*, 2000).

Dans les deux zones, les peuplements étudiés appartiennent au clone d'Eucalyptus E.PF1 1-141, garantissant la comparaison des sites et traitements.



Figure 1 : Massif de Eucalyptus dans le littoral congolais

2.1.2 Dispositifs expérimentaux : essai CIFOR à Kondi et parcelles industrielles de Kissoko

L'étude repose sur deux dispositifs complémentaires situés au nord de Pointe-Noire et permettant d'explorer un gradient de fertilité comparable. À Kondi, ce gradient est créé expérimentalement par la gestion différenciée des rémanents, tandis qu'à Kissoko il s'exprime naturellement à travers des indices de fertilité contrastés. Dans les deux cas, les peuplements étudiés appartiennent au même clone d'Eucalyptus (E.PF1 1-141), ce qui permet une comparaison directe entre sites.

a) Dispositif CIFOR à Kondi : un gradient expérimental de fertilité

À Kondi, l'essai CIFOR fait partie du réseau international sur la gestion des rémanents. Il a été installé après une première rotation d'eucalyptus dans la savane ayant reçu une fertilisation initiale de 13,8 kg N ha⁻¹, 13,8 kg P ha⁻¹ et 22,3 kg K ha⁻¹. Le dispositif est un bloc complet randomisé comprenant quatre répétitions. Chaque parcelle couvre 0,24 ha, avec une surface utile de 0,15 ha (120 arbres).

Sept traitements de gestion des rémanents ont été mis en place (Bouillet *et al.*, 2000), allant de l'élimination totale de la matière organique (BL0) au maintien quasi intégral des résidus (BL4), en passant par des modalités intermédiaires (BL1, BL2, BL3). Pour cette étude, trois traitements représentatifs du gradient de fertilité ont été retenus :

- BL0 : fertilité faible (pas de rémanents)
- BL4 : fertilité moyenne (pratique sylvicole standard, résidus conservés)
- BL3 : fertilité élevée (apports maximaux de rémanents)

Dans chaque traitement, une placette de 28 arbres a été délimitée pour le suivi des variables étudiées.

b) Parcelles industrielles de Kissoko : un gradient naturel de fertilité

À Kissoko, trois parcelles industrielles ont été sélectionnées

en fonction de leur indice de fertilité (Hlim). Cet indice de fertilité (Hlim) constitue un indicateur du potentiel de production des peuplements forestiers. Il est déterminé à partir de la croissance en hauteur dominante et, dans cette étude, calculé à l'aide du modèle E-Dendro spécifiquement calibré pour le massif étudié (Saint-André *et al.*, 2002, Bikindou *et al.*, 2012) :

- K8504 : Hlim = 28 m, correspondant à la parcelle K0 (fertilité faible).
- K8505 : Hlim = 31 m, correspondant à la parcelle K1 (fertilité intermédiaire).
- K8506 : Hlim = 37 m, comprenant deux placettes notées K21 et K22 (fertilité élevée).

Quatre placettes, comparables à celles du dispositif CIFOR en densité et en superficie, ont été installées afin de permettre une comparaison rigoureuse entre les niveaux de fertilité des deux sites.

c) Un gradient de fertilité comparable entre les deux sites

Ainsi, Kondi et Kissoko présentent des gradients de fertilité analogues, exprimés différemment mais convergents :

- gradient expérimental à Kondi ($BL0 < BL4 < BL3$)
- gradient naturel à Kissoko ($K0 < K1 < K21$ et $K22$)

Cette complémentarité permet d'évaluer conjointement l'effet de la gestion des rémanents et des variations naturelles de fertilité sur la biodisponibilité des éléments minéraux dans les plantations d'eucalyptus du littoral congolais.

2.2 Méthodes

2.2.1 Préparation des résines au laboratoire : régénération

Les échanges d'ions ont été évalués à l'aide de deux types de résines :

- La résine cationique (RC), Amberlite IRN-77, initialement saturée en H^+ . Elle présente une capacité d'échange de $4,25 \text{ cmolc}\cdot\text{g}^{-1}$ de résine sèche et un taux d'humidité d'environ 55 %.
- La résine mixte (RM), Amberlite IRN-150, constituée d'un mélange de résine cationique saturée en NH_4^+ et de résine anionique saturée en OH^- . Sa capacité d'échange est de $190 \text{ cmolc}\cdot\text{L}^{-1}$ pour la fraction NH_4^+ et de $120 \text{ cmolc}\cdot\text{L}^{-1}$ pour la fraction OH^- . Le taux d'humidité varie de 49 à 55 % pour la partie cationique (H^+) et de 54 à 60 % pour la partie anionique (OH^-).

Le choix de ces résines a été guidé par les éléments à analyser, en particulier les cations (NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) et l'anion $N-NO_3^-$.

L'activation des sites d'échange a été réalisée par trois cycles successifs de percolation avec une solution de $NaCl$ 1N, afin de saturer respectivement les résines cationique et mixte en Na^+ et Cl^- .

Pour chaque type de résine, trois colonnes, contenant 500 g de résine ont été régénérées soit au total, 6 colonnes. Chaque colonne a reçu 5 L de solution $NaCl$ 1N, percolée goutte à

goutte pendant 24 heures. Après chaque cycle de percolation, les résines ont été rincées à l'eau déminéralisée à raison de 50 L par colonne jusqu'à élimination d'excès du chlore et du sodium. Cela a été contrôlée par l'ajout de quelques gouttes de nitrate d'argent 1N dans un aliquote de résine régénérée.

Le choix d'une saturation en Na^+ plutôt qu'en H^+ repose sur plusieurs considérations à savoir :

- (i) Le Na^+ n'est pas un ion d'intérêt dans cette étude et contribue peu à la nutrition des eucalyptus.
- (ii) En tant que cation monovalent, il est faiblement retenu sur les sites d'échange, facilitant les échanges avec les ions du sol (Soltner, 2005 ; Bertrand et Gigou, 2000).
- (iii) Une saturation en H^+ aurait pu acidifier le milieu, altérer la microflore du sol et réduire l'activité microbienne

2.2.2 Incubation in situ

a) Mise en place des résines

Sur chaque site d'étude des placettes expérimentales de 28 arbres chacune ont été installée dont 3 placettes à Kondi (CIFOR) et 4 placettes à Kissoko soit 7 placettes au total. Chaque placette correspond à un niveau du gradient de fertilité naturel et artificiel.

Dans chaque placette, deux types de sacs de résines (cationique et mixte) ont été enfouis à deux profondeurs : 5 cm et 10 cm, à l'aide d'une tarière racinaire de 7,5 cm de diamètre. Les sacs ont été espacés de 0,75 m les uns des autres, et de 1 m entre les deux profondeurs. Au total, 140 sacs ont été installés (70 cationiques et 70 mixtes).

Chaque sac en nylon ($7 \times 7 \text{ cm}$) contenait 20 g de résine humide (soit 10 g de résine sèche) et 20 g de billes de verre pour favoriser la percolation de l'eau du sol. Les sacs ont été incubés sur le terrain pendant trois semaines en période pluvieuse.

Après incubation, les sacs ont été retirés et conservés dans des glacières avec des pains de glace afin d'inhiber toute activité biologique ou réaction chimique, jusqu'au traitement au laboratoire.

Au laboratoire, les sacs ont été lavés à l'eau déminéralisée pour éliminer les débris végétaux et les particules de sol. Les résines ont ensuite été séparées des billes de verre par tamisage, puis conservées humides dans des bocaux à -18°C , en attendant les extractions chimiques.

b) Désorption

La désorption a été effectuée par la méthode dite batch, impliquant plusieurs cycles pour atteindre un rendement de désorption théorique de 99%. Pour cela, il a été utilisé une solution d'acide chlorhydrique 1N, choisie pour la forte affinité du proton H^+ avec les sites d'échange, permettant une désorption efficace des cations.

La solution HCl 1N a été préparée en diluant 83 ml de HCl concentré (12 N) dans 1 litre d'eau déminéralisée (soit 415 ml pour 5 l de solution). À chaque cycle, 10 ml de HCl 1N ont été ajoutés à la résine. Une fois agité pendant 5 minutes, le mélange a été laissé au repos pendant une heure. La solution

récupérée par filtration a ensuite été analysée.

c) Analyse des solutions

Après l'incubation, les résines récoltées ont été nettoyées à l'eau. Et ensuite 5 extractions à l'HCl 1N ont été faites sur chaque échantillon. Les éléments suivants ont été dosés des extraits : N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺. Les cations (NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique. L'azote ammoniacal a été quantifié par spectrocolorimétrie après neutralisation de la solution. Les nitrates (NO₃⁻) ont été mesurés par chromatographie ionique.

Un indice de biodisponibilité (Ib) par élément a été estimé à partir de la formule suivante :

$$Ib \text{ (mg)} = \sum_{i=1}^5 X_i \quad \text{Où } X_i = \text{Somme des 5 extractions d'un échantillon (mg).}$$

$$Ib = \sum X_a + X_b + X_c + X_d \quad i=1$$

Où X a, Xb, Xc, Xd = respectivement IbMg²⁺, IbCa²⁺, IbK⁺, IbN-NH₄⁺.

3-Traitements statistiques

Les données ont été analysées à l'aide de la procédure GLM du logiciel SAS (version 9). Les différences entre traitements ont été testées au moyen de comparaisons de moyennes selon le test de Bonferroni. Les relations entre les indices de biodisponibilité et les variables explicatives, notamment l'indice de fertilité, ont été explorées au moyen de modèles de régression linéaire, permettant d'évaluer la force et la significativité des associations observées. Les coefficients de détermination (R^2) et les valeurs de probabilité (p) ont été utilisés pour apprécier la qualité de l'ajustement et déterminer la pertinence statistique des relations mises en évidence.

4. Résultats

4.1. Variation de l'indice de biodisponibilité (Ib) en fonction de la profondeur

Les valeurs de l'indice de biodisponibilité (Ib) en fonction des profondeurs sur les sites d'études de Kondi et de Kissoko sont présentées respectivement dans les Figures 2a et 2b pour les deux types de résine (cationique RC et mixte RM). Elles montrent que sur les deux sites, les Ib de Mg²⁺, Ca²⁺, N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻, ne sont pas significativement différentes ($p < 0.05$) entre les deux profondeurs (5 cm et 10 cm). Sauf pour K⁺ dans la résine mixte à Kissoko qui est présent en quantité plus importante à 5 cm. Dans le reste de l'analyse, nous avons donc regroupé les deux profondeurs pour tester les effets des traitements (CIFOR) et fertilité naturelle (Kissoko).

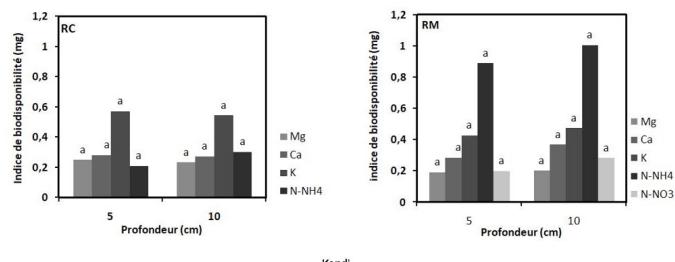


Figure 2a : Variation de l'indice de biodisponibilité des éléments minéraux en fonction de la profondeur à Kondi

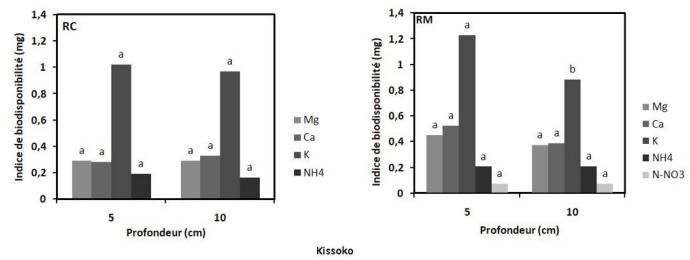


Figure 2b : Variation de l'indice de biodisponibilité des éléments minéraux en fonction de la profondeur à Kissoko

4.2.- La variation de l'indice de biodisponibilité (Ib) en fonction des traitements

L'influence des traitements sur l'indice de biodisponibilité a été étudiée sur les deux sites. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1 en fonction du type de résines.

4.2.1 Résine cationique

Sur le site de Kondi, les indices de biodisponibilité (Ib) moyens présentés dans le Tableau 1, sont de 0,24 ($\pm 0,06$), 0,27 ($\pm 0,01$), 0,55 ($\pm 0,23$), 0,25 ($\pm 0,12$) respectivement pour Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺ et N-NH₄⁺. Les valeurs tendent à augmenter du traitement BL0 vers BL4 et BL3 (Figure 1a). L'analyse de variance effectuée (Tableau 2) ne révèle aucun effet significatif du traitement pour les éléments Mg²⁺, Ca²⁺ et N-NH₄⁺. Tandis que l'effet est significatif pour K⁺ ($p < 0,05$), avec un Ib nettement plus faible dans le traitement BL0 (0,27 $\pm 0,06$) que dans les traitements BL4 (0,66 $\pm 0,27$) et BL3 (0,70 $\pm 0,22$) (Figure 3a).

Sur le site de Kissoko, les Ib moyens (Tableau 1) sont de 0,29 ($\pm 0,08$), 0,31 ($\pm 0,06$), 0,99 ($\pm 0,15$), 0,18 ($\pm 0,10$) respectivement pour Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺ et N-NH₄⁺. L'analyses de variance (Tableau 2) montrent que les Ib de Mg²⁺, Ca²⁺ et K⁺ ne présentent aucune différence significative entre les placettes ($p > 0,05$), contrairement à N-NH₄⁺ (Figure 3b), pour lequel un effet significatif est observé ($p < 0,05$). La valeur la plus élevée de l'Ib est observée en K1 et les plus faibles en K0, K21 et K22 (Figure 3b).

4.2.2 Résine mixte

A Kondi, les Ib moyens (Tableau 1) atteignent 0,19 $\pm 0,09$ pour Mg²⁺, 0,32 $\pm 0,06$ pour Ca²⁺, 0,44 $\pm 0,18$ pour K⁺, 0,92 $\pm 0,70$ pour N-NH₄⁺ et 0,23 $\pm 0,12$ pour N-NO₃⁻. L'analyse de variance (Tableau 2) montre que le traitement exerce un effet significatif sur Mg²⁺, K⁺, N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ ($p < 0,05$), mais pas sur Ca²⁺ ($p > 0,05$), comme illustré dans la Figure 3a. Les indices sont plus faibles en BL0, tandis que BL4 et BL3 présentent les valeurs les plus élevées. Une particularité concerne N-NH₄⁺, avec des valeurs similaires en BL0 et BL4, mais significativement supérieures en BL3.

À Kissoko, les indices de biodisponibilité moyens (Tableau 1) sont de 0,41 ($\pm 0,36$), 0,45 ($\pm 0,6$), 1,05 ($\pm 0,21$), 0,21 ($\pm 0,16$), 0,07 ($\pm 0,03$) respectivement pour Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺ et N-NH₄⁺, N-NO₃⁻. Les analyses de variances (Tableau 2) révèlent un effet significatif de la placette (Figure 3b) pour Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺ et N-NO₃⁻ ($p < 0,05$), avec des Ib plus faibles en K0 et plus élevés en K21 et K22. Comme dans la résine cationique, N-NH₄⁺ présente un comportement atypique, avec une valeur maximale en K1.

Tableau 1 : Indices de biodisponibilité moyens par site, traitement et placette

Type Résine	Site	Traitement	Mg2+	Ca2+	K+	N-NH4+	N-NO3-
Mixte (RM)	Cifor	BL0	0.08 (0.04)	0.24 (0.09)	0.23 (0.05)	0.22 (0.14)	0.08 (0.05)
	Cifor	BL4	0.25 (0.16)	0.36 (0.08)	0.57 (0.27)	0.91 (0.64)	0.32 (0.19)
	Cifor	BL3	0.24 (0.04)	0.36 (0.21)	0.52 (0.08)	1.63 (0.63)	0.29 (0.09)
	% Moy. Cifor		0.19 (0.09)	0.32 (0.06)	0.44 (0.18)	0.92 (0.70)	0.23 (0.12)
	Kissoko	K0	0.31 (0.19)	0.28 (0.15)	0.78 (0.27)	0.23 (0.19)	0.06 (0.03)
	Kissoko	K1	0.22 (0.09)	0.40 (0.23)	1.01 (0.25)	0.34 (0.22)	0.09 (0.03)
	Kissoko	K21	0.12 (0.05)	0.16 (0.04)	1.27 (0.33)	0.02 (0.01)	0.03 (0.01)
	Kissoko	K22	0.95 (0.09)	1.15 (0.06)	1.15 (0.06)	0.15 (0.09)	0.11 (0.04)
Cationique (RC)	% Moy. Kissoko		0.41 (0.36)	0.45 (0.06)	1.05 (0.21)	0.21 (0.16)	0.07 (0.03)
	Cifor	BL0	0.17 (0.14)	0.27 (0.16)	0.27 (0.06)	0.12 (0.03)	
	Cifor	BL4	0.28 (0.15)	0.29 (0.09)	0.66 (0.27)	0.25 (0.16)	
	Cifor	BL3	0.26 (0.08)	0.26 (0.05)	0.70 (0.22)	0.38 (0.39)	
	% Moy. Cifor		0.24 (0.06)	0.27 (0.01)	0.55 (0.23)	0.25 (0.12)	
	Kissoko	K0	0.34 (0.17)	0.38 (0.23)	0.98 (0.24)	0.15 (0.06)	
	Kissoko	K1	0.18 (0.12)	0.24 (0.19)	1.10 (0.30)	0.34 (0.25)	
	Kissoko	K21	0.28 (0.07)	0.26 (0.12)	1.12 (0.53)	0.10 (0.15)	
	Kissoko	K22	0.37 (0.20)	0.34 (0.19)	0.78 (0.33)	0.10 (0.15)	
	% Moy. Kissoko		0.29 (0.08)	0.31 (0.07)	0.99 (0.15)	0.18 (0.10)	

Tableau 2 : Probabilités (p-values) associées aux effets des facteurs étudiés dans l'analyse de variance

	Analyse de variance						régression	
	site	traitement	Profondeur d'enfouissement		fertilité	Type de résine		
			profondeur	d'enfouissement				
Mg2+	0.085	0,0008		0.558	0.095	0.543	0.20	
Ca2+	0.386	0,023		0.827	0.6412	0.280	0.07	
K+	<0,001	<,0001		0.058	<,0001	0.911	0.65	
N-NH4	0,067	0,0022		0,4909	0,0074	0,151	0,11	
N-NO3	0,0002	0,0013		0,52	0,0013		0,24	
N-minéral	0,0006	0,0016			0,0004		0,61	
Test Bonferroni								
	Traitement							
	BL0	BL3	BL4	K8504	K8505	K85061	K85062	
Mg2+	b	b	b	b	b	b	a	
Ca2+	ab	ab	ab	ab	b	b	a	
K+	c	bc	bc	ab	ab	a	ab	
N-NH4	b	a	ab	b	ab	b	b	
N-NO3	c	ab	a	c	c	c	bc	
N-minéral	abc	a	ab	abc	c	c	c	
Indice de fertilité								
	BL0	BL3	BL4	K8504	K8505	K85061 (K21)	K85062 (k22)	
Mg2+	20,2	24,4	23,6	27	32	36	36	
Ca2+	a	a	a	a	a	a	a	
K+	d	cd	bcd	abc	ab	a	a	
N-NH4	ab	a	ab	ab	ab	b	b	
N-NO3	b	a	a	b	b	b	b	
N-minéral	ab	a	a	ab	b	b	b	
site								
	profondeur						Type de résine	
	CIFOR	Kissoko	5	10	cationique	Mixte		
Mg2+	a	a	a	a	a	A		
Ca2+	a	a	a	a	a	A		
K+	b	a	a	a	a	A		
N-NH4	a	a	a	a	a	A		
N-NO3	a	b	a	a	a	A		
N-minéral	a	b	a	a	a	A		

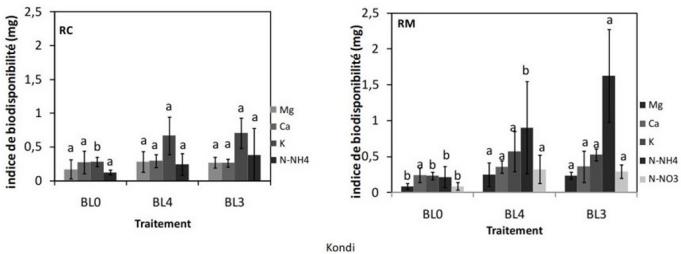


Figure 3a: Indice de biodisponibilité de Mg2+, Ca2+, K+, N-NH4+ et N-NO3 en fonction des traitements sur les résines cationique et mixte à Kondi

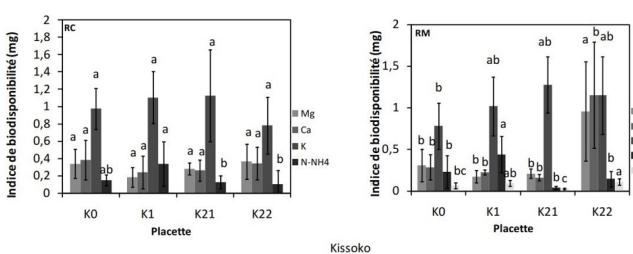


Figure 3b : Indice de biodisponibilité de Mg2+, Ca2+, K+, N-NH4+ et N-NO3 en fonction des placettes sur les résines cationique et mixte à Kissoko

4.3-Relations entre l'indice de biodisponibilité et indice de fertilité

Parmi les éléments étudiés, seul l'indice de biodisponibilité du potassium présente une corrélation significative et positive avec l'indice de fertilité : $r^2 = 0,57$; $p < 0,05$ dans la résine cationique (Figure 4 a).

À Kondi, l'Ibc est compris entre 0,04 et 0,16 cmolc kg⁻¹ et augmente aussi avec l'indice de fertilité. La tendance est la même à Kissoko, où l'Ibc varie de 0,07 à 0,18 cmolc kg⁻¹. Il suit globalement le gradient de fertilité, malgré la faible valeur observée dans la placette K21 (Figure 4).

Aucun lien significatif n'a été mis en évidence pour les autres éléments N-NH4⁺ et N-NO3⁻, Mg²⁺, Ca²⁺), comme l'illustrent les Figures 5, 6, 7 et 8.

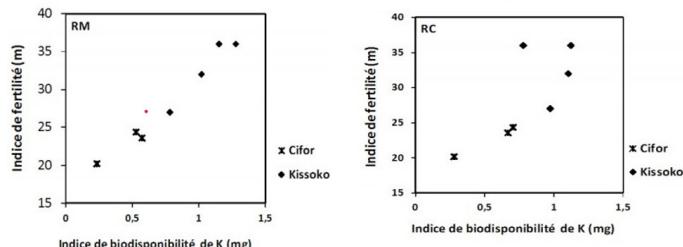


Figure 4 : Relation entre l'indice de biodisponibilité K +et l'indice de fertilité dans la résine cationique et mixte

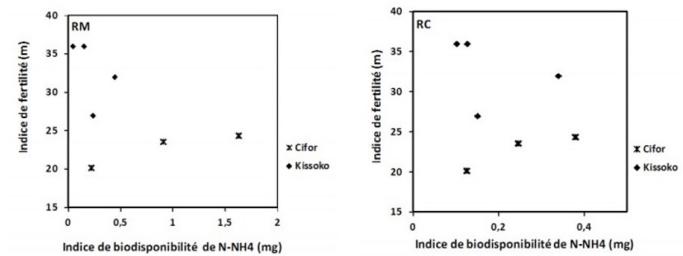


Figure 5 : Relation entre l'indice de biodisponibilité N-NH4+ et l'indice de fertilité dans la résine cationique et dans la résine mixte.

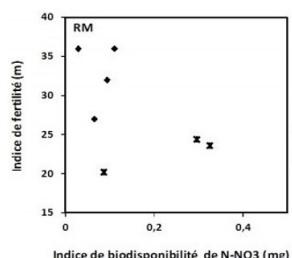


Figure 6 : Relation entre l'indice de biodisponibilité N-NO3- et l'indice de fertilité dans la résine mixte

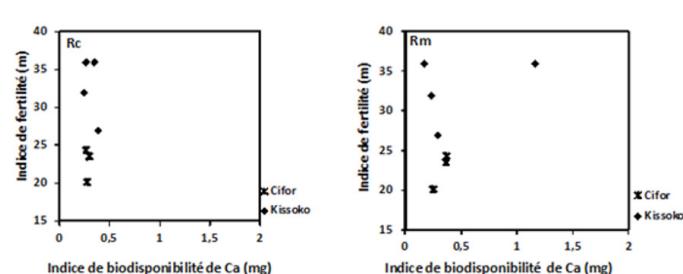


Figure 7 : Relation entre l'indice de biodisponibilité Ca2+ et l'indice de fertilité dans la résine cationique et mixte

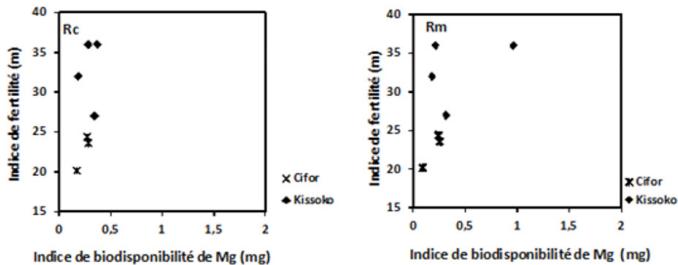


Figure 8 : Relation entre l'indice de biodisponibilité Mg²⁺ et l'indice de fertilité dans la résine cationique et mixte

4. Discussion

4.1. Influence de la profondeur et du site

L'absence de différence significative entre les résines enterrées à 5 cm et 10 cm pour la biodisponibilité de Mg²⁺, Ca²⁺, N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ reflète l'homogénéité des horizons superficiels dans ces sols sableux très peu différenciés. Les propriétés chimiques du sol entre 0 et 30 cm de profondeur varient peu dans ces environnements. Ces horizons superficiels sont caractérisés par une faible capacité d'échange cationique, une texture uniforme et une activité biologique limitée, comme déjà montré dans les plantations d'eucalyptus du littoral congolais (Saint-André *et al.*, 2008 ; Nzila *et al.*, 2002, 2004). Les résines ont ainsi été exposées, aux deux profondeurs, à des conditions édaphiques très semblables (humidité, température, teneur en matière organique), expliquant la similitude des indices de biodisponibilité obtenus.

À Kondi, les traitements BL3 et BL4, pourtant caractérisés par une restitution plus importante de biomasse, n'ont pas entraîné de modification durable des propriétés chimiques des horizons superficiels. Ce résultat est en accord avec ceux des études antérieures conduites sur le dispositif CIFOR, qui montrent que les effets des rémanents sur les cations échangeables du sol (0 - 10 cm) ne sont détectables qu'à court terme, principalement durant la première année suivant la coupe, avant de disparaître rapidement (Laclau *et al.*, 2010). Trois ans après la mise en place des traitements, aucune différence significative n'était observée, ce qui confirme que les sols sableux du plateau littoral présentent une forte capacité de résilience chimique et un retour rapide à un état d'équilibre, même après des modifications importantes du couvert organique.

4.2. Influence des traitements sur la disponibilité des éléments minéraux

L'hypothèse de départ était que la présence de quantités importantes de rémanents (BL3, BL4) ou un niveau élevé de fertilité (K21, K22) aurait une influence sur l'augmentation de la disponibilité des éléments minéraux, contrairement aux faibles quantités de rémanents en (BL0) ou au faible indice de fertilité (K0). Compte tenu des différences de contexte entre les deux sites, les résultats ont été interprétés séparément avant de comparer les deux sites (Kondi et Kissoko).

À Kondi, les résines cationiques n'ont montré aucun effet significatif des traitements sur la disponibilité de Mg²⁺ et de Ca²⁺, tandis qu'un effet net apparaît pour le K⁺, confirmant que l'influence des rémanents sur les cations échangeables disparaît

rapidement après l'installation de la plantation (Laclau *et al.*, 2010). En revanche, les résines mixtes mettent clairement en évidence une disponibilité plus élevée de Mg²⁺, Ca²⁺ et K⁺ dans BL3 et BL4 par rapport à BL0. Ceci révèle l'existence d'un gradient de fertilité directement lié aux quantités de matière organique conservées sur les placettes, en accord avec les travaux de Nzila *et al.* (2001a,b), Deleporte *et al.* (2008) et Laclau *et al.* (2010). Plusieurs autres études conduites dans les plantations tropicales et subtropicales (Gonçalves *et al.*, 2000 ; O'Connell *et al.*, 2000 ; Carlyle, 1993 ; Smethurst & Nambiar, 1990) soulignent également que le maintien des rémanents favorise la nutrition minérale; ce qui confirme le rôle central de la matière organique dans les sols très pauvres, comme démontré au Congo (Nzila *et al.*, 2002, 2004 ; Mareschal, 2010) et dans le réseau CIFOR (Saint-André *et al.*, 2008). Ce rôle essentiel découle du fait que, dans les écosystèmes tropicaux appauvris en éléments minéraux, la fertilité repose principalement sur le recyclage biologique (Mendham *et al.*, 2008 ; Laclau *et al.*, 2009), tandis que l'enlèvement complet des résidus dégrade fortement les conditions biologiques du sol (Gonçalves & Barros, 1999) et réduit la disponibilité des nutriments, particulièrement dans les milieux chauds, humides et oligotrophes (Gonçalves *et al.*, 2004).

À Kissoko, où les pratiques sylvicoles sont homogènes et la quasi-totalité de la matière organique est laissée au sol, les indices de biodisponibilité des cations (Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺) varient néanmoins fortement entre placettes, en particulier avec les résines mixtes qui discriminent nettement les traitements. La disponibilité minérale est maximale en K22 et minimale en K0, reproduisant les contrastes observés à Kondi malgré des apports organiques similaires. Ces différences semblent être liées à des facteurs intrinsèques au site, notamment la variabilité locale des sols liée aux intercalations d'argile ou de graviers (Lee, 1992), la microtopographie contrastée entre zones planes (K22) et zones de pente (K0), l'hétérogénéité spatiale de la répartition des rémanents, ainsi que l'effet des incendies récurrents qui réduisent fortement les stocks de litière et d'éléments nutritifs (jusqu'à 40–50 % selon Deleporte *et al.* (2002)). L'ensemble de ces facteurs contribue probablement aux différences observées sur la disponibilité en éléments minéraux entre les placettes industrielles de Kissoko.

4.3 La comparaison du traitement BL4 du Cifor et les placettes de Kissoko

En condition de sylviculture équivalente, la disponibilité en azote est significativement plus élevée dans BL4 que dans les placettes industrielles de Kissoko, aussi bien avec la résine cationique qu'avec la résine mixte. Cette différence peut s'expliquer par l'âge des peuplements et la quantité de matière organique présente dans les systèmes : BL4 correspond à un peuplement jeune (3 ans) où la litière est abondante et fraîche, favorisant une minéralisation active, comme le montrent les observations faites dans les traitements riches en rémanents (Nzila, 2001 et Nzila *et al.*, 2001 ; Laclau *et al.*, 2010 ; Deleporte *et al.*, 2008). À l'inverse, les placettes de Kissoko, plus âgées (\approx 9 ans), fournissent très peu de litière au sol, limitant la disponibilité en azote minéral, un phénomène

déjà décrit dans les sols tropicaux très pauvres où la matière organique constitue la principale source d'éléments nutritifs (Nzila *et al.*, 2002, 2004 ; Mareschal, 2010 ; Saint-André *et al.*, 2008 ; Laclau *et al.*, 2009).

Pour les autres cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), la résine cationique indique des disponibilités similaires entre BL4 et les placettes K0, K1, K21 et K22, tandis que la résine mixte se distingue clairement K22, dont l'indice de biodisponibilité est plus élevé.

Conclusion

Cette étude visait à développer une méthode simple et opérationnelle d'estimation de la biodisponibilité des éléments minéraux des sols, tout en identifiant les facteurs naturels pouvant expliquer les variations de productivité des plantations d'eucalyptus dans les conditions édapho-climatiques du Congo. Parmi les nutriments étudiés, le potassium apparaît comme l'élément le plus biodisponible, suivi de l'azote, confirmant la capacité des résines échangeuses d'ions à discriminer efficacement des situations de fertilité contrastée. Les résultats montrent également que l'utilisation de la résine mixte, notamment lorsqu'elle est enfouie à une profondeur intermédiaire ou placée au niveau de la litière, constitue une approche particulièrement prometteuse pour quantifier les flux rapides d'éléments nutritifs dans ces systèmes tropicaux.

La comparaison entre les traitements du dispositif CIFOR et les parcelles industrielles de Kissoko met en évidence une forte cohérence entre les indices de fertilité et les indices de biodisponibilité. Dans ces sols sableux extrêmement pauvres, la fertilité repose largement sur la dynamique de la matière organique et sur sa capacité à libérer les nutriments via les processus de minéralisation. L'azote, en particulier, apparaît comme un élément déterminant de la croissance et de la productivité des eucalyptus, ce qui souligne l'importance de maintenir un niveau suffisant de rémanents et de préserver les cycles biologiques pour assurer la durabilité de la production forestière.

Bibliographie

- Barber S.A. (1984). *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*. Wiley-Interscience, New York, 414 p.
- Barthès B. (1995). *Caractérisation morphologique et physico-chimique des sols sur colline de la parcelle d'eucalyptus 84-26 (Hinda, Congo)*. ORSTOM, Montpellier, 35 p..
- Bertrand R., Gigou J., 2000. La fertilité des sols tropicaux. Editions Maisonneuve et Larose, Paris, France. 397p.
- Bikindou FDA, Gomat H. Y. Deleporte P. Bouillet J.P., Moukini R., Mbedi Y., Ngouaka E., Brunet D., Sita S., Diazenza J.B., Voudibio J., Mareschal J., Ranger J., Saint-André L. (2012). Are NIR spectra useful for predicting site indices in sandy soils under Eucalyptus stands in Republic of Congo? *Forest Ecology and Management* 266 (2012) 126–137
- Bonneau M. (1994). Notion de pédoclimat. In Bonneau M. and Souchier B. (Eds.), *Pédologie II. Constituants et propriétés du sol*. Masson, Paris, pp. 485–486.
- Bouillet Jean-Pierre, Nzila J.D., Laclau Jean-Paul, Ranger Jacques. 2000. Effects of site management on *Eucalyptus* plantations in the equatorial zone, on the coastal plains of the Congo. In : Site management and productivity in tropical plantation forests : a progress report. Workshop proceedings. Nambiar E.K.S. (ed.), Tiarks A. (ed.), Cossalter Christian (ed.), Ranger Jacques (ed.). CIFOR. Bogor : CIFOR, 11-20. ISBN 979-87645-2-8 Workshop on Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests. 3, Kerala, Inde, 7 Décembre 1999/11 Décembre 1999.
- Carlyle J.C. (1993). Nutrient management in eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 61, 233–246.
- Chauvière M. and Vigneron P. (1987). *Fertilisation et exportations minérales des plantations clonales d'Eucalyptus à Pointe-Noire*. CIRAD-CTFT, Pointe-Noire, 14 p.
- D'Annunzio R. (2008). *Étude de la dynamique de la matière organique du sol sous plantation clonale d'Eucalyptus au Congo*. Thèse de doctorat, ENGREF/AgroParisTech, 201 p.
- Deleporte P., Laclau J.P. and Kinana A. (2002). *Effet de la variabilité des apports de litière sur le fonctionnement chimique et biologique du sol*. Rapport interne UR2PI, 49 p.
- Deleporte P., Laclau J.P., Nzila J.D., Kazzotti J.G., Marien J.N., Bouillet J.P., Szwaarc M., d'Annunzio R. and Ranger J. (2008). Effects of slash and litter management practices on soil chemical properties and growth of second rotation Eucalyptus in the Congo. In *Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests*. CIFOR, pp. 5–22.
- Genot V., Colinet G., Brahy V. and Bock L. (2009). L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13, 121–138.
- Gonçalves J. L. M., Barros N. F., 1999. Improvement of the site productivity for short rotation plantations in Brazil. *Bosque*, 20:89-106.
- Gonçalves J.L.M., Stape J.L. and Benedetti V. (2000). Responses of eucalypt plantations to silvicultural practices in Brazil. *New Forests*, 22, 19–41.
- Gonçalves J.L.M., Stape J.L., Laclau J.P., Bouillet J.P. and Ranger J. (2004). Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 193, 179–195.
- Harmand J.M., Donfack P. and Forkong Njiti C. (2003). Tree-root systems and herbaceous species characteristics under tree species introduced into grazing lands in Cameroon. *Agroforestry Systems*, 59, 131–140.
- Jamet R. (1975). *Évolution des principales caractéristiques des sols des reboisements de Pointe-Noire*. ORSTOM, Brazzaville, 35 p.
- Laclau J. P., Ranger J., De Moraes Gonçalves J. L., Maquère V., Krusche A.V., Thongo M'Bou A., Nouvellon Y., Saint-André L., Bouillet J.P., De Cassia Piccolo M., Deleporte P., 2009. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and management*, 259 : 1771-1785.

- Laclau J.P., Ranger J., Gonçalves J.L.M., Maquère V., Krusche A.V., M'Bou A.T., Nouvellon Y. and Bouillet J.P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 259, 1771–1785.
- Lee P., 1992. Fertilisation des Eucalyptus au Congo: Etat actuel des connaissances et implications pour les pratiques d'exploitation. CDF, Division Nutrition, Pointe-Noire, 22 p
- Malbos C. and Ranger M. (1983). *Mission d'appui à l'unité d'afforestation industrielle du Congo*. CTFT, Paris, 130 p.
- Mareschal L., Nzila J.D., Turpault M., Ranger J., Laclau J.P., Deleporte P. and Bouillet J.P. (2010). Teneurs en éléments nutritifs dans les sols sableux sous eucalyptus au Congo. *Étude et Gestion des Sols*, 17(1), 23–38.
- Mendham D.S., O'Connell A.M., Grove T.S. and Rance S.J. (2008). Residue management effects on soil carbon and nutrient pools in Eucalyptus plantations. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 2931–2943.
- Nzila J.D. (1996). *Caractérisation des sols du Congo et problèmes d'aménagement des sols*. ENS, Brazzaville, 70 p.
- Nzila J.D., (2001). Caractérisation minéralogique des sols ferrallitiques sableux sous plantation d'Eucalyptus et sous savane naturelle de la région de Pointe-Noire (Congo). Rapport interne UR2PI, 51 p.
- Nzila J.D., Bouillet J.P., Laclau J.P. and Ranger J. (2002). The effect of slash management on nutrient cycling and tree growth in Eucalyptus plantations in the Congo. *Forest Ecology and Management*, 171, 209–221.
- Nzila J.D., Bouillet J.P., Laclau J.P., Ranger J., (2001). Changes in nitrogen mineralization over successive rotations in clonal Eucalyptus plantations in Congo. Actes du congrès Developing the eucalypt of the future. Valdivia, Chili, 11-15 septembre 2001, 10 p.
- Nzila J.D., Laclau J.P., Bouillet J.P. and Ranger J. (2004). Fate of nutrients during decomposition of Eucalyptus harvest residues in the Congo. *Forest Ecology and Management*, 202, 195–208.
- Nzobadila-Kindiela B.W. (2002). *Contribution à la caractérisation stationnelle du massif d'Eucalyptus. Mémoire IDR, Université Marien N'gouabi*, 63 p + annexes.
- O'Connell A.M., Grove T.S. and Mendham D.S. (2000). Nutrient cycling in Eucalyptus plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 30(1–2), 174–189.
- Recous S., Aita C. and Mary B. (1998). In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. *Soil Biology & Biochemistry*, 31(1), 119–133.
- Saint-André L., Laclau J-P., Bouillet J-P., Deleporte P., Mabiala A., Ognouabi N., Baillères H., Nouvellon Y., (2002). Integrative modelling approach to assess the sustainability of the eucalyptus plantations in Congo. In «Connection between Forest Resources and Wood Quality: Modelling Approaches and Simulation Software», Fourth workshop, IUFRO Working Party S5.01.04 Harrison Hot Springs Resort, British Columbia, Canada, September 8-15, 2002. 10pp.
- Saint-André L., Laclau J.-P., Nouvellon Y., Nzila J., Safou-Matondo R., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P. and Bouillet J.-P. 2007. Synthesis on the trade-offs of C sequestration with water yield 99 and soil fertility after savannah afforestation in Congo. GCP Symposium, Kruger Park, SouthAfrica 23-25 August 2007. Oral communication.
- Saint-André L., M'Bou A.T., Mabiala A., Mouvondy W., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P., Hamel O. and Ranger J. (2008). Age-related equations for above- and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*, 256, 1602–1614.
- Smethurst P.J. and Nambiar E.K.S. (1990). Effects of slash and litter management on nutrient turnover in a *Pinus radiata* plantation. *Forest Ecology and Management*, 41, 229–244.
- Soltner D. (2005). *Les bases de la production végétale. Tome I : Le sol et son amélioration*. Science et Techniques Agricoles, Bressuire.
- Trouvé C. (1992). *Apport de la géochimie isotopique (^{13}C) à l'étude du renouvellement des matières organiques du sol*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 112 p.