



Réponses des indicateurs de la fertilité chimique d'un ferralsol au changement d'occupation du sol et à la fragmentation des forêts dans la région de Yangambi en RD Congo

⊗ Alongo S^{1*}, ⊗ Kombele F², ⊗ Visser M³ & ⊗ Bogaert J⁴

¹ Laboratoire d'Agroécologie et Ingénierie de l'Environnement ; Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi, Kisangani, RD Congo

² Laboratoire de gestion durable du sol et environnement, Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi, Kisangani, RD Congo.

³ Université Libre de Bruxelles, Ecole Interfacultaire de Bioingénieurs, Laboratoire d'Agroécologie, Bruxelles, Belgique.

⁴ Université de Liège, Gembloux-Agro-Bio Tech, Unité Biodiversité et Paysage, Gembloux, Belgique.

* Correspondance : salongo.ifa@laecloie.org

Copyright © 2022 Alongo et al. Open Access Article under [License CC BY-NC-4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Reçu: 03 Novembre 2021

Accepté: 15 juin 2022

Publié: 25 Juillet 2022

RESUME

La gestion durable des sols dans les écosystèmes forestiers fragmentés par les pratiques agricoles implique une bonne connaissance des changements qui s'opèrent dans la couverture pédologique au niveau de la lisière forestière, pour mieux connaître les conséquences édaphiques de la fragmentation forestière. Pour cela, cette étude a évalué les réponses des indicateurs de la fertilité chimique du sol au changement d'occupation du sol et à la fragmentation des forêts causés par l'agriculture itinérante sur brûlis dans la couche 0-20 cm de profondeur par la méthode des transects dans une perspective de gestion durable des sols et des forêts de Yangambi. Les résultats obtenus montrent que la lisière entre la jachère herbeuse et la forêt dense a une largeur de 70 m. Le potentiel chimique du sol (pH, phosphore assimilable, le taux de saturation en bases et la CECE) est meilleur au niveau des jachères herbeuses et des lisières forestières par rapport aux forêts denses suite à la pratique du brûlis qui permet de restituer au sol une fraction de la minéralomasse forestière par les cendres. Les teneurs en carbone et azote totaux du sol ont été significativement plus élevées ($p < 0,001$) sous la lisière forestière que sous la jachère herbeuse et les forêts denses. Les résultats de l'indice de Kamprath ont montré que, lisière forestière, en plus de contribuer à l'accroissement de carbone organique du sol, tend à diminuer la toxicité aluminique de sols étudiés. A l'inverse, la fragmentation des forêts par l'agriculture sur brûlis accroît la toxicité aluminique sous la jachère herbeuse.

Mots-clés : Fragmentation – fertilité chimique du sol – Jachère herbeuse- Lisière- Forêt dense – Yangambi

ABSTRACT

Responses of chemical fertility indicators of a ferralsol to land cover change and forest fragmentation in the Yangambi region of DR Congo

Sustainable soil management in forest ecosystems fragmented by agricultural practices requires a good knowledge of the changes in soil cover at the forest edge, in order to better understand the edaphic consequences of forest fragmentation. To this end, this study assessed the responses of chemical soil fertility indicators to land use change and forest fragmentation caused by slash-and-burn agriculture in the 0-20 cm depth layer using the transect method from the perspective of sustainable soil and forest management in Yangambi. The results show that the edge between the grass fallow and the dense forest is 70 m wide. The chemical potential of the soil (pH, assimilable phosphorus, base saturation rate and CECE) is better in the grassy fallows and forest edges than in the dense forest following the practice of slash-and-burn, which allows a fraction of the forest mineral mass to be returned to the soil through the ashes. Total soil carbon and nitrogen contents were significantly higher ($p < 0,001$) under the forest edge than under the grassy fallow and dense forests. The results of the Kamprath index showed that the forest edge, in addition to contributing to the increase of soil organic carbon, tended to decrease the aluminium toxicity of the soils studied. Conversely, forest fragmentation by slash-and-burn agriculture increases the aluminium toxicity under grass fallow.

Keywords: Fragmentation - Chemical fertility - Grass fallow – Forest Edge - Dense forest - Yangambi

1. INTRODUCTION

Les sociétés humaines sont largement dépendantes des sols car ceux-ci, au-delà de leur rôle comme support de la production végétale, produisent, contiennent et accumulent la plupart des éléments nutritifs indispensables à la vie (Genot *et al.*, 2009). Toutefois, la pression induite par les activités humaines sur les différents espaces a des répercussions directes sur l'occupation du sol et la configuration du paysage. Une des conséquences majeures des activités humaines est la fragmentation du paysage, fortement corrélée à la perte d'habitat (Fahrig, 2003).

Par réduction de la taille des fragments et l'augmentation de leur isolement (Bogaert *et al.*, 2004), la fragmentation modifie la dynamique des forêts tropicales, altère la reproduction des espèces (Aguilar *et al.*, 2006). De même, l'histoire des activités humaines a des conséquences non seulement sur la distribution des espèces mais aussi sur les propriétés du sol (Verheyen *et al.*, 1999; Dupouey *et al.*, 2002; Orczewska, 2009). Un dysfonctionnement partiel ou intégral de la ressource nécessite une approche écologique (Gobat *et al.*, 2003) qui intègre l'ensemble des processus liés à son fonctionnement souvent marqué par une longue histoire co-évolutive entre nature et usages (O'Neill *et al.*, 1986; Cécillon, 2008).

En R.D. Congo en général et la région de Yangambi en particulier, les sols ferrallitiques qui y prédominent sont fortement altérés, pauvres en certains éléments nutritifs somme de bases ($< 2 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$ et phosphore assimilable $< 15 \text{ ppm}$) malgré la luxuriance de la végétation qu'ils portent (Van Wambeke, 1995 ; Kombele, 2004). Etant une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle humaine, le sol suscite de nombreuses questions aujourd'hui quant à son évolution et à sa possible dégradation en fonction de son utilisation en zone forestière de Yangambi. En effet, la chute de la fertilité du sol, consécutive à l'agriculture sur « abattis-brûlis », constitue un handicap important à la sédentarisation de l'agriculture malgré l'augmentation des surfaces défrichées. Ainsi, le maintien de la productivité du sol constitue l'un des problèmes majeurs auxquels sont confrontés les agriculteurs de la région de Yangambi. La gestion durable des sols dans les écosystèmes forestiers tropicaux fragmentés par les activités agricoles comme pour le cas dans la périphérie de la Réserve forestière de Yangambi implique un suivi opérationnel des conséquences de la fragmentation et la déforestation sur les propriétés des sols par la mesure d'indicateurs de la fertilité (Alongo *et al.*, 2013). Cette dernière dépend des conditions de milieu mais surtout de la conduite des activités humaines. L'enjeu actuel pour les politiques environnementales serait de comprendre la dynamique de l'agriculture itinérante sur « abattis-brûlis » afin de chercher des alternatives pouvant permettre de développer dans la périphérie de la Réserve forestière de Yangambi, où la pression foncière est de plus en plus forte, une agriculture assurant la sécurité alimentaire durable des populations rurales et la conservation des forêts denses.

La présente étude se préoccupe de connaître les changements qui s'opèrent dans la couverture pédologique au niveau de la lisière forestière pour une meilleure compréhension de l'impact édaphique des changements d'occupation du sol et de la fragmentation forestière. La démarche consiste à comparer les réponses des indicateurs de la fertilité chimique de sols identiques au plan de leur pédogenèse, sous la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense, de façon à quantifier l'effet de lisière sur les propriétés chimiques des sols, pour mieux connaître les conséquences édaphiques de la fragmentation forestière. Pour cela, l'étude est essentiellement focalisée sur les réponses des propriétés chimiques de sols aux changements d'occupation de sols, en général, et en particulier à l'effet de lisière « jachère herbeuse-forêt dense ».

2. Matériel et Méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

La région de Yangambi est située dans le nord-est de la Cuvette Centrale Congolaise avec coordonnées géographiques $0^{\circ}45'N$, $24^{\circ}29'E$ et située à 500 m d'altitude (Bernard, 1945 ; De Leenheer *et al.*, 1952 ; Béguin, 1962). Le climat est équatorial continental chaud et humide (Alongo *et al.*, 2013), du type Af de Köppen. Les précipitations annuelles sont comprises entre 1837 et 1875 mm et la température moyenne annuelle de $24,6^{\circ}C$, ne variant pas beaucoup au cours de l'année (Jurion & Henry, 1967 ; Kombele, 1998 ; Vandenput R, 1981). La végétation est de type forêt dense humide sempervirente (Alongo *et al.*, 2013). Les sols de la série Yangambi sont des Ferralsols (WRB, 2006) développés sur des sédiments nivéo-éoliens non remaniés et fortement altérés de texture argilo-sableuse (30-40% d'argile), présentant une couche humifère peu épaisse (Kombele, 2004). Du point de vue minéralogique, la fraction fine de ces sols est principalement constituée de kaolinite bien cristallisée (Van Wambeke, 1995).

2.2. Détermination de la lisière entre la jachère herbeuse et la forêt dense

La zone de lisière a été déterminée par une approche microclimatique en transects car elle est très adaptée à la description des processus spatialisés en fonction de la distance (Alongo *et al.*, 2013). Cinq transects parallèles longs de 500 m (un principal et quatre répétitions), de direction est-ouest et séparés au moins de 50 m les uns des autres ont été installés de manière à traverser une succession d'occupations du sol (Ewers & Didham, 2006). Des mesures répétées de la température de l'air et du sol à l'aide de Kestrel 3500 et du thermomètre K ont été effectuées le long des transects suivant l'équidistance de 10 m matérialisée par des jalons. Ensuite, les valeurs de la température de l'air et du sol mesurées à chaque distance similaire le long du transect principal et les quatre répétitions ont été moyennées afin de créer un transect composite. Les courbes de réponse des deux paramètres microclimatiques en fonction de la distance ont ensuite été dressées. De ce fait, la zone de lisière a été détectée par observation visuelle des courbes de réponse

de la température de l'air et du sol le long du transect en fonction de la distance (Chen et al., 1995). Enfin, les transects sur lesquels l'étude a été focalisée, ont été scindés en trois segments correspondant à la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense du site d'étude.

2.3. Echantillonnage

Après la détection de la zone de lisière entre la jachère herbeuse et la forêt dense, un échantillonnage systématique des sols a été réalisé dans la partie supérieure du solum (0-20 cm), intensément influencée par la matière organique (Manil, 1963 ; Kombele, 2004) et reconnue comme source de 70-80 % de l'apport nutritionnel pour les cultures annuelles (Mathieu & Pieltain, 2003). Des échantillons perturbés de sols trouvés dans leur état structural ont été prélevés ; sur chaque type d'occupation du sol, 36 échantillons élémentaires d'environ 600 g chacun par occupation du sol, soit 108 au total pour site d'étudié, ont été prélevés à l'aide d'une tarière. Afin d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité du sol dans chaque formation végétale, 9 échantillons composites ont été constitués à partir d'un mélange de 4 prises élémentaires équi pondérales.

2.4. Analyses chimiques des échantillons du sol

2.4.1. pH-eau et pH-KCl

Les mesures de pH ont été effectuées par pH-métrie, dans une suspension de sol dans l'eau distillée, pour le pH-eau (acidité effective, ou acidité active ou acidité réelle), et dans une solution normale de chlorure de potassium (KCl), pour le pH-KCl (acidité titrable ou de réserve), selon un rapport pondéré terre fine/eau de 1/2,5 à la température ambiante (Pauwels et al., 1992).

2.4.2. Carbone organique et azote organique totaux

Les teneurs en carbone organique (C) et azote organique totaux (N) ont été dosées par un microanalyseur élémentaire CN Leco 600. La matière organique du sol (M.O.S.) est obtenue en multipliant la teneur en carbone organique par le coefficient 1,72, le taux de carbone organique étant supposé égal à 58 % (Mathieu & Pieltain, 2003) d'où :

$$\% \text{ C.O.T. } \times 1,72 = \% \text{ M.O.S.}$$

2.4.3. Bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺)

Les teneurs en bases échangeables ont été déterminées par dosage d'un extrait à l'acétate d'ammonium/EDTA (à pH 4,75 via l'ICP-OES (Cottenie et al., 1982). En outre, les teneurs en phosphore extractible et en fer ont été déterminées dans le même extrait.

2.4.4. Phosphore assimilable

Le phosphore « assimilable » ou biodisponible a été déterminé par la méthode de Bray 2 (Pauwels et al., 1992). Cette méthode extrait le phosphore en milieu acide (HCl + NH₄F, pH = 1,5) tout complexant l'aluminium lié au phosphore. Elle

est très utilisée pour les sols acides (pH = 5,5) surtout s'ils sont riches en fer (sols ferrallitiques). Après extraction par une solution d'acide chlorhydrique (HCl) et de fluorure d'ammonium (NH₄F), le phosphore (extrait) a été filtré, puis coloré en utilisant la réaction de complexation du phosphore avec une solution acide de molybdate d'ammonium et de chlorure stanneux. La concentration en phosphore assimilable a été déterminée par colorimétrie (UV-visible 1205 Spectrophotometer).

2.4.5. Acidité d'échange (Al³⁺ + H⁺) et aluminium échangeable (Al)

L'acidité d'échange (Al³⁺ + H⁺) a été mesurée par titrage d'un extrait de sol KCl 1 M, réalisé à l'aide du titrateur automatique « Radiometer TIM 900 » (Baize, 2000). Le chlorure de potassium est utilisé comme saturante et provoque un déplacement de H⁺ et Al³⁺ du complexe adsorbant. L'échantillon est percolé par une solution de KCl 1 M non tamponnée qui permet d'extraire l'acidité échangeable (Al³⁺ + H⁺) et le titrage est effectué par volumétrie.

2.5 Caractéristiques dérivées des données analytiques

2.5.1. *La somme des bases échangeables (SB)* : est la quantité de cations métalliques actuellement adsorbés sur le complexe argilo-humique, par des liaisons électrostatiques, donc échangeables :

$$SB = \sum (Ca + Mg + K + Na) \quad (2.1)$$

2.5.2. *La capacité d'échange cationique effective (CEC_{eff})* : a été calculée en additionnant l'acidité d'échange (Al³⁺ + H⁺) et la quantité des bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺).

2.5.3. *Le taux de saturation en base échangeables du sol (V_{eff})* : c'est en somme le taux de remplissage du « réservoir cationique » :

$$V_{eff} = \frac{sb}{CEC_{eff}} \times 100 (\%)$$

2.5.4. *L'indice de Kamprath (m)* : calculé à partir des teneurs en aluminium échangeable (Al) et en somme des bases échangeables (SB) du sol :

$$m = \left[\frac{Al}{SB + Al} \right] \times 100$$

2.6. Analyses statistiques des résultats

Les analyses statistiques des résultats ont été faites à l'aide du logiciel STATISTICA 6.0. L'analyse de variance (ANOVA) et les comparaisons statistiques des valeurs moyennes ont été faites par des tests de Tukey et de Newman-Keuls, au seuil de 5%. Lorsque cela était nécessaire, les données ont été transformées (i.e. log₁₀ ou racine carré) pour respecter les conditions de normalité et d'homogénéité de la variance requises pour utiliser ces tests paramétriques.

3. Résultats

3.1. Réponse du pH au changement d'occupation du sol

Les valeurs des pH_{H2O} et au pH_{KCl} des échantillons composites de sol de la lisière et ceux de deux occupations adjacentes du sol sont présentées dans la figure 1 et leurs réponses à l'effet de lisière consignées dans le tableau 2. Les résultats obtenus montrent d'une façon générale que les sols étudiés sous les trois types d'occupation sont acides (pH_{H2O}<5,5). Toutefois, les valeurs des pH_{H2O} sont significativement élevées dans le sol de la jachère herbeuse (pH=4,6), intermédiaires dans

le sol de la lisière (pH=4,4) et basses dans celui de forêt dense (pH=4,1) par conséquent, plus acide. De même pour le pH_{KCl}, qui oscille entre 3,6 ± 0,13 (forêt dense) et 3,98 ± 0,06 (jachère herbeuse) avec des valeurs intermédiaires qui sont obtenues dans le sol de la lisière (3,70 ± 0,19). En effet, les valeurs pH_{H2O} et pH_{KCl} varient significativement entre les occupations du sol et la gamme des valeurs enregistrées est relativement large pour un même niveau de profondeur (4,06 - 4,60 pour le pH_{H2O} et 3,67-3,98 pour le pH_{KCl}). Ceci traduit la présence des colloïdes à charge négative dans les sols étudiés car pH_{H2O} est partout supérieur au pH_{KCl}.

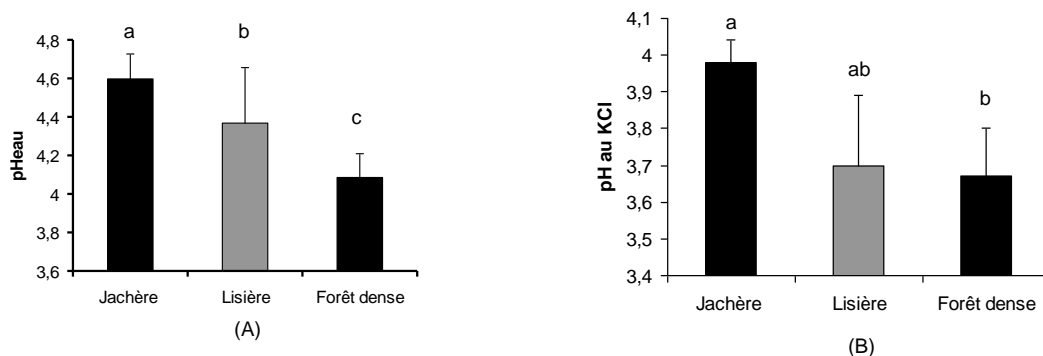


Figure 1. Valeurs moyennes des pH_{H2O} (A) et au pH_{KCl} des échantillons composites et de leurs écarts types dans la couche 0-20 cm de profondeur du sol sous la jachère herbeuse, lisière et la forêt dense de la série Yangambi en R.D. Congo. Les valeurs moyennes affectées de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (test Newman Keuls, > 0,05).

3.2. Réponse du carbone organique (C.O.T.) et azote total (Nt) au changement d'occupation du sol

La figure 2 présente les teneurs moyennes en C.O.T. et Nt dans la couche 0-20 cm de profondeur du sol de la lisière et ceux des deux occupations adjacentes du sol, leurs réponses face à l'effet de lisière sont consignées dans le tableau 2. L'observation des résultats montre un gradient décroissant des teneurs en C.O.T. et en Nt de la lisière vers les deux classes d'occupations adjacentes du sol (jachère et forêt). Pour le carbone organique total (C.O.T.), la moyenne de sol forestier se situe à 1,26 ± 0,13 %, alors que pour le sol de jachère elle se situe à 1,21

± 0,09 % et pour le sol de lisière elle se situe à 1,90 ± 0,40%. La normalité n'étant pas atteinte, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué et a montré un effet significatif du facteur occupation du sol (p<0,01) sur le taux de carbone organique. La comparaison des occupations du sol deux à deux (Test Mann-Whitney) a permis de mettre en évidence deux groupes de sol : (1) sol de lisière et (2) sols de jachère + forêt dense. Ces résultats traduisent un effet écologique bénéfique de lisière forestière sur taux de carbone organique du sol.

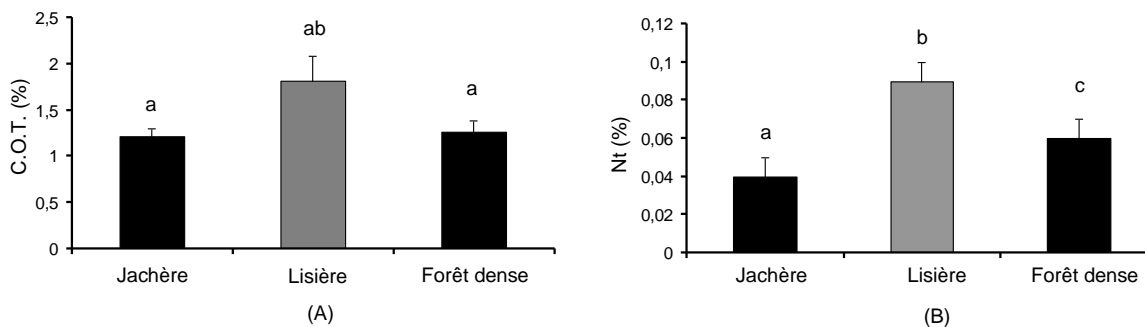


Figure 2. Teneurs moyennes en C.O.T (A) et en Nt (B) des échantillons composites et de leurs écarts types dans la couche 0-20 cm de profondeur du sol sous la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense de la série Yangambi en R.D. Congo. Les valeurs moyennes affectées de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (test Newman Keuls, > 0,05).

Pour l'azote organique total du sol, la moyenne obtenue s'échelonne entre 0,04 ± 0,01 et 0,06 ± 0,01 %,

respectivement pour les sols de jachère et forestier contre 0,10 ± 0,02 % pour le sol de lisière (Figure 2). L'ANOVA

à un facteur contrôlé indique des différences très hautement significatives ($p < 0,001$) entre les trois types d'occupation du sol par rapport à la réponse de l'azote organique au changement d'occupation du sol. Le test de Tukey différencie ainsi trois groupes homogènes d'occupation du sol classés comme suit : sol de lisière > sol de la forêt dense > sol de la jachère herbeuse. Ces résultats montrent à nouveau que la lisière forestière a un effet améliorant, avec le temps, sur le taux d'azote organique du sol.

3.3. Matière organique du sol (M.O.S.) et rapport C/N

Les teneurs en M.O.S et les valeurs associées du rapport C/N du sol sous les trois types d'occupation sont présentées dans la Figure 3, la synthèse de leurs réponses face à l'effet de lisière étant fournie dans le Tableau 1. En comparant les sols sous les trois types d'occupation en ce qui concerne leurs teneurs en M.O.S, on constate qu'il se produit une importante accumulation de matières organiques issues de la litière de végétation dans le sol de lisière ($3,12 \pm 0,47\%$) par rapport au sol sous forêt dense ($2,17 \pm 0,22\%$) et celui de la jachère herbeuse ($2,08 \pm 0,16\%$).

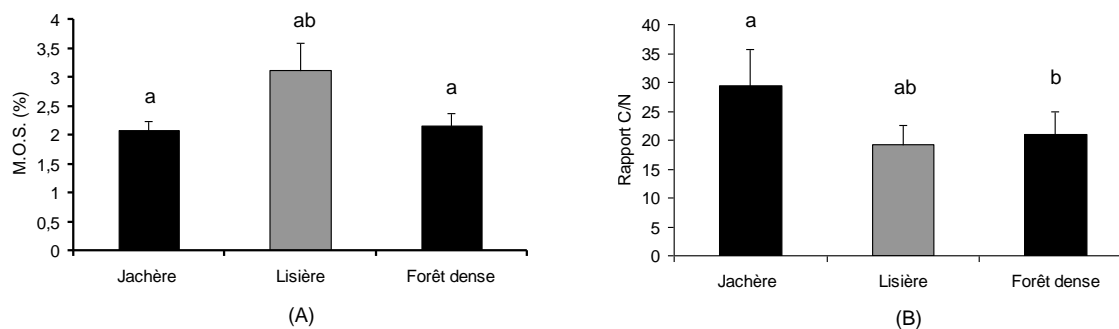


Figure 3. Teneurs moyennes en M.O.S. (A) et valeurs du rapport C/N (B) moyen des échantillons composites et de leurs écarts types dans la couche 0-20 cm de profondeur du sol sous la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense de la série Yangambi à Yangambi en R.D. Congo. Les valeurs moyennes affectées de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (test Newman Keuls, $> 0,05$).

3.4. Réponses du phosphore assimilable et du fer au changement d'occupation du sol

Les résultats des teneurs moyennes en fer et en phosphore (assimilable et extractible) sous les trois types d'occupations du sol étudiés sont présentés dans la figure 4, la synthèse de leurs réponses face à l'effet de lisière est consignée dans le Tableau 1. D'une façon générale, on observe un gradient décroissant des teneurs moyennes en fer et en phosphore extractible de la forêt dense vers la jachère herbeuse, alors que les teneurs en phosphore assimilable sont relativement élevées sous la lisière forestière que sous les deux occupations adjacentes du sol (jachère et forêt). Pour le fer, les teneurs sont élevées sous la forêt dense ($17,2 \pm 3,7$ mg/100g), intermédiaires sous la lisière ($7,6 \pm 4,0$ mg/100g) et faibles au niveau de la jachère herbeuse ($4,6 \pm 1,1$ mg/100g). Le test de Kruskal-Wallis appliqué pour tester l'hypothèse d'une différence des valeurs moyennes entre les trois zones, indique une

Cependant, concernant le rapport C/N moyen du sol associé, on perçoit que les faibles teneurs moyennes en M.O.S obtenues sous la jachère herbeuse s'accompagnent d'un rapport C/N moyen significativement plus élevé (30 ± 6) que ceux obtenus sous les sols de la lisière (19 ± 3) et la forêt dense (21 ± 4). D'une façon générale, le sol de lisière présente la valeur moyenne du rapport C/N faible, la plus élevée étant notée sous la jachère herbeuse et l'intermédiaire sous la forêt dense. L'ANOVA à un facteur a révélé qu'il existe un effet significatif ($p < 0,01$) du facteur occupation du sol sur le rapport C/N moyen du sol. Le test de de Tukey permet ainsi de dégager deux groupes homogènes : (1) sol de jachère herbeuse et (2) sol forêt forestier + lisière de lisière avec une différence très hautement significative ($p < 0,001$) entre les deux groupes.

Ces résultats montrent que la zone de lisière est liée à la forêt dense concernant le rapport C/N du sol isolant ainsi la jachère herbeuse principalement dominée par les graminées. Les différences significatives des valeurs moyennes du rapport C/N entre la jachère herbeuse et la lisière puis la forêt dense peuvent être liées aux caractéristiques chimiques de la litière : sa teneur en azote dont dépend la vitesse de la décomposition et de transfert des résidus au sol ; sa teneur en lignine et en substances carbonées hydrosolubles.

différence significative ($p < 0,01$). La comparaison statistique des moyennes (Test de Mann-Whitney) révèle deux groupes homogènes : (1) jachère + lisière et (2) forêt dense qui seraient imputables aux interventions anthropiques.

Concernant le phosphore assimilable, la teneur moyenne pour le sol de lisière est de $1,0 \pm 0,5$ ppm, significativement élevée ($p < 0,05$) par rapport à celles trouvées sous les deux occupations adjacentes du sol, jachère herbeuse ($0,5 \pm 0,4$ ppm) et la forêt dense ($0,5 \pm 0,4$ ppm). Contrairement au phosphore disponible, les teneurs moyennes en phosphore extractible sont significativement ($p < 0,05$) élevées sous la forêt dense ($4,7 \pm 1$ ppm), intermédiaires sous la lisière ($3,9 \pm 2$ ppm) et faibles sous la jachère herbeuse ($2,9 \pm 0,6$ ppm). Le test de Tukey permet de distinguer deux groupes différents : (1) jachère + lisière et (2) lisière + forêt dense.

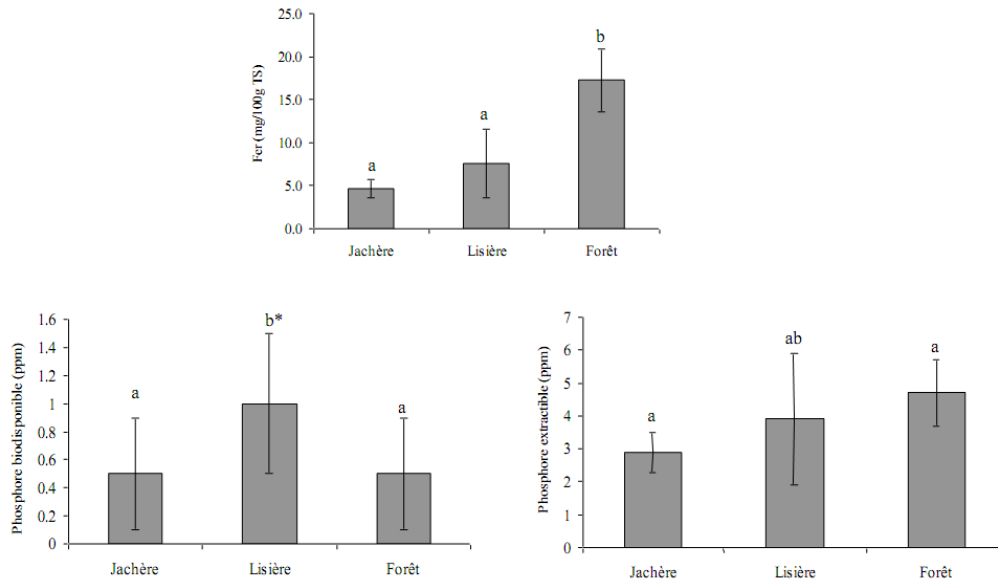


Figure 4. Teneurs moyennes en fer (I) et en phosphores (II) des échantillons composites et de leurs écarts types dans la couche 0-20 cm de profondeur du sol sous la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense de la série Yangambi à Yangambi en R.D. Congo. Les valeurs moyennes affectées de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (test Newman Keuls, > 0,05) et ns= différences non significatives.

3.5. Réponses des cations échangeables au changement d’occupation du sol

Les valeurs de Ca échangeables (tableau 1) pour les trois occupations du sol étudiées varient entre 0,02 cmol(+).kg⁻¹ (forêt dense) à 0,19 cmol(+).kg⁻¹ (sol de lisière), le sol de la jachère herbeuse contient des valeurs intermédiaires soit 0,07 cmol(+).kg⁻¹. L’analyse de la variance (ANOVA)

révèle des différences très significative (p<0,01) entre les trois occupations du sol et leur comparaison deux à deux (test de Newman-Keuls) indique que, le sol de la lisière diffère significativement de ceux de la jachère herbeuse et la forêt dense, ces deux dernières sont identique (p > 0,05). Ceci indique des effets bénéfiques de la zone de lisière sur le calcium échangeable du sol.

Tableau 1. Teneurs moyennes des cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺, H⁺) des échantillons composites et de leurs écarts types dans la couche 0-20 cm de profondeur du sol sous la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense de la série Yangambi

Propriétés	Série Yangambi (Y ₁)				
	N	Jachère	Lisière	Forêt	Gradient
Ca _e (cmol(+).kg ⁻¹)	9	0,08 ± 0,04	0,19 ± 0,13	0,02 ± 0,01	J < L > F
Mg _e (cmol(+).kg ⁻¹)	9	0,03 ± 0,02	0,09 ± 0,03	0,03 ± 0,01	J < L > F
K _e (cmol(+).kg ⁻¹)	9	0,05 ± 0,01	0,08 ± 0,02	0,06 ± 0,01	J < L > F
Na _e (cmol(+).kg ⁻¹)	9	0,06 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,05 ± 0,01	J > L = F
Sb (cmol(+).kg ⁻¹)	9	0,22 ± 0,06	0,41 ± 0,16	0,16 ± 0,03	J < L > F
V _{eff} (cmol(+).kg ⁻¹)	9	24,37 ± 8,91	34,84 ± 9,89	18,26 ± 4,54	J < L > F
CEC _{eff} (cmol(+).kg ⁻¹)	9	1,26 ± 0,82	1,14 ± 0,23	0,90 ± 0,14	J > L > F
Al _e (cmol(+).kg ⁻¹)	9	1,04 ± 0,82	0,58 ± 0,15	0,57 ± 0,10	J > L > F
H _e (cmol(+).kg ⁻¹)	9	0,00	0,16 ± 0,8	0,17 ± 0,14	J < L > F
Al+H (cmol(+).kg ⁻¹)	9	1,04 ± 0,82	0,74 ± 0,15	0,74 ± 0,28	J > L = F
SAL (%)	9	82,54 ± 8,91	50,87 ± 14,28	63,33 ± 11,97	J > L < F
Indice m (%) Kamprath	9	82,53 ± 8,90	58,58 ± 11,40	78,08 ± 4,03	J > L < F

Pour le Mg échangeable, les valeurs trouvées sont très faibles et sont de l’ordre de 0,03 cmol(+).kg⁻¹ (jachère herbeuse et la forêt dense) à 0,08 cmol(+).kg⁻¹ pour le sol de la lisière. Les différences obtenues sont significatives entre le sol de la lisière et ceux de deux occupations adjacentes du sol. De même, les teneurs en K échangeables dans le sol de la lisière de l’ordre de 0,07 cmol(+).kg⁻¹, sont aussi significativement élevées (p <

0,05) que celles obtenues pour les sols de la jachère herbeuse et la forêt dense de l’ordre 0,05 cmol(+).kg⁻¹.

Concernant la CECE (Figure 5), les valeurs obtenues sous les trois types d’occupation du sol sont faibles. Toutefois, les valeurs élevées sont obtenues dans la jachère herbeuse soit 1,25 cmol(+).kg⁻¹, des valeurs intermédiaires au niveau de la lisière soit 1,12 cmol(+).kg⁻¹ et les plus faibles valeurs de la CECE sous la forêt

dense. Par ailleurs, pour la somme des bases échangeables observée, le sol de la lisière avec des valeurs en M.O.S et en cations échangeables élevées, renferme la valeur significativement élevée de la somme de bases (0,39 cmol(+).kg-1) par rapport aux sols de la jachère herbeuse (0,21 cmol(+).kg-1) et la forêt dense (0,15 cmol(+).kg-1).

De l'analyse des résultats obtenus de l'aluminium échangeable et de l'acidité d'échange (Al³⁺+H⁺), il se dégage que l'acidité d'échange et les teneurs en Al sont plus élevées dans le sol sous la jachère herbeuse, mais assez faibles dans le sol sous la lisière et la forêt dense.

Les valeurs d'acidité d'échange (Al³⁺+H⁺) varient entre 0,74 cmol (+).kg-1 (sous forêt dense) et 1,04 cmol(+).kg-1 (sous la jachère herbeuse). De même, les teneurs en Al varient entre 0,57 cmol(+).kg-1 (sous forêt dense) et 1,04 cmol(+).kg-1 (sous jachère herbeuse), la lisière occupant une position intermédiaire (0,58 cmol(+).kg-1).

D'une façon générale, l'acidité d'échange sous les trois types d'occupation du sol est supérieure à la somme des bases échangeables. Cela a pour conséquence la présence de l'ion Al³⁺ comme cation acide dominant dans la capacité d'échange cationique et le faible taux de saturation en bases.

Tableau 2 : Résultats d'ANOVA à un facteur et de Kruskal-Wallis testant l'effet de lisière sur les propriétés chimiques du sol de la série Yangambi dans la couche 0-20 cm de profondeur

<i>Variables</i>	<i>SC</i>	<i>dl</i>	<i>MC</i>	<i>F</i>	<i>p – value</i>
pH-eau	-	2	-	-	< 0,01
pH-KCl	0,501	2	0,250	12,34	< 0,001
C.O.T. (%)	-	2	-	-	< 0,01
Nt (%)	7,27	2	1,635	43,28	< 0,001
M.O.S. (%)	-	2	-	-	< 0,01
Rapport C/N	544,45	2	272,22	12,60	< 0,001
Fer (mg/100g)	-	2	-	-	< 0,01
P _{-Bray2} (mg/100g)	0,015	2	0,007	3,787	< 0,01
P _{-extra} (mg/100g)	0,144	2	0,072	3,926	< 0,05
Ca _é (cmol(+).kg ⁻¹)	0,436	2	0,218	17,580	< 0,001
Mg _é (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	< 0,001
K _é (cmol(+).kg-1)	-	2	-	-	< 0,01
Na _é (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	> 0,05
S.B. (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	< 0,01
V _{eff} (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	< 0,001
CEC _{eff} (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	< 0,01
Al _é (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	> 0,05
H _é (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	< 0,05
Al+H (cmol(+).kg ⁻¹)	-	2	-	-	> 0,05
Indice m (%)	378,78	2	189,37	8,428	< 0,01

Une p-value en gras indique un effet de lisière sur la variable considérée ; p-value significative, mais non en gras indique que la lisière à des effets similaires soit avec la jachère soit la forêt dense qu'elle sépare sur la variable considérée ; le tiret (-) indique les résultats de test de Kruskal-Wallis ; SC : Somme Carrées (des écarts à la moyenne), dl : degrés de liberté ; MC : variance (Carré Moyen) ; F : F de Fisher calculé ; P : erreur alpha ; p>0,05 : différence non significative ; p<0,05 : différence significative ; p<0,01 : différence très significative ; p<0,001 : différence très hautement significative.

4. Discussion

La chute de la fertilité du sol, consécutive à l'agriculture sur « abattis-brûlis », constitue un handicap important à la sédentarisation de l'agriculture malgré l'augmentation des surfaces défrichées. C'est pourquoi la présente étude s'est préoccupée de connaître les changements qui s'opèrent dans la couverture pédologique au niveau de la lisière forestière pour une meilleure compréhension de l'impact édaphique des changements d'occupation du sol et de la fragmentation forestière d'origine agricole. Pour ce faire, la démarche consiste à comparer les réponses des indicateurs de la fertilité chimique de sols identiques au plan de leur pédogenèse, sous la jachère herbeuse, la lisière et la forêt dense, de façon à quantifier l'effet de lisière sur les propriétés chimiques des sols, pour mieux connaître les conséquences édaphiques de la

fragmentation forestière. De l'analyse des différents résultats, les observations suivantes peuvent être faites.

Pour la réaction du sol, la gamme des pH-eau observée (figure 1) varie significativement d'une occupation du sol à l'autre. En effet, la fragmentation des forêts qui fait suite à l'agriculture itinérante sur brûlis augmente de façon significative (p<0,01) le pH du sol. Elle provoque en effet, une certaine désacidification par l'augmentation du pH-eau sous la jachère herbeuse et la lisière forestière du site étudié. Cela peut s'expliquer par le fait que, lors des abattis brûlis, une part importante des réserves minérales contenues dans les plantes et la M.O.S préexistante libérée par le feu atteint bien le sol, la barrière constituée par la litière forestière n'existant plus (Certini, 2005). Yemefack et Nounamo (2000), en zone forestière au Cameroun, montrent que les cendres issues du brûlis de la végétation coupée lors de la mise en

culture d'une portion de forêt constituent un engrais à effet de chaux qui influence le pH, les bases, l'acidité d'échange, le rapport carbone/azote et la CEC (Moreau, 1993).

Les résultats de cette corroborent ceux obtenus par Kombele (2004) dans la zone d'étude et indiquent de façon particulière que la lisière forestière, tout comme la jachère herbeuse du site étudié, limitent de façon significative la pédogénèse acidifiante qui caractérise les sols du site étudié. Les valeurs obtenues des pH-eau moyens s'inscrivent dans la gamme de pH-eau de l'échelle de Dabin (1961) variant entre 4,0-6,0 et convenant à la plupart des cultures tropicales. A l'inverse, les valeurs observées se rapprochent plus de la limite inférieure de l'échelle des pH-eau proposée par Landon (1991) variant entre 5,5 -7,0, limite en deçà de laquelle, selon cet auteur, les cultures peuvent souffrir de la toxicité aluminique et d'excès en Co, Cu, Fe, Mn et Zn, et manifester des carences et déficiences en Ca, K, N, Mg, Mo, P, S et B.

Bien que la fragmentation des forêts liée à l'agriculture itinérante sur brûlis limite de façon significative la pédogénèse acidifiante qui caractérise la série de sol étudiée, il n'existe pas de différences significatives entre la lisière et la forêt dense concernant le pH-KCl moyen des sols étudiés. Cela pourrait se justifier par le fait que la lisière est un milieu hétérogène, constitué de différentes sous-parties : une partie de forêt perturbée suite au front d'abattage marquée par des pH-KCl moyens du sol similaires à ceux de la forêt dense et une partie de jachère recolonisée par la forêt marquée par un rehaussement significatif du pH-eau similaire à la jachère herbeuse. Si rien n'interrompt l'expansion des habitats forestiers suite à l'abandon des terres arables voire la durée de la jachère, cette dernière évoluera vers la forêt dense et les valeurs du pH du sol redeviendront encore plus acides (Boyer, 1982).

S'agissant des réponses de carbone organique et de l'azote organique total aux changements d'occupation du sol et la fragmentation des forêts, la lisière forestière entraîne l'accroissement plus significatif ($p < 0,001$) des teneurs en carbone et azote organiques totaux du sol que la jachère herbeuse et le témoin forêt dense du site étudié. Ces résultats ont permis de mettre en évidence l'effet écologique améliorant des lisières forestières, avec le temps, sur le statut organique du sol et constitue un acquis important de la présente étude. Ceci serait attribuable à l'équilibre entre le brûlis et la jachère dans le système d'exploitation à faible niveau d'intrant. En effet, durant la phase de jachère comme celle caractérisant la lisière forestière étudiée se trouvant à une longue durée de jachère (plus de 9 ans), les apports de composés organiques sous forme de litière aérienne et racinaire participent activement à la constitution de la matière organique des sols (Feller *et al.*, 1993 ; Masse *et al.*, 1998).

L'intervalle de variations des Nt moyens (%) dans les sols de trois occupations de la série Yangambi s'inscrit entre 0,05 (jachère herbeuse) et 0,09 % (lisière). Selon Horgnies (1983) et Kombele (2004), les teneurs en Nt (%) du sol dans les tropiques humides varient de 0,07 - 0,41 % entre 0-113 cm de profondeur où la limite

inférieure correspond aux couches et horizons profonds et la limite supérieure aux couches et horizons superficiels du sol. Les Nt moyens (%) du sol entre 0-20 cm de profondeur de trois occupations de la série Yangambi ne s'inscrivent pas dans cet intervalle, hormis la zone de lisière. Les lisières adjacentes à des parcelles cultivées, concentrent davantage d'azote et de phosphates, ce qui favorise le développement foliaire et la richesse spécifique des herbacées en ces éléments (Pocewicz *et al.*, 2007). Des résultats similaires ont été observés par Jose *et al.* (1996) en forêt tropicale de Shola. Ces résultats leur ont permis d'établir que les propriétés chimiques du sol sont très sensibles à l'effet de lisière forestière.

En définitive, les sols de la zone étudiée sont particulièrement pauvres en matière organique bien que l'étude ait mis en évidence une importante accumulation de la matière organique dans le sol de lisière ($3,12 \pm 0,47$ %) par rapport au sol sous forêt dense ($2,17 \pm 0,22$ %) et celui de la jachère herbeuse ($2,08 \pm 0,16$ %). Les rapports C/N moyens observés sous les trois types d'occupation du sol variant entre 17,1 (zone de lisière) et 29,5 (jachère herbeuse) montrent que dans la zone de lisière, il y a prédominance du processus de minéralisation sur celui d'humification, alors que dans la forêt dense on observe une situation contraire. D'après White (2006), une forte acidité couplée aux températures relativement fraîches, comme celles prévalant dans la forêt dense, ralentit la minéralisation. Dans ces conditions, la matière tend à s'accumuler et la production accrue d'acides organiques exacerbe aussi l'acidification des sols. Des résultats similaires ont été rapportés par Kombele (2004) dans le même site d'étude.

De tout ce qui précède, l'étude a dévoilé un potentiel chimique en termes d'autres indicateurs de fertilité (phosphore assimilable, bases échangeables, la somme des bases échangeables, le taux de saturation en bases et la capacité d'échange cationique effective) meilleur au niveau de la jachère herbeuse et de la lisière forestière par rapport à la forêt dense du site étudié. Ces deux occupations du sol restituent au sol une fraction de la minéralomasse forestière par les cendres pour pallier aux carences minérales et diminuer l'acidité souvent associée à ces sols. Cependant, ce potentiel chimique bien que meilleur qu'à celui observé sous forêt dense suite, il apparaît médiocre par rapport aux normes en vigueur dans les tropiques humides (Landon, 1991). Sa modicité par rapport aux normes en vigueur dans les tropiques serait due au caractère non durable de la pratique du brûlis dans le contexte de forte pression démographique (Boyer, 1982 ; Van Wambeke, 1995 ; Kombele op-cit).

En plus de contribuer à l'accroissement de carbone organique du sol, la lisière forestière a tendance à atténuer la toxicité aluminique des sols du site étudié avec un effet bénéfique sur la biodisponibilité du phosphore du sol (1,0 ppm) que sous la jachère herbeuse et la forêt dense (0,5 ppm) bien que faible par rapport à l'échelle de fertilité proposée par Landon (1991). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Jose *et al.* (1996) qui signalent des accroissements significatifs des teneurs en phosphore assimilable avec la distance de lisière dans la forêt tropicale de Shola. En outre, Sizer et

Coll. (2000) signalent un effet significatif de la lisière forestière sur les concentrations de phosphore assimilable, effet qui a été à 53 % imputé à la translocation du phosphore par les racines d'arbres des espèces pionnières des lisières dans une forêt fragmentée en Amazonie Centrale. A l'inverse, la présente étude a mis en évidence une baisse des teneurs en fer sous la jachère herbeuse et la lisière forestière étudiée après la fragmentation des forêts par l'agriculture itinérante sur brûlis.

5. Conclusion

La détermination de la zone de lisière d'un ensemble d'écosystèmes interactifs liés à des perturbations anthropiques sur le paysage forestier, permet de mieux connaître l'impact de la fragmentation des forêts sur les propriétés des sols. Le potentiel chimique (phosphore assimilable, bases échangeables, la somme des bases échangeables, le taux de saturation en bases et la capacité d'échange cationique effective) est meilleur au niveau des sols de la jachère herbeuse et de la lisière forestière par rapport au sol forestier dense, nonobstant sa modicité par rapport aux référentiels de fertilité en vigueur dans les tropiques humides. Les réponses du pH, du carbone organique total, d'azote organique total, du rapport C/N, de la matière organique, du phosphore assimilable et de l'acidité d'échange du sol ont indiqué d'une façon générale que dans les conditions du site d'étude, la lisière forestière, tout comme la jachère herbeuse, limitent de façon significative la pédogénèse acidifiante qui caractérise les sols du site étudié. En outre, les teneurs en carbone et azote organique totaux du sol ont été significativement plus élevées sous les lisières forestières que sous la jachère herbeuse et la forêt dense adjacentes. Ces résultats ont permis de mettre en évidence l'effet améliorant de la lisière jachère herbeuse-forêt dense étudiée, avec le temps, sur le statut organique du sol. La lisière entre jachère herbeuse et forêt dense, en plus de contribuer à l'accroissement de carbone organique du sol, a tendance à atténuer la toxicité aluminique du sol de la série Yangambi.

Bibliographie

Aguilar R., Ashworth L., Galetto L. & Aizen M.A., 2006. Plant reproductive susceptibility to habitat fragmentation: review and synthesis through a meta analysis. *Ecology, Letters*, 9 : 968-980

Alongo S., Visser M., Drouet T., Kombele F., Colinet G. & Bogaert J., 2013. Effets de la fragmentation des forêts par l'agriculture itinérante sur la dégradation de quelques propriétés physiques d'un Ferralsol échantillonné à Yangambi, RD Congo. *Tropicultura*, 31, 1, 36-43

Béguin H., 1962, A propos de la densité de la population dans la région de Yangambi. Bruxelles. Acad. Roy. Sci. D'O-M. Bulletin des Séances, nouvelle série, 928-943.

Bernard E., 1945, Le climat écologique de la cuvette équatoriale congolaise. Bruxelles : Publ. INEAC, hors série, 44 p.

Bogaert J., Ceulemans R. & Salvador-Van Eysenrode D., 2004. Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Environmental Management*, 33 : 62-73.

Boyer J., 1982. Les sols ferrallitiques : facteurs de fertilité et utilisation des sols. Paris : ORSTOM édit. Tome X, 3e trimestre, 384 p. Cécillon, 2008.

Certini G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143: 1-10.

Chen J., Franklin J.F. & Spies T.A., 1995. Growing-season microclimatic gradients from clear-cut edges into old-growth douglas-fir forests. *Ecological Applications*, 5 : 74-86. Cottenie et al., 1982.

Dabin B., 1961. Les facteurs de la fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bull. Association Française d'Etude de Sol, n° spécial, 108-130. De Leenheer et al., 1952.

Dupouey J.L., Dambrine E., Laffite J.D. & Moares C., 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, 83 : 2978-2984. Ewers & Didham, 2006.

Fahrig L., 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 34: 487-515. Feller et al., 1993.

Genot V., Collinet G., Brahy V. & Bock L., 2009. L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région Wallonne (adapté du chapitre 4-sol 1 de L'État de l'Environnement Wallon 2006-2007). *Biotechnologie, Agronomie, Société Environnement*, 13: 121-138.

Gobat J.M., Aragno M. & Matthey W., 2003. Le Sol Vivant. Les Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Suisse. 571p. Horgnies 1983.

Jose S., Gillespie A.R., George S.J. & Kumar B.M., 1996. Vegetation responses along edge-to interior gradients in a high altitude tropical forest in peninsular India. *Forest Ecology and Management*, 87: 51-62. Jurion & Henry, 1967

Kombele B., 1998. Evaluation de l'état de fertilité de sols sous forêts primaires et différentes jachères dans la cuvette centrale congolaise : cas du secteur de Yangambi. Gembloux : Mémoire. D.E.S.

Kombele B., 2004. Diagnostic de la fertilité des Sols dans la Cuvette centrale congolaise. Cas des séries Yakonde et Yangambi. Thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique. Landon 1991.

- Manil G., 1963. Profil chimique, solum biodynamique et autres caractéristiques écologiques du profil pédologique. Extrait de *Science du Sol*, 1: 1-15. Masse et al., 1998.
- Mathieu C. & Pielain F., 2003. Analyse chimique des sols. Méthodes choisies. Édition Technique et Documentation, Paris, pp.41. Moreau, 1993.
- O'Neill R.V., De Angelis D.L., Waide J.B. & Allen T.F.H., 1986. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton University Press. Orczewska, 2009.
- Pauwels J.M., van Ranst E., Verloo M. & Mvendo ZE A., 1992. Manuel de laboratoire de pédologie. Méthodes d'analyses des sols et des plantes, équipements, gestion de stocks de verrerie et de produits chimiques. Bruxelles : Administration Générale de la Coopération au Développement (AGCD).
- Pocewicz A., Morgan P. & Kavanagh K., 2007. The effects of adjacent land use on nitrogen dynamics at forest edges in northern Idaho. *Ecosystems*, 10: 226-238. Sizer et Coll. (2000).
- Van Wambeke A., 1995. Les sols des tropiques : propriétés et appréciation. CTA & Huy Trop asbl. 335p. Van Wambeke, 1995
- Vandenput R., 1981. Les principales cultures en Afrique centrale. Tournai : publications D.G.A., Editions Lesaffre, hors série, pp.228-259. Verheyen et al., 1999
- WRB., 2006. World reference base for soil resources, 2nd ed. World Soil Resources Report N°103. FAO, Rome.
- Yemefack M. & Nounamo L., 2000. Dynamique des sols et durée optimale des jachères agricoles naturelles au sud Cameroun pp. 135-141, In: Floret Ch. & R. Pontanier (ed): La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagement, Alternatives. Edition Joh