Université catholique de Louvain

Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale

Impact de l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols sableux du plateau Batéké, République Démocratique du Congo

Earth and Life Institute - Environmental Sciences

Promoteur : Prof. Q. Ponette

Lecteurs : Dr. J.T. Cornelis
Dr. M. Jonard
Prof. J. Lejoly
Mr. J.C. Steffens

Mémoire présenté par Amandine Sente
En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Bio-ingénieur
en sciences et technologies de l'environnement

Année académique 2010-2011

Remerciements

A l'issue de ce travail, j'aimerais remercier tous ceux qui ont permis la réalisation de ce projet.

Je pense dans un premier temps, à mon promoteur, le Professeur Quentin Ponette, pour son soutien, sa patience et ses remarques pertinentes. Je le remercie également pour le temps qu'il m'a consacré et l'enthousiasme manifesté à l'égard de mon sujet.

Je tiens également à remercier le Professeur Jean Lejoly, de nous avoir proposé de travailler à Ibi-station et de nous avoir permis de découvrir le magnifique projet qu'est Ibi-village.

Mes remerciements vont également aux deux autres étudiants, Sarah Gengler et Benoît Cassart, qui m'ont accompagné dans ce projet. Merci à eux pour les bons moments passés ensemble et leur patience dans les moments les plus difficiles, mais surtout pour leur aide précieuse sur le terrain et en Belgique.

Un grand merci également à toute l'équipe congolaise, sans qui aucun échantillon n'aurait pu être ramené en Belgique. Je pense notamment à Olivier Mushiete qui nous a permis de venir échantillonner dans sa propriété, mais également à Ruphin Ngabulongo et Dany Mulabu, qui nous ont aidés quotidiennement dans le travail de terrain. Une pensée va également aux ouvriers congolais qui nous ont apporté une aide plus que précieuse, merci aux Trésor.

Une pensée toute particulière va également à Jean-Claude Steffens et son beau-frère Michel Otjaques qui sont venus expressément au Congo pour nous aider dans nos travaux de terrain. Merci à eux, pour leur aide si précieuse et leur volonté de tout mettre en œuvre pour que les travaux soient finis dans les temps. Merci aussi pour les bons moments passés ensemble, et également les moments pénibles qu'ont été les travaux à Mampu. Merci également pour leur soutien et leurs encouragements.

Je souhaite également remercier Karine Henin pour son aide considérable pour les manipulations en laboratoire et également tous les membres de l'équipe EFOR qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

Enfin, je désire également remercier tous mes proches pour leur soutien et leurs encouragements durant toutes ces années.

Résumé

La région étudiée est située sur les plateaux Batéké, en République Démocratique du Congo. Elle est caractérisée par des sols acides de type arénosols présentant une faible fertilité chimique et une faible capacité de rétention en eau. Les deux sites d'étude sont recouverts de plantations d'*Acacias auriculiformis* destinées à produire du charbon de bois, mais également destinées à former un puits de carbone pour l'un des deux sites.

Dans ce contexte, ce mémoire a pour objectif de déterminer l'influence de l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols sableux et à identifier la distribution des stocks en éléments nutritifs dans différents compartiments de l'écosystème : acacias, végétation herbacée, litière, sol (0-25 cm et 25-50 cm). L'influence des feux de savane a également été étudiée dans un peuplement âgé de 3 ans.

Des échantillons ont été prélevés dans tous les compartiments, à la fois en savane et dans une chronoséquence d'acacias (1, 3, 7 et 14 ans).

Les propriétés des sols considérées sont : les pH eau et $CaCl_2$, les teneurs en azote et en carbone, ainsi que les concentrations en éléments échangeables et en éléments totaux. La densité apparente a également été mesurée, afin de permettre le calcul des stocks en éléments. Les concentrations en carbone, en azote et en éléments totaux ont par ailleurs été déterminées dans la litière et la végétation herbacée.

Ce mémoire a confirmé la faible fertilité chimique des sols et l'acidité qui les caractérise. Une toxicité aluminique a également été mise en évidence par le taux de saturation important de l'aluminium sur le complexe d'échange qui varie entre 72 et 90 %.

L'évolution des propriétés du sol sous *Acacia auriculiformis* montre une diminution de pH et une augmentation significative (α=0,05) des teneurs en azote dans les peuplements plus âgés. Aucune évolution significative des autres propriétés n'a été observée.

Plusieurs facteurs susceptibles d'influencer les propriétés des sols ont été mis en avant : les feux de savane fréquents dans cette région, un éventuel effet de site entre les deux zones étudiées, l'importance de la végétation accompagnatrice, ainsi que les pratiques agro-sylvicoles et culturales.

Les feux peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés des sols principalement dans l'horizon de surface, comme l'ont démontré les résultats de notre étude. Ils sont responsables d'une augmentation de pH et des teneurs en azote, d'une diminution des concentrations en éléments totaux. Il a été mis également en évidence que ces feux peuvent augmenter le taux de saturation en bases sur le complexe d'échange et diminuer le taux de saturation de l'aluminium sur ce dernier.

Les stocks totaux dans les compartiments de l'écosystème sont modifiés avec le vieillissement des arbres, ces changements étant principalement dus aux variations des stocks dans les acacias et dans la litière. Au dépit d'une forte accumulation d'éléments dans la biomasse des arbres, les stocks dans les sols n'évoluent pas sensiblement avec l'âge des plantations.

Tables des matières

Introduction 6

1. Problématique 6
2. Objectifs 7
3. Délimitation du sujet 7
4. Intérêts 8

Présentation générale de la zone d'étude 9

1. Le plateau Batéké 9
   a) Localisation 9
   b) Climat 10
   c) Végétation 10
   d) Géologie 10
   e) Pédologie 11

   Descriptif des Arénosols 11
2. Description des projets 13
   a) Ibi-village 13
   b) Mampu 15

3. Acacia auriculiformis 16

Matériel et Méthodologie 17

1. Généralités 17
2. Choix du site 17
3. Echantillonnage 18
   a) Installation des placettes 18
   b) Prélèvement et conditionnement des échantillons de sol 19
   c) Prélèvement et conditionnement des échantillons de litière 19
   d) Prélèvement et conditionnement des échantillons de végétation 20
4. Analyses chimiques 21
   a) Sol 21
   b) Litière et végétation 22
5. Traitement des données 23
   a) Traitement des données brutes 23
   b) Traitements statistiques des données 24

Résultats 25

1. Caractéristiques dendrométriques des plantations 25
2. Caractéristiques générales des sols 27
3. Evolution des propriétés des sols selon le type de couvert végétal 29
a) pH 31
b) Eléments échangeables 32
c) Carbone et azote 37
d) Eléments totaux 40
e) Densité apparente 44
4. Impact du feu dans le peuplement de 3 ans 45
5. Litière et végétation herbacée 47
6. Evolution des stocks 49
Discussion 52
1. Caractéristiques dendrométriques des plantations et itinéraires techniques 52
2. Caractéristiques générales des sols 54
3. Influence de l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols 56
4. Feux de savane : impact sur le sol 62
5. Evolution des stocks en azote, carbone et en éléments totaux dans les compartiments de l'écosystème 66
Conclusions et perspectives 69
Bibliographie 72
Annexes 77

Introduction

1. Problématique

Depuis quelques années, il a été prouvé que l'homme contribue au réchauffement climatique via l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2007), notamment via l'émission de dioxyde de carbone. Depuis cette constatation, plusieurs solutions ont été envisagées dont l'une consiste à créer des puits de carbone. D'après la CCNUCC (La Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques), les puits de carbone sont: « des *réservoirs de carbone et conditions particulières qui assurent une absorption et un emmagasinage (séquestration) de plus de carbone qu'ils en libèrent. Les puits de carbone peuvent compenser en partie les émissions de gaz à effet de serre. Les forêts et les océans sont d'importants puits de carbone* ». En République Démocratique du Congo, sur les plateaux Batéké, région étudiée dans le cadre de ce travail, un puits de carbone a été installé à la station Ibi, située à 140 km à l'est de Kinshasa, en utilisant notamment l'espèce *Acacia auriculiformis*. Ce mémoire ne s'intéresse pas directement aux puits de carbone mais aux conditions physico-chimiques des sols présents sous ces peuplements d'acacias situés dans ce puits de carbone. Ce travail se situe dans la continuité d'autres études, visant à quantifier les stocks d'azote et de carbone, ainsi que d'autres éléments minéraux dans les *Acacias* plantés dans le puits de carbone.

La région étudiée est donc située sur les plateaux Batéké en République Démocratique du Congo et présente des sols acides de type arénosols, caractérisés par une faible fertilité chimique et une faible capacité de rétention en eau. Valoriser ces sols est donc un enjeu majeur dans ce pays pauvre, où 42% de la population souffrent de malnutrition (FAO, 2011). L'augmentation de leur fertilité permettrait d'améliorer les rendements agricoles et surtout d'augmenter le nombre d'espèces cultivées. Les *Acacias auriculiformis* ont été plantés dans plusieurs régions du monde en vue de restaurer des sols dégradés suite à la déforestation et ont permis d'améliorer les propriétés physico-chimiques des sols. Ce type de plantations pourrait donc être envisagé sur les plateaux Batéké pour augmenter à long terme la fertilité des sols. Dans ce contexte, ce mémoire a été proposé afin d'étudier l'influence effective de cette espèce sur certaines propriétés chimiques des sols, ainsi que sur l'évolution des stocks en éléments nutritifs dans plusieurs compartiments de l'écosystème (sol, litière et végétation), en fonction de l'âge des arbres.

Afin d'évaluer l'influence de l'Acacia sur les propriétés des sols, une chronoséquence a été choisie en prenant en compte quatre âges différents d'acacias : 1, 3, 7 et 14 ans. Cette chronoséquence n'était pas disponible sur un seul site d'étude. Deux sites d'étude ont donc été pris en compte : le puits de carbone d'Ibi-station et le site de Mampu, situé à une vingtaine de kilomètres de ce dernier.

Ces deux sites se caractérisent par des plantations d'*Acacia auriculiformis* dont l'objectif, dans le cas de la station d'Ibi, est de séquestrer du carbone, et dans le cas de Mampu, de produire du charbon de bois en suffisance pour Kinshasa. Les arbres du puits de carbone d'Ibi-station sont également destinés à terme à produire du charbon de bois. Cette production est intéressante dans cette région car elle est la source majeure de déforestation. En effet, les habitants, par manque de revenus, produisent du charbon de bois à partir des galeries forestières existantes sur les plateaux

Batéké. Contrôler la déforestation dans cette région est particulièrement primordial au vu de la fragilité des sols. Sur les deux sites d'étude, des systèmes agroforestiers sont mis en place en alternant les plantations d'acacias avec des cultures vivrières telles que le manioc et le maïs. Ces productions sont vendues sur place ou à Kinshasa et le développement de ces activités permet de créer de l'emploi localement, contribuant ainsi à l'augmentation de la qualité de vie des habitants des plateaux Batéké.

2. Objectifs

Le premier objectif de ce travail consiste à étudier l'influence que peut avoir l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols. Etant donné sa capacité à fixer l'azote atmosphérique, cette espèce est susceptible d'augmenter les teneurs en azote dans les sols, ainsi que les quantités d'autres éléments biodisponibles, contribuant ainsi à augmenter la fertilité de ces sols. Afin d'identifier ou non cette influence, une caractérisation préliminaire des propriétés des arénosols sera établie. Toutes les propriétés physico-chimiques ne seront pas prises en compte mais permettront tout de même d'identifier l'état des stocks en éléments nutritifs de ces sols et d'évaluer leur fertilité chimique, supposée très faible.

Au vu de l'importance des feux de savane qui ravagent la région, et surtout suite au passage d'un feu de savane dans l'un des peuplements étudié de la station Ibi, l'influence immédiate de ces derniers sur les propriétés du sol sera également étudiée puisqu'elle peut influencer l'interprétation des évolutions des propriétés étudiées dans la chronoséquence d'*Acacia auriculiformis*.

Le dernier objectif vise à examiner la répartition des stocks en éléments totaux dans tous les compartiments étudiés: le sol, la litière, la végétation herbacée et les *Acacias* (via l'intégration de résultats issus d'autres travaux). Cette étude permettra d'identifier les compartiments les plus susceptibles d'influencer les stocks dans les sols.

3. Délimitation du sujet

Ce mémoire vise donc à identifier certaines caractéristiques physico-chimiques des arénosols des plateaux Batéké. Les propriétés étudiées sont les suivantes : la densité apparente, les pH, les quantités en éléments échangeables et en éléments totaux, les teneurs en carbone et en azote, ainsi que les stocks en éléments totaux, carbone et azote. Il vise également à identifier l'évolution de ces propriétés sous l'influence de l'*Acacia* et à déterminer l'évolution des différents stocks dans tous les compartiments : arbres, végétation herbacée, litière et sol.

Des échantillons de sol, de litière et de végétation herbacée, ont donc été prélevés dans deux zones d'étude distinctes, le puits de carbone cité précédemment et le site de Mampu, situé à une vingtaine de kilomètres de ce dernier. Les peuplements échantillonnés à la station Ibi étaient âgés de 1 et 3 ans et ceux de Mampu, âgés de 7 et 14 ans. Des échantillons ont également été prélevés dans la savane de la station Ibi en vue de pouvoir comparer les conditions sous les peuplements avec les

conditions qui régnaient avant les plantations. Pour les échantillons de sol, deux profondeurs ont été étudiées : 0-25 cm et 25-50 cm.

4. Intérêts

L'influence de l'Acacia auriculiformis sur les propriétés des sols a déjà été étudiée par d'autres auteurs mais il semble qu'elle dépend beaucoup des sols considérés. Peu d'études ont toutefois été réalisées sur les plateaux Batéké et pourtant dans leur contexte, il serait important de savoir si les plantations d'acacias entreprises à travers le projet Mampu et Ibi-village, permettraient à long terme d'améliorer les propriétés des sols dégradés de cette région. Il serait également souhaitable de connaître l'impact réel de cette espèce sur les sols afin d'éviter un éventuel appauvrissement de ceux-ci à long terme, ce qui pourrait être très dommageable pour toute la population locale.

Présentation générale de la zone d'étude

1. Le plateau Batéké

a) Localisation

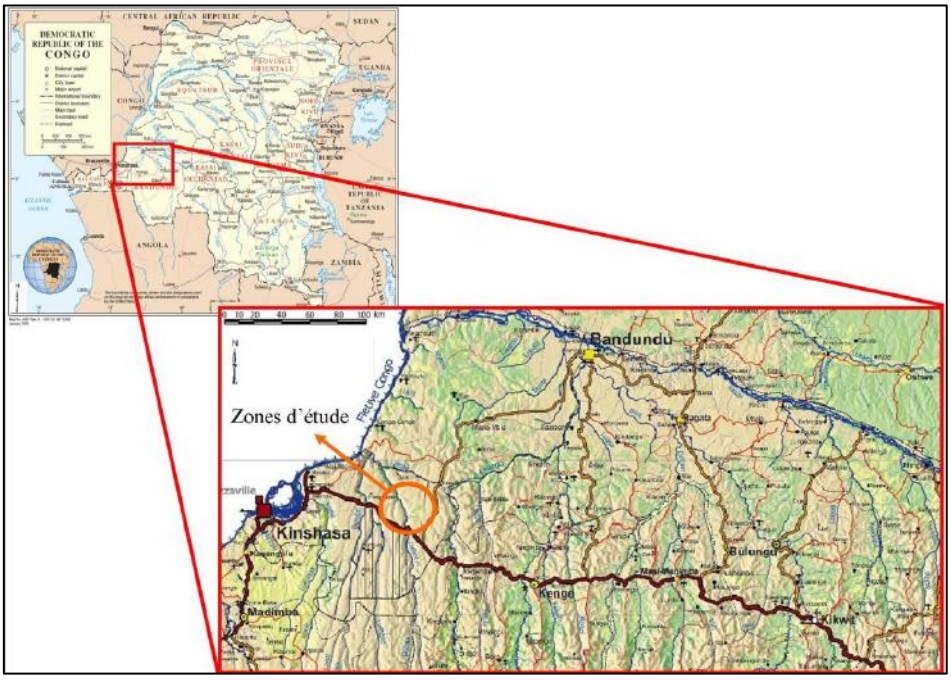


Figure 1 : localisation des zones d'étude[1]

La région dans laquelle s'est déroulée l'étude est située en République Démocratique du Congo, dans la Province de Kinshasa, sur les plateaux Batéké. Deux sites ont été étudiés : Ibi-station, situé à 16° de longitude est et à -4° de latitude sud et le site de Mampu, situé à une vingtaine de km de la station Ibi. Ces deux sites sont différents de par leur gestion et par les activités s'y déroulant. Ils seront décrits plus loin dans le texte.

Les plateaux Batéké s'étendent sur une surface de plus ou moins 12 000 km² et se partagent entre trois pays : le Gabon, le Congo et la République Démocratique du Congo. Cette région ne présente pas beaucoup de dépressions et son altitude moyenne varie entre 600 et 886 m. Quatre sous-régions peuvent être décrites en fonction du réseau hydrographique : le plateau Koukouya, le plateau Djambala, le plateau Nsa et le plateau M'bé ou plateau Batéké sur lequel s'est déroulée l'étude.

[1] Site officiel de l'unité géomatique de l'Université catholique de Louvain, concernant la République Démocratique du Congo, disponible sur : http://sites.uclouvain.be/enge/maps/UCL_RDC/, [consulté le 16 mai 2011]
Cartographie de la République Démocratique du Congo par les Nations Unies, disponible sur : http://www.un.org/Depts/Cartographic/map/profile/drcongo.pdf,[consulté le 17 mai 2011)]

b) Climat

Le climat est de type tropical humide avec des précipitations annuelles moyennes de 1500 mm et une température de 24-25 °C. On peut distinguer deux saisons sèches, de mai à mi-septembre et de janvier à février, ainsi que deux saisons humides, de mi-septembre à décembre et de mars à mi-mai. Les températures les plus basses sont observées durant la saison sèche où elles peuvent chuter en-dessous de 10°C. L'humidité atmosphérique est élevée avec des valeurs proches de 80 %.

c) Végétation

Le plateau Batéké est essentiellement recouvert de savane herbeuse et arbustive avec la présence à certains endroits, de zones boisées d'origine principalement anthropique. Localement, aux alentours de la station Ibi et du site de Mampu, la savane est dominée par deux espèces herbacées : *Hyparrhenia diplandra* et *Hymenocardia acida* (Novacel (2009)). Les espèces herbacées et arbustives présentes dans les zones de savane sont des espèces majoritairement tolérantes aux feux de savane qui ravagent très fréquemment la région. Ces feux sont souvent d'origine anthropique. La présence de ces feux serait à l'origine de la dominance de la savane par rapport aux forêts. En effet, la forêt ne peut pas se régénérer à cause de la fréquence de ces feux et seules les espèces tolérantes aux feux, typiquement celles que l'on retrouve dans les savanes, y trouvent leur place (Apani (1990)).

Les vallées sont quant à elles potentiellement recouvertes de forêts comprenant des espèces typiques des zones tropicales humides et sont probablement le vestige des anciennes forêts humides qui couvraient les plateaux il y a 3000 ans (Apani (1990)).

d) Géologie

Selon Apani(1990) et Le Marechal (1966), il faut se référer aux travaux de Cosson (1955) pour décrire la série stratigraphique que l'on retrouve sur les plateaux Batéké. Cosson définit deux séries gréseuses et sableuses de bas en haut :

- *La série de Stanley-Pool, formée au Crétacé et reposant en discordance sur les grès de l'Inkisi du Précambrien supérieur. Cette série comprend trois niveaux :*
  - *Un niveau inférieur d'argilites rouges qui a été découvert dans des sondages à Brazaville et dont aucun affleurement n'est connu*
  - *Un niveau moyen de grès compacts blancs localement indurés, parfois lités sans stratification entrecroisée. Un affleurement est connu à Brazaville*
  - *Un niveau supérieur de grès kaoloniques tendres et jaunes avec stratification croisée*

- *La série des Plateaux batéké, d'âge tertiaire, dont le contact avec la série du Stanley-Pool n'a jamais pu être observé à cause de la grande quantité de sables provenant de la désagrégation des grès des plateaux. Cette série comprend deux niveaux :*
  - *Un niveau inférieur, d'une épaisseur de plus ou moins 300 mètres, composé de grès polymorphes datant de l'Eocène. Ces grès sont tendres et à grains fins réguliers. Les teintes sont variables et au niveau du sommet, des niveaux silicifiés apparaissent, formant des grès quartzeux et calédonieux. Une couche de grès tendres de couleur*

blanche se superpose à ces grès. C'est à partir de cette couche que des sables sont formés par désagrégation des grès.

- *Un niveau supérieur d'une épaisseur de 20 à 90 mètres, composé de sables ocres, datant du Néocène. Ce niveau repose en concordance sur le niveau précédent et les sables ocres recouvrent uniformément la surface des Plateaux Batéké.*

Il est à noter que l'épaisseur des deux séries peut varier fortement en fonction de l'endroit où l'on se situe, et ce dans le sens nord-sud.

e) Pédologie[2]

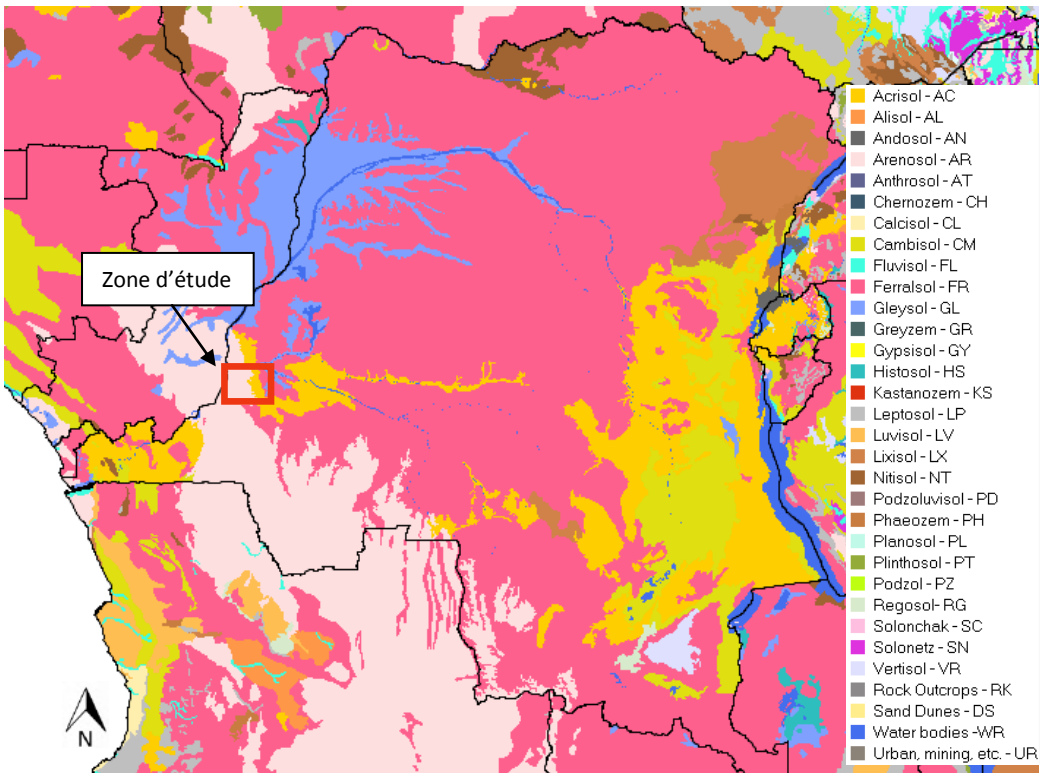


Figure 2 : cartographie de la pédologie de la République Démocratique du Congo (source : Harmonised World Soil Database, disponible sur: http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/index.html, [consulté le 21 mai 2011])

Descriptif des Arénosols :[3]

Ce descriptif se base sur les travaux de B.Guillot et B.Peyrot (1979) et Kasongo *et al.* (2009).

Les sols sont sableux et classés « Rubic Ferralic Arenosols » selon la classification WRB (2006) comme le montre la carte ci-dessus, appelés également Psamments, selon la classification américaine (US Soil Taxonomy). Les Arénosols occupent 10% de la surface terrestre, ce qui correspond à une surface de plus ou moins 480 millions d'hectares (Van Wambeke, 1995). Ils se

[3] CD-ROM du livre « Lectures Notes on the Major soils of the World (World Soil Ressources Reports,94, FAO, 2011) », disponible sur : http://www.isric.org/Isric/Webdocs/Docs/Major_Soils_of_the_World/start.pdf [consulté le 21 mai 2011]

forment sous tous types de climats : de sec à humide et de froid à chaud. Ils se développent sur un matériau parental non consolidé et sont chimiquement pauvres. Ils sont constitués principalement (Kasongo et al. (2009)) de quartz, de kaolinite et de quelques résidus d'oxydes d'aluminium et de titane.

Leur capacité d'échange cationique est généralement très faible, avec des valeurs ne dépassant pas 10 cmolc/kg sol, et leur capacité à stocker les bases est également très faible avec des valeurs inférieures à 0,40 cmolc/kg sol. Ces sols sont acides avec des valeurs de pH-eau inférieures à 5. Les teneurs en carbone sont excessivement basses (< 1%). Il en est de même avec les teneurs en azote qui n'excèdent pas 0,05%.

Les Arénosols ont une conductivité hydraulique saturée qui peut fortement varier d'un endroit à l'autre : de 300 à 30 000 cm par jour. L'infiltration de l'eau dans ces sols est très rapide et varie entre 2,5 et 25 cm par heure. Les eaux de surface ont donc tendance à ne pas ruisseler mais plutôt à s'infiltrer. Cette propriété des sols permet de limiter les risques d'érosion.

Au vu de leur faible fertilité chimique et leur faible capacité à retenir l'eau, l'agriculture sur ses sols peut s'avérer difficile et il faut adapter le type d'espèce à ce type de milieu. Il est à noter que ces sols sont quand même exploités sur les plateaux Batéké, principalement en vue de la production de manioc (*Manihot esculenta L.*), de maïs (*Zea mays L.*) et d'arachides (*Arachis hypogea L.*).

Les densités apparentes des sols de type Arénosols que l'on retrouve sur les plateaux Batéké, ont des valeurs comprises entre 1,5 et 1,7 g/cm³ et la taille moyenne de leurs pores est assez élevée, leur conférant ainsi une bonne aération et un bon drainage et donc une faible capacité de rétention en eau, comme expliqué précédemment. En l'absence de végétation, ces sols ne présentent pas une structure cohérente et leur matériau est composé de grains de sable non assemblés. La végétation, de part son apport en matière organique permet de cimenter les grains de sable entre eux et de former des sols plus cohérents.

2. Description des projets

a) Ibi-village[4]

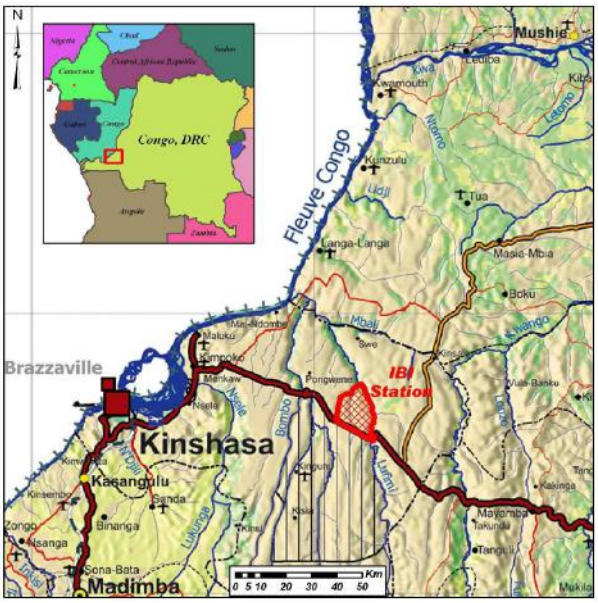


Figure 3 : carte de localisation de la station Ibi (source : Novacel (2009). Clean Development Mechanism Project Design Document Form for Afforestation and Reforestation Project Activities (CDM-AR-PDD) Version 04.

La station Ibi se situe au nord de la Nationale reliant Kinshasa à Kenge, entre la borne kilométrique 128 et la borne 143. Sa superficie s'élève à 22 000 hectares.

Ibi-station a été choisi comme lieu pour l'installation d'un projet de puits de carbone sur les plateaux Batéké par la société familiale Novacel qui a été fondée en 1985 par Paul M.Mushiete. L'objectif premier de cette société était uniquement basé sur de l'agroforesterie et la production de charbon de bois. A la fin des années 90, la société décida de continuer l'agroforesterie avec la construction d'une usine à manioc, ainsi que la production de charbon de bois, tout en créant un puits de carbone dans un souci de durabilité. Le projet puits de carbone a été officiellement enregistré par la CCNUCC (La Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques) le 28 février 2011. L'ensemble du projet porte le nom de Ibi-village car il vise non seulement à une activité agro forestière rentable mais également à l'augmentation de la qualité de vie locale via des projets sociaux coordonnés par l'ONG (Organisation Non-Gouvernementale) présente sur place : GI-AGRO (Groupe d'Initiatives pour l'Agroforesterie en Afrique), aidée par l'asbl SLCD (Service Laïque de Coopération au Développement). Le projet s'inscrit donc pleinement dans le concept de développement durable avec ses trois piliers :

- **Environnement** avec la création d'un puits de carbone contribuant à la lutte contre le réchauffement climatique,
- **Economie** : création d'une entreprise agro forestière rentable,

[4] Site officiel du projet Ibi-village, disponible sur : http://www.ibi-village.cd, [consulté le 23 mai 2011]
Project Design Document Form for afforestation and reforestation project activities (CDM-AR-PDD), version 04.

- **Social** : amélioration du bien-être des populations locales par l'emploi, l'éducation et la santé.

A terme, plus ou moins 4200 hectares seront plantés. Les principales essences forestières envisagées sont : *Acacia auriculiformis*, *Acacia mangium*, *Acacia crassicarpa*, *Pinus sp*., *Eucalyptus sp.*, ainsi que des essences locales. La majorité de la surface est plantée selon un système d'agroforesterie, alternant la plantation d'arbres, avec la plantation de manioc. Avec la construction de l'usine à manioc, tous les mois, plusieurs tonnes de cossettes de manioc et de farine sont produites et vendues sur place ou à Kinshasa.

Les arbres récoltés après rotation sont utilisés pour la production de charbon de bois, source majeure d'énergie pour les habitants de la région et ceux de Kinshasa. Cet objectif permet de réduire la pression exercée sur les forêts environnantes par les habitants qui vont couper les arbres dans ces forêts afin de trouver des combustibles, contribuant ainsi à la déforestation de cette région.

L'objectif du puits de carbone est de séquestrer à terme, plus ou moins un million de tonnes de CO2, pendant une durée de 30 ans. Si cette cible est atteinte, Ibi-village constituera un des plus grand puits de carbone en République Démocratique du Congo et surtout le premier projet de ce type et d'une telle envergure, commencé avant les années 2000.

En plus des trois partenaires (Novacel, GI-Agro et le SLCD) réunis autour du projet Ibi-village, une quatrième société vient renforcer le projet : Profinaf Invest qui apporte une aide en ce qui concerne les projets s'inscrivant dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Ibi-village emploie 35 personnes en permanence et plus ou moins 400 ouvriers temporaires. A ceux-ci, s'ajoutent des personnes venant donner un coup de main ponctuel, permettant ainsi de dynamiser le projet.

b) Mampu[5]

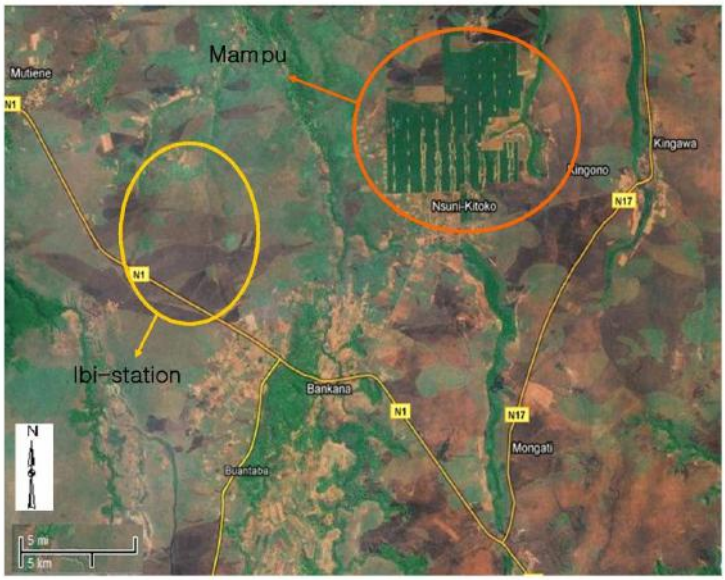


Figure 4 : localisation du projet à Mampu

Mampu est situé à 140 km de Kinshasa et à une vingtaine de kilomètres de la station Ibi. Sa superficie est de 8000 hectares divisée en parcelles de 25 hectares gérées par des familles. Au total, plus ou moins 300 familles sont présentes et gèrent chacune leur surface.

Tout comme Ibi-village, Mampu est un projet innovant en agroforesterie puisqu'il associe la culture vivrière (manioc) avec la plantation *d'Acacia auriculiformis*. A la différence avec Ibi-village, le projet de Mampu a pour unique objectif de produire des cossettes de manioc et du charbon de bois à partir des *Acacia*s plantés à cette fin. Le projet ne s'inscrit donc pas dans un objectif de séquestration de carbone.

Plusieurs partenaires ont aidés à la constitution de ce projet :

- La Fondation Hanns Seidel qui est « au service de la démocratie, de la paix et du développement »[6] et qui a été créée en 1967 en Allemagne,
- La Commission Européenne via sa Délégation présente à Kinshasa,
- Le CADIM, le Centre d'Appui au Développement Intégrée de Mbankana, qui est une ONG congolaise basée à Mbankana (plateaux Batéké) dont l'objectif est de réduire la pauvreté dans cette région et d'assurer la sécurité alimentaire. Son champ d'action ne dépasse pas un rayon de 80 km autour du village de Mbankana. Elle est soutenue par la Fondation Hanns Seidel.

Historiquement, le site de Mampu avait été choisi par les autorités zaïroises pour être le lieu d'un grand projet industriel visant à la production intensive de charbon de bois à destination de Kinshasa. L'entreprise hollandaise HVA avait été retenue pour être à la tête de ce projet. La société y planta 8000 hectares d'acacias entre 1987 et 1992. Forcée à quitter le pays suite à l'instabilité du

[5] Site officiel du site de Mampu, disponible sur : http://www.mampu.org, [consulté le 23 mai 2011]
[6] Site officiel de la fondation Hanns Seidel , disponible sur :http://www.hss.de/, [consulté le 23 mai 2011]

pays en 1992, cette société abandonna le projet qui fut alors repris par la Fondation Hanns Seidel avec la collaboration étroite de la Délégation de la Commission Européenne à Kinshasa et le Ministère de l'Environnement zaïrois, puis congolais.

3. *Acacia auriculiformis*

Cette étude porte uniquement sur l'influence de l'espèce *Acacia auriculiformis* sur les propriétés du sol. Il est donc important de s'intéresser un peu plus en détail à cette espèce. Le descriptif ci-dessous se base sur la fiche descriptive de cette espèce, élaborée par G. M. Gnahoua & D. Louppe (2003).

L'*Acacia auriculiformis* appartient à la famille des Fabaceae et à la sous-famille des Mimosoideae. Son nom scientifique complet est : *Acacia auriculiformis* (A. Cunn ex Benth). Et il peut parfois prendre le nom de *Racosperma auriculiforme* (A. Cunn ex Benth.) Pedley.

Son aire d'origine comprend le nord de l'Australie, la Papouasie Nouvelle-Guinée et l'Indonésie. Dans ces régions, les températures annuelles sont généralement supérieures à 26°C et par conséquent, cette espèce n'est pas adaptée à des conditions climatiques froides. Par contre, au niveau de la pluviométrie, cette espèce est tolérante à la fois à la sécheresse, mais supporte aussi les fortes pluies qui peuvent parfois tomber dans les régions tropicales.

Sa répartition géographique est très vaste avec une distribution en altitude comprise entre le niveau de la mer et 1000 mètres. Il peut croître sur un large éventail de sols, y compris sur des sols acides et chimiquement pauvres, comme le sont les arénosols. C'est une espèce fixatrice d'azote car elle se développe en symbiose avec des *Rhizobiums* et des *Bradyrhizobium*.

Dans son aire d'origine, cet arbre peut atteindre des hauteurs de 30 mètres et des diamètres de 60 cm, avec un houppier le plus souvent sphérique et dense. Malgré les dimensions qu'il peut prendre, cet arbre est rarement utilisé dans l'industrie du bois sauf en ébénisterie et dans l'industrie du papier. Il est par contre, dans la majorité des cas, la source principale dans la production de charbon de bois et de bois de chauffage car son pouvoir calorifique est très élevé. Dans certaines régions, on le plante en vue d'améliorer des sols dégradés ou chimiquement pauvres, profitant ainsi de sa capacité à fixer l'azote atmosphérique via ses nombreuses symbioses.

Il est à noter également que le feu peut avoir un impact considérable sur cet arbre car il a tendance à décoller l'écorce, le rendant ainsi plus sensible aux maladies, comme par exemple l'invasion de termites dans le bois. Il peut s'hybrider assez facilement avec une autre espèce d'acacia : *Acacia mangium* et il n'est dès lors pas rare de rencontrer des hybrides des deux espèces dans des plantations *d'Acacia auriculiformis*.

Matériel et Méthodologie

1. Généralités

Ce mémoire a pour objectif de déterminer l'influence de l'Acacia auriculiformis sur certaines propriétés du sol : le pH, les teneurs en carbone et en azote et les concentrations en éléments échangeables et totaux. Pour atteindre cet objectif, des échantillons de sol ont été prélevés dans une chronoséquence d'acacias sur deux sites d'étude distincts. Les âges étudiés sont : 1, 3, 7 et 14 ans. Des échantillons ont également été prélevés dans la savane d'Ibi-station en vue de permettre l'identification des propriétés physicochimiques qui régnaient sur ce site avant les plantations d'acacias.

Pour avoir une idée des stocks dans l'ensemble des compartiments de l'écosystème, des échantillons de litière et de végétation herbacée ont été récoltés et leurs teneurs en carbone et azote, ainsi que leurs stocks en éléments totaux ont également été déterminés.

Cette étude s'inscrit dans la continuité d'autres recherches réalisées sur les mêmes sites d'études, par d'autres étudiants mémorants (Gengler, Cassart (2011)). Leurs études visent à évaluer les stocks en carbone et les stocks en éléments totaux dans l'*Acacia auriculiformis* en fonction de leur âge et leur circonférence. Ces études permettront d'identifier l'efficacité du puits de carbone installé dans la station Ibi et également de définir s'il existe un risque d'exportation minérale lors de l'abattage et exportation des arbres des sites étudiés.

Les échantillonnages et le conditionnement des échantillons ont duré plus ou moins 12 semaines durant les mois de juillet, août et septembre 2010. Le temps estimé pour les analyses en laboratoire s'élève à environ 11 semaines.

2. Choix du site

Le site d'Ibi-station a été choisi pour l'échantillonnage dans des peuplements âgés de 1 et 3 ans, ainsi que pour l'échantillonnage dans la savane.

Etant donné que la station Ibi n'offrait pas la possibilité d'échantillonner dans des peuplements plus âgés, le site de Mampu a été retenu pour réaliser les prélèvements dans des peuplements âgés de 7 et 14 ans.

Il est à noter que le peuplement âgé de 7 ans succède à une première rotation. Le sol a donc déjà été influencé pendant 14 ans par les acacias, mais suivant deux périodes de 7 ans. Il en résulte qu'on ne peut pas considérer ce peuplement comme étant âgé de 7 ans pour l'interprétation des résultats issus des analyses des échantillons de sol. Il faudra donc nuancer les résultats.

Les plantations d'acacias dans le site d'Ibi-station ont une densité de plus ou moins 1000 individus par hectare, soit une distance de 3 mètres entre chaque acacia. Pour le site de Mampu, les densités de plantation sont plus élevées, et sont de l'ordre de 1500 individus par hectare.

3. Echantillonnage

a) Installation des placettes

La récolte des échantillons sur le terrain s'est déroulée suivant le schéma explicatif présenté ci-dessous (figure 5). Les placettes sont centrées sur les axes de plantations et leur longueur s'élève à 57 mètres puisqu'elles comprennent 20 individus distants de 3 mètres. Leur largeur est égale à 3 mètres, comme le montre la figure ci-dessous. La surface totale de chaque placette est donc de : 3*19*3=171 m². Chaque sous-placette de prise d'échantillon est un rectangle d'une surface de 2 m². Une placette comprend 3 sous-placettes et possède donc une surface de 6 m². Les sous-placettes de prises d'échantillons se situent perpendiculairement à l'axe de plantation.

L'installation des placettes dans la savane s'est déroulée selon le même schéma, malgré l'absence d'acacias. En effet, les distances ont été calculées de manière à ce que les sous-placettes soient placées à la même distance les unes par rapport aux autres. Les surfaces des placettes sont donc identiques à celles établies dans les peuplements d'acacias.

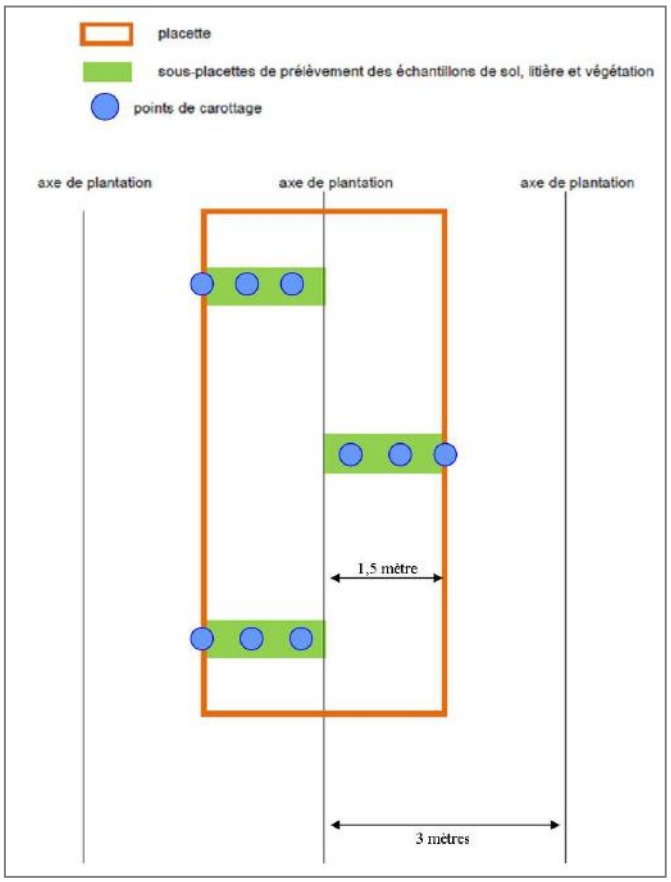


Figure 5 : Schéma illustrant la prise des échantillons sur le terrain

Etant donné qu'un feu de savane a ravagé le peuplement de 3 ans début juillet 2010, des placettes ont été effectuées à la fois dans la zone brûlée de ce peuplement, ainsi que dans une zone préservée des flammes. Les échantillons de litière et de végétation n'ont été prélevés que dans cette dernière zone vu que ces deux compartiments ont entièrement brûlé dans la zone touchée par le feu de savane.

Le nombre de placettes réalisées diffère selon le couvert végétal et les peuplements:

- 15 placettes ont été délimitées en condition savane,
- 20 placettes dans le peuplement de 1 an,
- 23 placettes dans la zone brûlée du peuplement âgé de 3 ans, ainsi que 5 sous-placettes supplémentaires dans la zone non-brûlée du peuplement de 3 ans,
- 4 placettes dans le peuplement de 7 ans,
- 5 placettes dans le peuplement de 14 ans.

Le nombre d'échantillons prélevés n'est pas identique d'un peuplement à l'autre en raison des variations de surface dans chaque peuplement échantillonné.

b) Prélèvement et conditionnement des échantillons de sol

Dans chaque sous-placette, les échantillons ont été prélevés à trois endroits différents (ce qui correspond aux cercles bleus sur la figure 5). Ces trois points de carottage sont distants de 0,5 m et le premier point est séparé de l'axe de plantation de 0,5 m. Pour chaque carottage, deux échantillons ont été prélevés à deux profondeurs différentes : 0-25 cm et 25-50 cm. Les neuf échantillons récoltés par placette et par profondeur ont été mis ensemble afin de constituer un seul échantillon composite par placette. Il y a donc deux échantillons composites par placette étant donné que nous avons deux profondeurs différentes. En plus de cela, afin de mesurer la densité apparente du sol, un échantillon a été prélevé à une profondeur de 12,5 cm dans un seul point de carottage par sous-placette. Cette prise s'est effectuée à l'aide d'un cylindre métallique dont le volume est connu et vaut 100 cm^3.

Les échantillons composites ont été ramenés en Belgique et ont été utilisés pour les analyses en laboratoire. Les échantillons destinés à mesurer la densité apparente ont été mis à l'étuve sur place à 105 °C afin de déterminer le poids sec de chaque échantillon. La densité apparente est le rapport entre le poids sec de l'échantillon et le volume du cylindre et s'exprime en g/cm^3.

Le tableau ci-dessous récapitule la quantité d'échantillons composites qui ont été ramenés en Belgique pour chaque profondeur.

Tableau 1 : Nombre d'échantillons ramenés en Belgique

Couvert végétal/peuplement	Nombre d'échantillons composites
Savane	15
1 an	20
3 ans (zone brûlée)	23
3 ans (zone non-brûlée)	5
7 ans	4
14 ans	5

c) Prélèvement et conditionnement des échantillons de litière

La litière a été prélevée sur chaque sous-placette et a été pesée à l'état frais. Nous pouvons donc en déduire le poids frais total de la litière par placette. Un échantillon de chaque sous-placette a été prélevé et mélangé aux échantillons issus des autres sous-placettes. La quantité prélevée de chaque sous-placette est proportionnelle au rapport entre le poids de la sous-placette et le poids total de la placette. Il en résulte donc un échantillon composite pour chaque placette.

Les échantillons composites ont été mis à l'étuve sur place à 70°C afin d'en déterminer le poids sec. Pour chaque échantillon de savane, 3 ans, 7 ans et 14 ans, 40 g ont été prélevés et ramenés en Belgique. En ce qui concerne les échantillons des peuplements âgés de 1 an, des échantillons composites ont été réalisés de la manière suivante : 10 g de chaque placette ont été prélevés et mélangés à trois autres échantillons issus d'autres placettes. La combinaison des placettes s'est faite de manière aléatoire par tirage au sort.

Les échantillons ont été préalablement broyés et ramenés en Belgique dans le but d'effectuer leur analyse en laboratoire. En Belgique, ils ont été broyés plus finement à l'aide d'une broyeuse mécanique.

Le tableau ci-dessous reprend le nombre d'échantillons ramenés en Belgique.

Tableau 2 : Nombre d'échantillons ramenés en Belgique

Couvert végétal/peuplement	Nombre d'échantillons composites
Savane	15
1 an	5
3 ans	5
7 ans	3
14 ans	5

d) Prélèvement et conditionnement des échantillons de végétation

La prise des échantillons de végétation, leur mise à l'étuve et la constitution des échantillons composites se sont déroulées selon le même protocole que la litière. Les échantillons ont été également préalablement broyés sur place et broyés plus finement au laboratoire en Belgique. Cependant, dans les peuplements âgés de 7 ans et 14 ans, aucune végétation herbacée n'était présente car elle avait déjà été recouverte par la végétation ligneuse constituant la strate arbustive. De plus, dans les peuplements de 7 ans, cette végétation ligneuse avait déjà été abattue dans l'objectif de préparer le terrain en vue de l'abattage imminent des acacias présents dans cette parcelle. Toutefois, un inventaire des espèces ligneuses présentes sous les arbres âgés de 14 ans a été établi, et ce sous forme de placettes circulaires. Chaque individu présent dans un rayon de 12,6 m autour d'un acacia choisi, a été identifié et sa circonférence à 1,3 m a été mesurée. Chaque placette présente donc une surface de 5 ares. Deux placettes circulaires ont été établies et les résultats se trouvent à l'annexe 1. Pour chaque placette, les circonférences équivalentes ont été calculées pour tous les individus présentant plusieurs troncs. La circonférence équivalente se calcule selon l'équation :

$$Cequ = \sqrt{\sum_i^n Ci^{\,2}}\ ,$$

avec Ci, les circonférences mesurées à 1,3 mètre.

Le nombre d'individus par hectare, pour chaque espèce, y compris l'Acacia auriculiformis, a été mis sur un graphique en fonction des classes de circonférences. Les résultats pour l'Acacia auriculiformis proviennent des études réalisées par Gengler et Cassart (2011). Les surfaces terrières ont également été calculées et reportées sur un graphique en fonction des peuplements.

Le nombre d'échantillons ramenés en Belgique est repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Nombre d'échantillons ramenés en Belgique

Couvert végétal/peuplement	Nombre d'échantillons composites
Savane	15
1 an	5
3 ans	5

4. Analyses chimiques

a) Sol

i. pH

Les mesures des pH des échantillons de sol ont été réalisées avec deux solutions différentes : H_2O et $CaCl_2$ selon le protocole suivant : 5g d'échantillon ont été mélangés à chaque solution, selon un rapport 5:1, et mis au mélangeur pendant 2h. Après cette étape, les pH des solutions ont été mesurés à l'aide d'une électrode de verre raccordée à un pH-mètre. Il est à noter que le pH-mètre avait été préalablement calibré à l'aide des solutions standards prévues pour l'appareil. Le pH a été déterminé pour l'ensemble des échantillons ramenés en Belgique.

ii. Cations échangeables

Au vu de la quantité importante d'échantillons ramenés en Belgique, il a été décidé de réduire ce nombre en procédant à la création d'échantillons composites. Au total, cinq échantillons par type de peuplement et type de couvert végétal ont été produits. Il est à noter que pour les échantillons issus des peuplements de 7 et 14 ans, aucun échantillon composite n'a été créé puisque leur nombre ne dépassait pas le chiffre cinq. La constitution des échantillons composites est détaillée à l'annexe 2.

La méthodologie utilisée, décrite en détail à l'annexe 4, consiste en une extraction avec une solution de chlorure de baryum, en utilisant 20 ml de solution et 2g d'échantillon de sol. Les concentrations en éléments échangeables sont déterminées dans la solution d'extraction par ICP-AES. Les éléments analysés sont : Al^{3+}, Ca^{2+}, Fe^{3+}, K^{+}, Mg^{2+}, Mn^{2+} et Na^{+}.

Afin d'obtenir les teneurs effectives en éléments échangeables présents dans les échantillons de sol, le poids sec de chaque échantillon est déterminé en prenant 1g de chaque échantillon et en le plaçant à l'étuve à 105°C.

iii. Carbone et azote

Le principe de l'appareil est le suivant : procéder à une combustion à haute température (900°C) des échantillons et analyser par chromatographie les gaz produits par cette combustion. Le processus de fonctionnement de l'analyseur est décrit brièvement à l'annexe 5.

Dans un premier temps, plus ou moins 15 mg d'échantillon de sol sont pesés et empaquetés dans une capsule d'étain. Cette capsule est ensuite mise dans le passeur d'échantillon de la machine.

Le logiciel accompagnant l'appareil donne les résultats en pourcentage de carbone et pourcentage d'azote.

Afin de pouvoir déterminer les teneurs effectives présentes dans le sol sec, 1g de chaque échantillon est mis à l'étuve à 105°C.

Les mesures des teneurs en carbone et en azote ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons de litière, végétation et de sols, ramenés en Belgique.

iv. Eléments totaux

Etant donné la quantité également importante d'échantillons à analyser, des échantillons composites ont été formés suivant la même constitution que pour les analyses de la CEC des sols. La composition des échantillons composites est située à l'annexe 2.

Les éléments totaux ont été mesurés en utilisant la méthodologie par digestion totale avec HNO_3/HF au four à micro-ondes. Cette méthodologie est décrite en détails à l'annexe 6. Le poids de sol prélevé était de 200 mg. Les volumes respectifs de HNO_3 et de HF étaient de 2ml, et après la minéralisation 8 ml d'HNO_3 ont été ajoutés pour la phase d'évacuation des vapeurs de l'échantillon. L'échantillon sec a été transvasé dans un erlen de 25 ml à l'aide d'eau millQ et la solution a été portée au trait de jauge. La solution a été ensuite analysée à l'ICP-AES pour doser les éléments totaux : Ca, K, Mg, Na, P, S, Al, Mn et Fe.

Afin de pouvoir déterminer les teneurs effectives présentes dans le sol séché, 1g de chaque échantillon est mis à l'étuve à 105°C.

b) Litière et végétation

i. Carbone et azote

Le principe de la manipulation est identique à celle évoquée pour les analyses des échantillons de sol. La quantité de litière et végétation est cependant inférieure : elle est de l'ordre de 10 mg par échantillon.

Les teneurs effectives en carbone et en azote dans les échantillons de litière et de végétation sont déterminées en calculant le taux d'humidité des échantillons analysés selon le même principe que pour les échantillons de sol : 1g d'échantillon est placé à l'étuve à 70°C.

Les analyses ont également été réalisées sur l'ensemble des échantillons ramenés en Belgique.

ii. Eléments totaux

Tous les échantillons n'ont pas été analysés. Des échantillons composites ont été réalisés suivant la même démarche que pour les sols. Le détail concernant la fabrication de ces échantillons composites est présenté à l'annexe 2.

La méthode, décrite à l'annexe 6, consiste en une minéralisation des végétaux par de l'acide nitrique au four à micro-ondes. Brièvement, 8 ml d'acide nitrique sont placés dans un tube en téflon contenant 1g d'échantillon et le tube est laissé au repos pendant 12 heures avec le bouchon fermé. Ensuite, le tube est placé au micro-onde à 200°C pendant 30 minutes, durant lesquelles il subit le programme de minéralisation. L'échantillon est ensuite transvasé dans un erlen jaugé de 50 ml et la solution est portée au trait de jauge à l'aide d'eau milliQ. Cette solution est ensuite filtrée et passée dans l'analyseur ICP-AES en vue de doser les éléments totaux : Ca, K, Mg, Na, P et S.

A nouveau, afin d'obtenir des résultats pour les constituants végétaux séchés (litière et végétation herbacée), l'humidité de chaque échantillon est calculée en plaçant 1 g de chaque échantillon à l'étuve à 70°C.

5. Traitement des données

a) Traitement des données brutes

i. Calcul de la densité apparente pour la profondeur 25-50 cm

Etant donné qu'aucun échantillon n'a été prélevé pour calculer la densité apparente pour la profondeur 25-50 cm, une analyse de corrélation a été établie entre la densité apparente à 12,5 cm et les teneurs en carbone correspondant à la profondeur 0-25 cm. Il en résulte que cette corrélation est très faible et qu'aucune régression linéaire ne permettrait de déduire la valeur de la densité apparente à partir des teneurs en carbone pour la profondeur 25-50 cm. Il faut donc se reporter à la bibliographie pour la déterminer. Selon Schwartz et Namri (2002) et Kasongo (2011), la densité apparente pour la profondeur 25-50 cm ne varie pas sensiblement par rapport à la valeur de la profondeur 0-25 cm. Les mêmes valeurs seront donc utilisées pour les deux profondeurs.

ii. Cations échangeables

L'ECEC totale a été calculée en additionnant tous les éléments mesurés au laboratoire : Al^{3+}, Ca^{2+}, Fe^{3+}, K^{+}, Mg^{2+}, Mn^{2+} et Na^{+}. Elle s'exprime en cmolc/kg sol.

iii. Eléments totaux pour les sols

Le TRB a été calculé en additionnant les valeurs des éléments Ca, K, Na et Mg exprimées en cmolc/kg.

iv. Calcul des stocks pour les sols

Pour calculer les stocks par hectare (kg/ha), la densité apparente du sol a été utilisée pour savoir quelle quantité de sol était présente sur 1 surface de 1 hectare, et sur 25 cm de profondeur, autrement dit, la quantité de sol présente dans un volume de 10 000 cm*10 000 cm*25cm (= 2 500 000 000 cm^3). La quantité de sol présente dans ce volume est calculée en multipliant la densité apparente (g/cm^3) par le volume obtenu. Pour trouver les stocks en éléments par hectare, il suffit de multiplier le résultat en mg/kg sol, par la quantité de sol calculée précédemment.

v. Calcul des stocks pour la litière et la végétation

A partir des productions calculées par hectare, on peut trouver les stocks de carbone et d'azote par hectare pour chaque placette. En effet, il suffit de multiplier les pourcentages de carbone et d'azote par la quantité de matière sèche produite par hectare.

Pour trouver les stocks par hectare (kg/ha) des autres éléments, il suffit de multiplier les résultats exprimés en mg/kg par la quantité de litière ou de végétation produite par hectare (kg/ha), en tenant compte du facteur 1 000 000 de conversion pour passer de mg en kg.

b) Traitements statistiques des données

L'ensemble des traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel JMP 8.

i. Statistiques élémentaires

Les statistiques élémentaires ont été calculées pour chaque couvert végétal, pour l'ensemble des résultats issus du traitement des données : teneurs en carbone, en azote, rapports carbone/azote, teneurs en éléments totaux, les CEC, densité apparente, production de litière et végétation par hectare, stocks de carbone et d'azote par hectare pour la litière et végétation, les éléments totaux et échangeables. Elles comportent les mesures des moyennes, des écart-types, des variances, des minimas et des maximas.

Ces mesures ont été reportées sur les graphiques présentant les teneurs, les productions, les CEC et les densités apparentes en fonction de l'âge des peuplements.

Dans un deuxième temps, les outliers, c'est-à-dire les valeurs aberrantes pouvant se trouver dans le jeu de données, ont été enlevées du jeu de données, à l'aide de la boîte à moustaches pour continuer l'étude statistique des résultats.

ii. Test de Wilcoxon et de Tukey-Kramer

Dans un premier temps, le test de Wilcoxon a été utilisé pour déterminer s'il existe des différences significatives dans les résultats entre les différentes classes d'âges afin de savoir si des tendances peuvent être extraites des résultats. Il faut pour cela, se baser sur la probabilité d'être supérieur à Khi-carré : si celle-ci est inférieure à 0,05, on peut affirmer que les résultats au sein de chaque peuplement sont significativement différents. Ces résultats ne permettent cependant pas de déterminer quels peuplements présentent des valeurs similaires ou significativement différentes. C'est pourquoi, en plus des tests de Wilcoxon, un test permettant de comparer les moyennes a été appliqué : il s'agit du test de Tukey-Kramer (HSD) qui permet de regrouper les peuplements présentant des valeurs semblables. Il est à noter que les conditions pour effectuer ce test ne sont pas remplies (homogénéité des variances et distribution normale). Il aurait fallu trouver un test non paramétrique équivalent pour pouvoir se baser avec certitude sur les résultats de ce test. Néanmoins, ce test peut nous permettre d'interpréter, bien qu'avec précaution, les résultats des analyses au regard des graphiques construits reprenant nos résultats.

Résultats

1. Caractéristiques dendrométriques des plantations

Les résultats des inventaires réalisés lors des pré-échantillonnages dans les peuplements d'*Acacias* (Gengler et Cassart (2011)) ont été mis sur des graphiques reprenant le nombre de tiges par hectare, en fonction de la circonférence.

Pour le peuplement de 14 ans, les résultats issus des placettes circulaires y ont été ajoutés afin de quantifier l'importance de chaque espèce ligneuse accompagnatrice par rapport à l'*Acacia auriculiformis*.

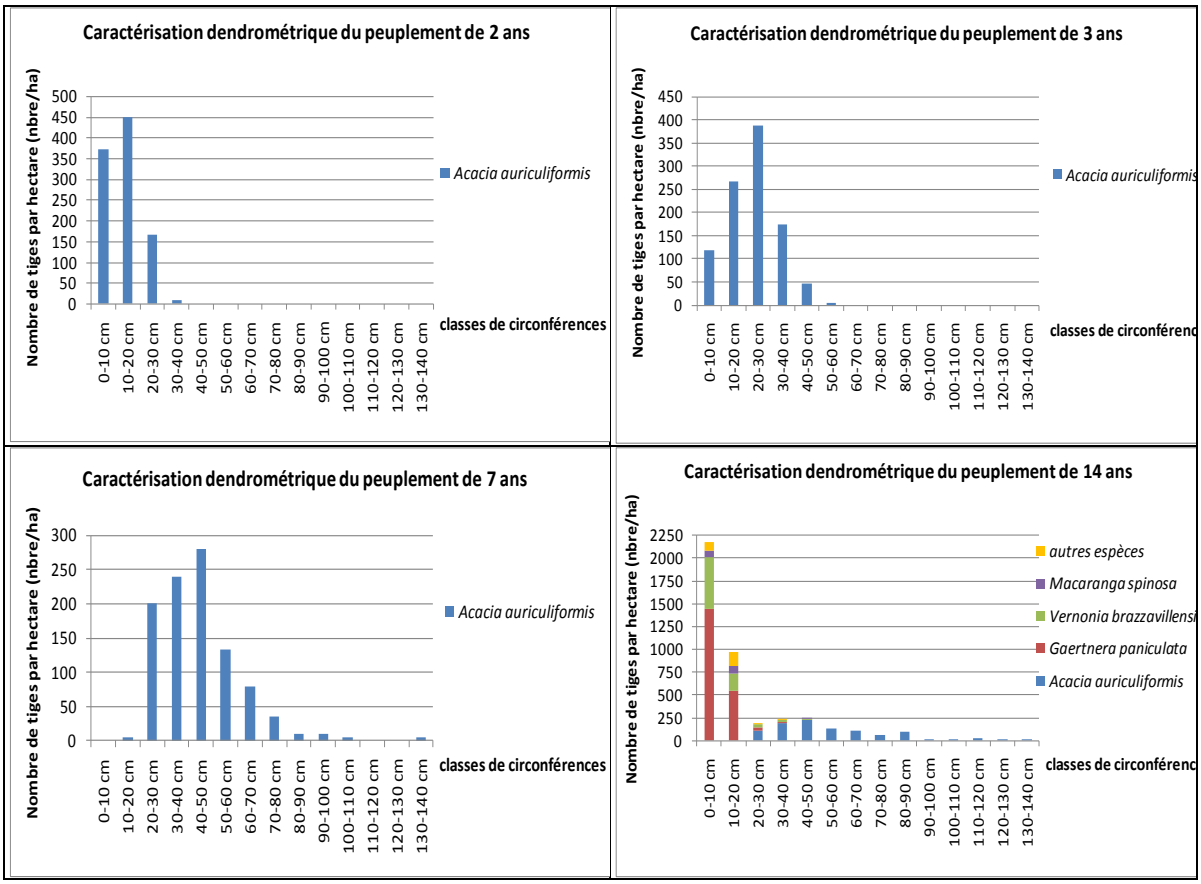


Figure 6 : Nombre de tiges par hectare en fonction des classes de circonférence

Les surfaces terrières ont également été reprises des données de Gengler et Cassart (2011), à l'exception des surfaces terrières de la végétation accompagnatrice qui ont été calculées dans le cadre de ce mémoire. La figure 7 reprend la surface terrière cumulée en fonction des peuplements.

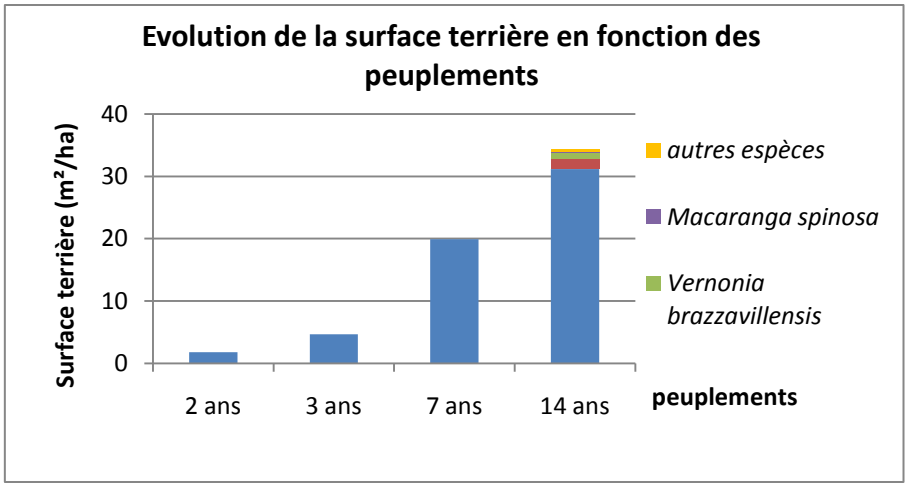


Figure 7 : Evolution de la surface terrière cumulée en fonction des peuplements

Les classes de circonférence dominantes pour le peuplement de 2 ans sont comprises entre 0 et 30 cm. Pour le peuplement de 3 ans, la classe de circonférence dominante est 20-30 cm. Pour le peuplement de 7 ans, elle est de 40-50 cm et pour le peuplement de 14 ans, de 0-20 cm. Cette faible classe de circonférence est due à l'apparition d'une végétation ligneuse accompagnatrice très dense avec de faibles diamètres. En tenant compte uniquement de l'espèce *Acacia auriculiformis*, la classe de circonférence dominante qui apparaît est de 40-50 cm, avec 337 individus par hectare.

Les espèces dominantes accompagnatrices sont *Gaertnera paniculata* et *Vernonia brazzavillensis*. Elles sont majoritairement représentées dans les classes de circonférences comprises entre 0 et 20 cm. Pour les classes de circonférence supérieure, le nombre d'individus par hectare est beaucoup plus faible, et ce pour l'ensemble des espèces accompagnatrices étudiées. Par contre, c'est dans ces classes de circonférences que se situent les acacias, avec des circonférences minimales de 20 cm et maximales de 140 cm. Le nombre maximal d'individus par hectare pour les espèces accompagnatrices est de 2180, ce qui est nettement inférieur au nombre d'acacias que l'ont peut trouver par hectare, même dans la classe de circonférence dominante.

La surface terrière évolue considérablement d'un peuplement à l'autre. En effet, elle passe de 1,8 m²/ha pour le peuplement de 2 ans, à 34,5 m²/ha pour le peuplement de 14 ans. Malgré l'importance considérable des espèces accompagnatrices dans le peuplement de 14 ans, leur contribution à la surface terrière totale de ce peuplement est faible, ce qui est logique puisqu'elles sont représentées uniquement dans des faibles classes de circonférences. La surface terrière de l'espèce *Gaertnera paniculata* vaut 4,65 % de la surface terrière totale, et celle de l'espèce *Vernonia brazzavillensis* vaut 2,65% de la surface terrière totale.

2. Caractéristiques générales des sols

Les tableaux 4, 5 et 6 situés à la page 28, reprennent les moyennes et écart-types des résultats obtenus suite aux analyses en laboratoire.

Les résultats des analyses de pH-eau confirment l'acidité de ces sols, avec des valeurs comprises entre 4,5 et 5,4, pour la profondeur 0-25 cm, et des valeurs comprises entre 4,8 et 5,3, pour la profondeur 25-50 cm.

Les valeurs faibles de l'ECEC confirment également la faible fertilité des sols sur les plateaux Batéké. Ces faibles valeurs indiquent également que l'apport en matière organique est assez limité. L'ECEC est dominée par l'aluminium, qui est proportionnel à l'acidité d'échange, avec en moyenne une valeur de 80% de L'ECEC totale.

Les proportions de chaque cation sur l'ECEC varient d'une profondeur à l'autre. On peut estimer l'ordre d'importance de chaque cation par rapport aux autres, ce qui donne pour la profondeur 0-25 cm : Al >>>Ca >>Mg >>K >Na ≈Fe >>>Mn et pour la profondeur 25-50 cm : Al >>> Ca >>Mg >Fe >Na >K >>>Mn. Bien que les éléments K, Na et Fe ne soient pas placés, en moyenne, dans le même ordre suivant la profondeur, ils présentent en réalité des valeurs similaires et leur ordre d'importance sur le complexe d'échange varie en fonction du peuplement que l'on étudie. Les éléments Al, Ca et Mg sont par contre toujours les cations dominants et le Mn est le cation le moins présent sur le complexe d'échange, ses teneurs sont d'ailleurs inférieures aux limites de détection des analyses chimiques pour la profondeur 25-50 cm.

Les taux de saturation en bases sont largement inférieurs aux taux de saturation des cations acides, avec un taux de saturation des cations acides environ 4 fois supérieur à celui des bases. Ce taux élevé de saturation des cations acides est dû uniquement à l'élément échangeable aluminium, les autres éléments acides étant sous forme de traces.

Les bases ne contribuent pas toutes de la même manière à la somme des bases, et donc au taux de saturation en bases. Le calcium est la base dominante et contribue à raison de 57,3% à la somme des bases. Le magnésium, quant à lui, est la deuxième base et contribue à hauteur de 25% à la somme des bases. Les éléments potassium et sodium ne sont pas beaucoup représentés sur le complexe d'échange, avec respectivement, des proportions de 10,5% et de 7,3 % de la somme des bases.

Les teneurs en azote (< à 0,1%) et en carbone (< 1,2%), ainsi que les stocks en azote (< 1700 kg/ha) et en carbone (< 29 100 kg/ha) sont très faibles, ce qui confirme la pauvreté chimique de ces sols. Le rapport C/N, quant à lui, est inférieur à 27,3.

Le rapport des stocks en carbone sur les stocks en phosphore vaut 33,14 et celui des stocks en carbone sur ceux en soufre vaut 204,3.

Les résultats en éléments totaux montrent la faible réserve en éléments nutritifs. Cependant, les concentrations en aluminium et en fer sont excessivement élevées et sont probablement dues à la présence d'hydroxydes de fer et d'aluminium, qui sont fréquents dans ce type de sol.

Les principaux contributeurs au TRB sont les éléments calcium et magnésium puisqu'ils représentent chacun environ 33,6%. Le potassium possède une contribution intermédiaire (17,8%) et le sodium est l'élément le moins contributeur (15%).

Une comparaison des sommes des bases et des TRB permet de se rendre compte de l'importance des bases échangeables par rapport aux éléments totaux correspondants. La somme des bases est environ 6,5 fois inférieure au TRB, pour la profondeur 0-25 cm et environ 9 fois inférieure pour la profondeur 25-50 cm.

La densité apparente vaut en moyenne 1,154 dans la couche 0-25 cm. Cette valeur est comparable dans la couche 25-50 cm (Schwartz & Namri (2002)).

En conclusion, les sols étudiés sont caractérisés par une faible fertilité chimique, des pH acides et des faibles densités apparentes.

Tableau 4 : Caractéristiques (moyennes et écart-types) des sols-pH, C, N, P, S et densité apparente

profondeur (cm)	pH H2O	pH CaCl2	N (%)	C (%)	C/N	D.A. (g/cm³)	Stocks N (kg/ha)	Stocks C (kg/ha)	P (mg/kg)	S (mg/kg)
profondeur 0-25 cm										
moyennes	5,10	4,25	0,058	0,987	27,3	1,2	1690	29087	300,8	48,7
écart-types	0,37	0,10	0,026	0,239	35,9	0,1	814	9037	61,2	14,9
profondeur 25-50 cm										
moyennes	5,10	4,37	0,047	0,727	17,1		1380	21333	229,8	86,3
écart-types	0,19	0,06	0,018	0,188	8,0		593	6398	38,5	109,4

NB : D.A.= densité apparente

Tableau 5 : Caractéristiques (moyennes et écart-types) des sols- cations échangeables

profondeur (cm)	K^+ (cmolc/kg)	Na^+ (cmolc/kg)	Ca^{2+} (cmolc/kg)	Mg^{2+} (cmolc/kg)	∑ B.E. (cmolc/kg)	Mn^{2+} (cmolc/kg)	Al^{3+} (cmolc/kg)	Fe^{3+} (cmolc/kg)	∑ C.A. (cmolc/kg)	ECEC (cmolc/kg)	TSB (%)	TS Al (%)	TS acides (%)
profondeur 0-25 cm													
moyennes	0,023	0,016	0,128	0,056	0,224	0,002	0,999	0,017	1,017	1,241	18,408	80,153	81,592
écart-types	0,010	0,004	0,043	0,015	0,061	0,002	0,179	0,019	0,186	0,174	5,348	5,336	5,348
profondeur 25-50 cm													
moyennes	0,010	0,015	0,086	0,037	0,148	*traces*	0,928	0,023	0,950	1,098	14,252	83,715	85,748
écart-types	0,003	0,004	0,024	0,008	0,036		0,281	0,033	0,285	0,279	4,770	5,150	4,770

∑ B.E.= somme des bases échangeables (K, Na, Ca et Mg) *; ∑ C.A.*= somme des cations acides (Mn, Al et Fe)
TSB=taux de saturation en bases *; TS Al*= taux de saturation de l'aluminium *; TS acides*= taux de saturation des cations acides

Tableau 6 : Caractéristiques (moyennes et écart-types) des sols- éléments totaux

profondeur (cm)	K (cmolc/kg)	Na (cmolc/kg)	Ca (cmolc/kg)	Mg (cmolc/kg)	Mn (mg/kg)	Al (mg/kg)	Fe (mg/kg)	TRB (cmolc/kg)
profondeur 0-25 cm								
moyennes	0,258	0,218	0,489	0,488	26,950	12807,6	9837,0	1,453
écart-types	0,137	0,176	0,180	0,088	7,134	2284,2	1863,9	0,282
profondeur 25-50 cm								
moyennes	0,239	0,189	0,440	0,462	22,144	14139,8	11067,5	1,330
écart-types	0,184	0,185	0,127	0,088	6,583	3317,8	2366,0	0,385

TRB= somme de K, Na, Ca et Mg exprimés en cmolc/kg

3. Evolution des propriétés des sols selon le type de couvert végétal

Les tableaux suivants reprennent les évolutions des propriétés étudiées en fonction du couvert végétal. Les résultats des tests de Wilcoxon et de Tukey-Kramer y sont également présentés.

Tableau 7 : Evolution des propriétés des sols selon le type de couvert végétal-pH, C, N, P, S et densité apparente

âge du peuplement (années)	pH H2O		pH CaCl2		N (%)		C(%)		C/N		D.A. (g/cm³)		N (kg/ha)		C (kg/ha)		P(mg/kg)		S(mg/kg)	
	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.
profondeur 0-25 cm																				
0	5,33	A	4,22	A	0,026	A	0,96	A	73,0	A	1,07	A	681	A	25393	A B	259,83		39,25	A
1	5,43	B	4,35	B	0,047	B	0,78	B	16,6	B	1,15	B C	1346	B	22715	A	291,40		38,12	A
3 (non-brûlé)	4,49	C	4,16	A	0,066	B	1,03	A	15,7	B	1,11	A B	1840	B C	28730	B C	363,25		66,54	B
7	4,49	C	4,04	C	0,067	B	1,05	A	15,6	B	1,24	C	2087	C	32556	C	309,20		58,04	A B
14	4,46	C	4,06	C	0,067	B	1,02	A	15,2	B	1,24	C	2056	C	31294	C	307,09		53,59	A B
résultats Wilcoxon	*P < 0,0001*		*P < 0,0001*		*P < 0,0001*		*0,001*		*P < 0,0001*		*P < 0,0001*		*P < 0,0001*		*0,0003*		*0,1206*		*0,0132*	
profondeur 25-50 cm																				
0	5,27	A	4,34	B	0,029	A	0,69	A	21,2	A			788	A	17933	A B	216,10	A	288,16	A
1	5,23	A	4,38	A	0,035	A	0,58	A	16,0	B			1012	A B	16221	A	200,14	A	38,31	B
3 (non-brûlé)	4,93	B	4,27	C	0,058	B	1,00	C	17,0	A B			1615	C	27663	C	278,16	B	64,79	B
7	4,83	B	4,31	B C	0,041	A C	0,68	A	16,4	A B			1281	B C	21052	B	219,97	A B	36,95	B
14	4,86	B	4,33	A B	0,048	B C	0,65	A	14,7	B			1494	C	20075	A B	249,63	A B	39,86	B
résultats Wilcoxon	*P < 0,0001*		*0,0002*		*P < 0,0001*		*0,0005*		*0,0007*				*P < 0,0001*		*P < 0,0001*		*0,0316*		*0,0259*	

D.A.= densité apparente

Tableau 8 : Evolution des propriétés des sols selon le type de couvert végétal- éléments échangeables

âge du peuplement (années)	K^+(cmolc/kg)		Na^+(cmolc/kg)		Ca^{2+}(cmolc/kg)		Mg^{2+} (cmolc/kg)		∑ B.E. (cmolc/kg)		Mn^{2+}(cmolc/kg)		Al^{3+}(cmolc/kg)		Fe^{3+}(cmolc/kg)		∑ C.A. (cmolc/kg)		ECEC (cmolc/kg)		TSB (%)		TS Al (%)	
	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.
profondeur 0-25 cm																								
0	0,038	A	0,015		0,111	A	0,056	A	0,220	A	0,001	A	1,097	A B	0,053	A	1,151	A B	1,371	A	16,100	A B	80,010	A B
1	0,028	B	0,018		0,201	B	0,082	B	0,329	B	0,001	A	0,903	B C	0,012	B	0,916	A C	1,245	A B	26,356	C	72,622	D
3 (non-brûlé)	0,013	C	0,015		0,115	A	0,042	A	0,185	A	0,001	A	1,084	A B C	0,004	B	1,089	A B C	1,274	A B	14,540	A B	85,124	A C
7	0,020	C	0,014		0,088	A	0,047	A	0,169	A	0,004	B	1,243	A	0,014	B	1,260	B	1,429	A	11,885	B	86,863	C
14	0,019	C	0,017		0,109	A	0,054	A	0,199	A	0,003	B	0,844	C	0,009	B	0,856	C	1,055	B	19,399	A	79,394	B
résultats Wilcoxon	*0,0003*		*0,3795*		*0,0073*		*0,0018*		*0,0036*		*0,0009*		*0,0115*		*0,0003*		*0,0075*		*0,0390*		*0,0010*		*0,0012*	
profondeur 25-50 cm																								
0	0,013		0,014		0,080	A	0,036		0,143				0,939	A B	0,085	A	1,024	A B	1,167	A B	12,475	A	80,470	A B
1	0,011		0,018		0,103	A	0,046		0,178				0,663	A	0,017	B	0,680	A	0,858	A	20,461	B	77,615	A
3 (non-brûlé)	0,011		0,014		0,102	A	0,038		0,164				0,941	A B	0,004	B	0,946	A B	1,110	A B	14,874	A B	84,721	B C
7	0,007		0,013		0,070	A	0,031		0,121				1,052	A B	0,009	B	1,061	A B	1,182	A B	10,968	A	88,233	C D
14	0,011		0,014		0,069	A	0,033		0,128				1,294	B	0,009	B	1,303	B	1,431	B	9,021	A	90,321	D
résultats Wilcoxon	*0,0639*		*0,9024*		*0,0094*		*0,0732*		*0,0510*				*0,0054*		*0,0013*		*0,0054*		*0,0151*		*0,0021*		*0,0007*	

Limites de détection

∑ *B.E.*= somme des bases échangeables (K, Na, Ca et Mg) ; ∑ *C.A.*= somme des cations acides (Mn, Al et Fe)

TSB= taux de saturation en bases ; *TS Al*= taux de saturation de l'aluminium

Tableau 9 : Evolution des propriétés des sols selon le type de couvert végétal- éléments totaux

âge du peuplement (âge)	K(cmolc/kg)		Na(cmolc/kg)		Ca(cmolc/kg)		Mg(cmolc/kg)		Mn(mg/kg)		Al (mg/kg)		Fe(mg/kg)		TRB(cmolc/kg)	
	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.
profondeur 0-25 cm																
0	0,23	A	0,35		0,42	A	0,51		22,30	A B	14533	A B	12966	A	1,50	
1	0,17	A	0,13		0,59	A	0,41		18,40	A	10255	C	9639	B	1,30	
3 (non-brûlé)	0,40	A	0,10		0,38	A	0,56		34,76	C	15237	A	9324	B	1,44	
7	0,30	A	0,19		0,61	A	0,56		27,85	B	12585	A B C	10307	B	1,65	
14	0,21	A	0,20		0,40	A	0,49		23,23	A B	11845	B C	9469	B	1,30	
résultats Wilcoxon	*0,0217*		*0,0620*		*0,0190*		*0,0577*		*0,0013*		*0,0034*		*0,0042*		*0,1875*	
profondeur 25-50 cm																
0	0,22	A B	0,49	A	0,44		0,53	A B	23,78	A	17592	A	15739	A	1,67	A
1	0,16	B	0,12	B	0,53		0,37	C	15,00	B	10852	B	9944	B	1,19	B
3 (non-brûlé)	0,47	A	0,18	B	0,48		0,57	A	25,83	A	17802	A	10424	B	1,69	A
7	0,18	B	0,13	B	0,46		0,42	B C	17,72	B	12411	B	10329	B	1,20	B
14	0,17	B	0,11	B	0,40		0,44	B C	17,39	B	11333	B	10120	B	1,12	B
résultats Wilcoxon	*0,0080*		*0,0224*		*0,3063*		*0,0011*		*0,0015*		*0,0014*		*0,0113*		*0,0137*	

TRB= somme des bases (K, Na, Ca et Mg)

a) pH

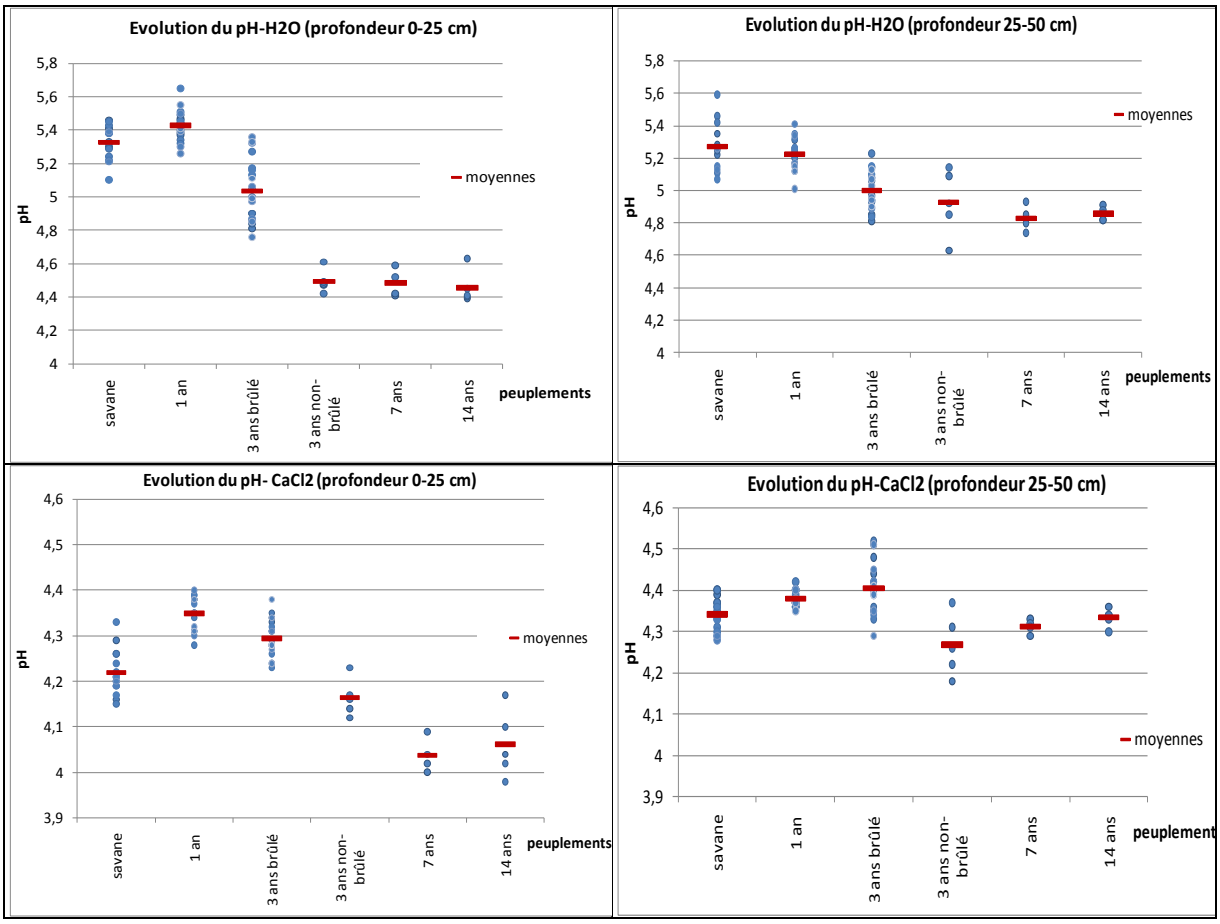


Figure 8 : Evolution des pH en fonction du type de couvert végétal

Les résultats du test de Wilcoxon prouvent que le pH varie significativement en fonction du type de couvert végétal, et ce pour les deux mesures de pH (eau et $CaCl_2$).

En ce qui concerne le pH-eau, les valeurs ont tendance à diminuer avec le vieillissement des arbres, comme le montrent les résultats du test de Tukey-Kramer et les graphiques. En effet, le test de Tukey-Kramer regroupe les peuplements les plus âgés entre eux et les séparent de la savane et des peuplements les moins âgés. En moyenne, le pH sous le peuplement de 14 ans est inférieur de 0,87 unité de pH par rapport au pH sous la savane, pour la profondeur 0-25 cm, et inférieur de 0,41 unité de pH, pour la profondeur 25-50 cm.

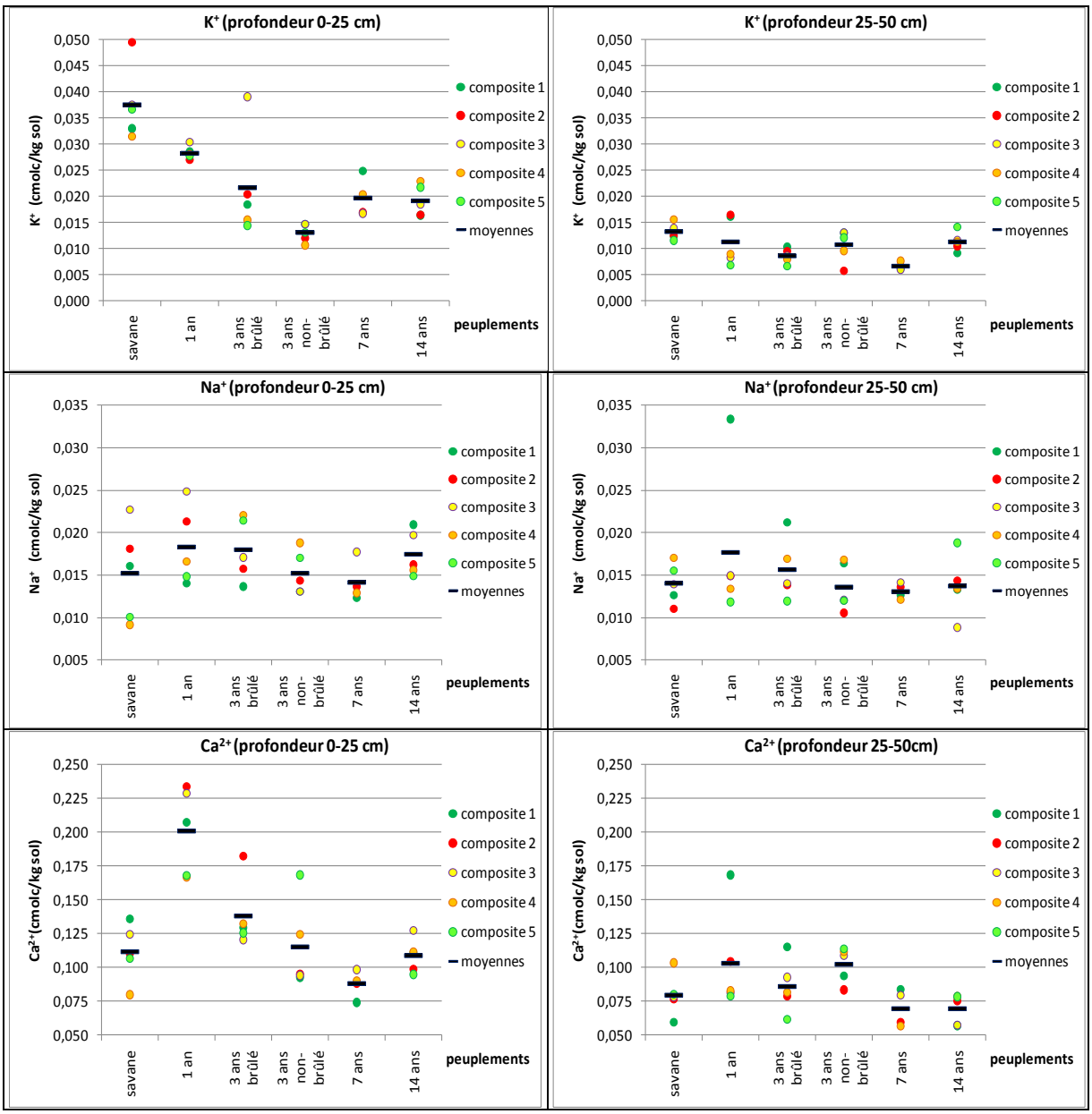
Pour les valeurs de pH mesurées dans le $CaCl_2$, les différences sont moins marquées entre la savane et le peuplement de 14 ans, puisque pour la profondeur 0-25 cm, cette différence n'excède pas 0,16 unité de pH, et pour la profondeur 25-50 cm, elle ne dépasse pas 0,01 unité de pH. On peut donc affirmer que le pH-Cal_2 sous savane et sous le peuplement de 14 ans présentent les mêmes valeurs pour la profondeur 25-50 cm. Le test de Tukey-Kramer regroupe, pour la profondeur 0-25 cm, les valeurs de pH en savane avec celles valables sous le peuplement de 3 ans, mais également les valeurs de pH pour les peuplements de 7 et 14 ans. Les valeurs de pH pour le peuplement de 1 an, sont quant à elles, significativement différentes des valeurs des autres types de couvert végétal. Pour la profondeur 25-50 cm, les regroupements ne sont pas les mêmes. Le premier groupe comprend les valeurs de pH sous le peuplement de 1 et 14 ans, le second groupe est formé par les peuplements

âgés de 7 et 14 ans, ainsi que de la savane. Et enfin, un troisième groupe est composé des peuplements âgés de 3 et 7 ans. Il est à noter que ces différences pour ce type de mesure de pH restent limitées puisqu'elles n'excèdent jamais 0,31 unité de pH pour la profondeur 0-25 cm et 0,11 unité de pH pour la profondeur 25-50 cm.

En considérant le pH-H_2O, on peut en conclure que les sols sous les peuplements plus âgés (≥ 3 ans) sont plus acides, tant pour la couche 0-25 cm que pour la couche 25-50 cm ; les différences entre les peuplements sont plus ténues en ce qui concerne le pH-$CaCl_2$, et l'effet « âge » semble limité à la couche 0-25 cm.

Il est à noter qu'il existe une grande variabilité des résultats au sein de chaque type de couvert végétal, comme le montrent les graphiques.

b) Eléments échangeables



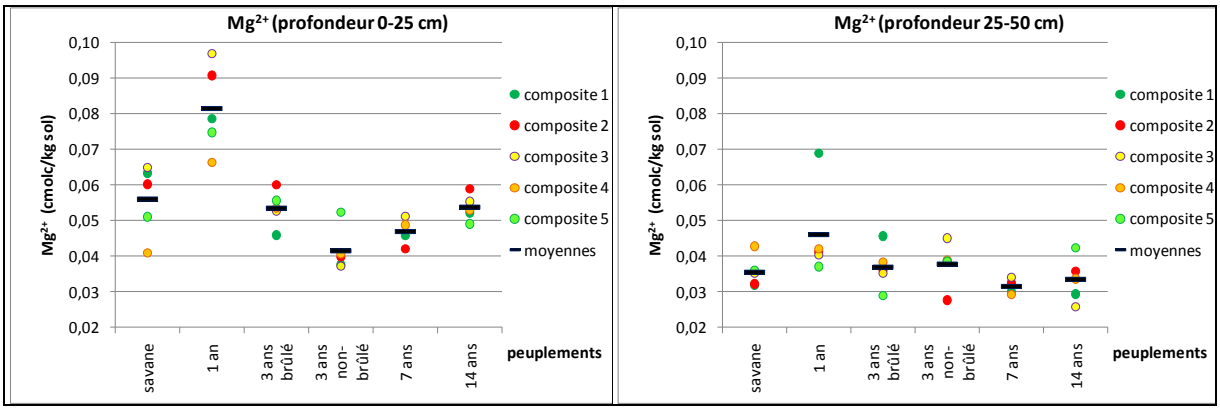


Figure 9 : Evolution des concentrations en bases échangeables selon le type de couvert végétal

Les résultats du test de Wilcoxon permettent de montrer qu'il n'existe pas de différences significatives entre les différents types de couvert végétal pour la base échangeable sodium pour les deux profondeurs et pour les éléments potassium et magnésium pour la profondeur 25-50 cm. Les autres bases échangeables sont donc caractérisées par des valeurs différentes suivant le peuplement auquel on s'intéresse. Bien que le test de Wilcoxon montre qu'il existe des différences significatives pour l'élément calcium à la profondeur 25-50 cm, le test de Tukey-Kramer ne permet pas d'identifier des groupes. Il est dès lors possible d'affirmer que les différences significatives entre valeurs pour les bases échangeables ne sont visibles que pour la profondeur 0-25 cm mais non observables pour l'élément sodium à cette même profondeur.

Le test de Tukey-Kramer pour l'élément potassium montre que les valeurs sont significativement différentes entre les peuplements les plus âgés et les peuplements moins âgés, avec une diminution des concentrations. Les concentrations en savane sont différentes à la fois des peuplements les moins âgés, mais aussi des peuplements les plus âgés. Les différences observées entre la savane et le peuplement de 1 an sont de l'ordre de 0,009 cmolc/kg et entre la savane et le peuplement de 14 ans, elles sont de l'ordre de 0,018 cmolc/kg. Elles sont donc environ 1,3 fois inférieures dans le peuplement de 1 an par rapport à la savane, et environ 2 fois moindres dans le peuplement de 14 ans.

En ce qui concerne le calcium, seul le peuplement de 1 an présente des valeurs significativement différentes des autres types de couvert végétal. Les concentrations observées dans ce peuplement sont en moyenne 2 fois plus élevées que celles observées en savane et dans les autres peuplements.

La même tendance est observée pour l'élément magnésium, bien que la différence entre les valeurs du peuplement de 1 an et les autres, soit moindre. En effet, les teneurs dans ce peuplement sont en moyenne 30 % plus élevée par rapport à la savane et le peuplement de 14 ans, et environ 2 fois supérieure par rapport au peuplement de 3 et 7 ans. Les valeurs en savane sont semblables aux valeurs pour le peuplement de 14 ans.

Etant donné que l'élément calcium est dominant par rapport aux autres bases, il est logique que la somme des bases échangeables suive les mêmes tendances : elle est significativement différente pour le peuplement de 1 an, pour la profondeur 0-25 cm, et ne présente pas de différences significatives dans la profondeur 25-50 cm. Elle est environ de 35 à 50 % supérieure par rapport aux valeurs des autres peuplements et de la savane. Les variations de l'élément magnésium

influencent également la somme des bases étant donné que le magnésium est la deuxième base importante. Le potassium, qui est le troisième élément majeur des bases, ne semble pas influencer fondamentalement la somme des bases, bien qu'il soit celui qui présente le plus de variations. Le sodium, par son manque de variabilité, ne joue pas un rôle dans la modification de la somme des bases échangeables.

En conclusion, les teneurs en Ca et Mg dans la couche 0-25 cm sont toutes significativement supérieures dans le peuplement de 1 an, par rapport aux peuplements plus âgés. Le peuplement de 1 an présente également des teneurs plus élevées en sodium par rapport aux autres peuplements, bien que cette différence ne soit pas significative. La savane montre des teneurs en potassium échangeable significativement supérieures à celles des autres formations végétales dans la couche 0-25 cm.

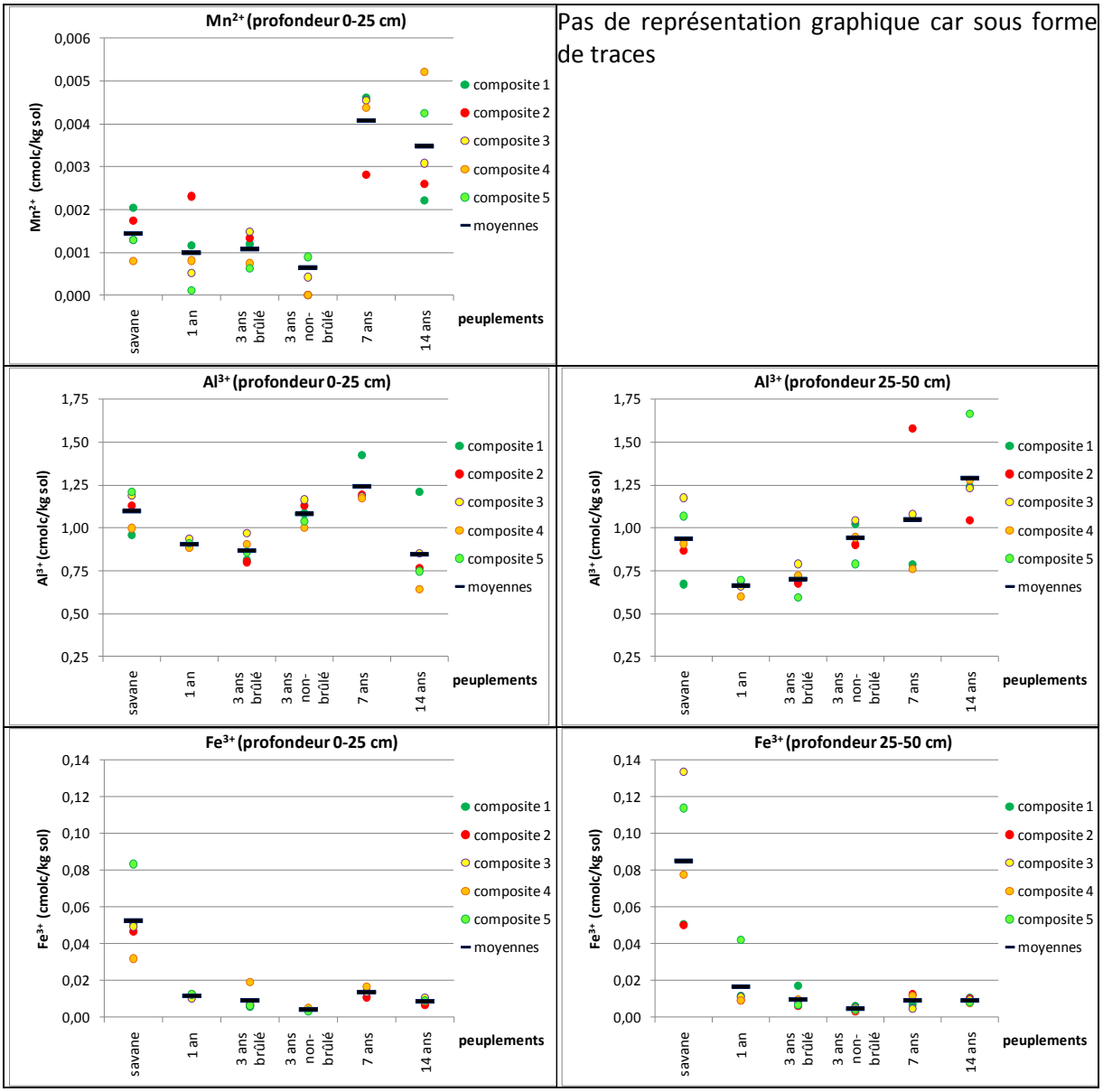


Figure 10 : Evolution des concentrations en cations acides sur le complexe d'échange.

Les résultats du test de Wilcoxon montrent qu'il existe des différences significatives entre peuplements pour les trois cations acides, excepté pour la profondeur 25-50 cm pour le cation manganèse dont les teneurs n'ont pas pu être détectées lors des analyses en laboratoire.

Le test de Tukey-Kramer permet de différencier les valeurs des peuplements de 7 et 14 ans par rapport aux autres types de couvert végétal pour l'élément manganèse. Les peuplements les moins âgés et la savane présentent les mêmes valeurs, 4 fois inférieures à celles du peuplement de 7 ans, et 3 fois moindres que celles du peuplement de 14 ans. Mais, bien que ces différences existent, cet élément est le cation le moins présent sur le complexe d'échange. Ces variations ne peuvent donc pas avoir un impact sur l'ECEC, ni sur la somme des cations acides.

Le fer possède des valeurs semblables pour tous les peuplements mais ses concentrations en savane sont significativement différentes des concentrations sous les plantations d'*Acacia*. Les valeurs sous le peuplement de 14 ans, sont en moyenne 85 % inférieures à celles en savane, pour la profondeur 0-25 cm, et en moyenne 90 % moindres pour la profondeur 25-50 cm.

L'aluminium, étant le cation acide dominant, influence fortement l'ECEC mais aussi la somme des cations acides. Les variations des concentrations de cet élément ont donc un impact considérable sur le complexe d'échange. Les regroupements issus du test de Tukey-Kramer pour la profondeur 0-25 cm montrent que les peuplements les moins âgés et la savane présentent des valeurs semblables. Il n'est cependant pas possible d'affirmer que les peuplements les moins âgés présentent des valeurs dissemblables par rapport aux peuplements plus âgés puisque un autre regroupement comprend, à la fois la savane, le peuplement de 3 ans et le peuplement de 7 ans. Le dernier groupe est formé par le peuplement de 1 an, de 3 ans et de 14 ans. Les valeurs les plus faibles pour la profondeur 0-25 cm, sont tout de même observées pour le peuplement de 14 ans, et sont en moyenne 25% inférieures par rapport à la savane. L'inverse se passe pour la profondeur 25-50 cm, puisqu'à cette profondeur, les valeurs les plus élevées sont observées pour le peuplement de 14 ans, et sont environ 40 % plus élevées par rapport à la savane.

La somme des cations acides présente les mêmes tendances que celles détaillées pour le cation aluminium. Les valeurs les plus faibles pour la profondeur 0-25 cm sont également observées pour le peuplement de 14 ans et sont également environ 25 % moindres par rapport à la savane. Les valeurs les plus élevées pour la profondeur 25-50 cm sont valables pour le peuplement de 14 ans et sont environ 30 % plus élevées que les valeurs observées en savane.

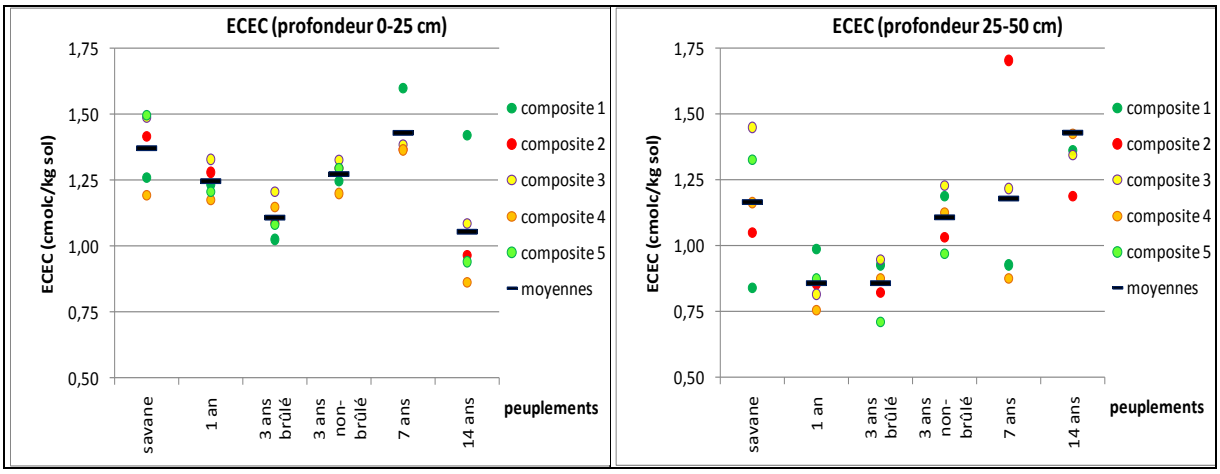


Figure 11 : Evolution de l'ECEC en fonction des peuplements

Les tests de Wilcoxon montrent que l'ECEC ne présente pas les mêmes valeurs dans les types de couvert végétal considéré. Néanmoins, le test de Tukey-Kramer ne permet pas de déduire une éventuelle tendance évolutive puisqu'il regroupe à la fois des peuplements jeunes et des peuplements plus âgés. Les valeurs de l'ECEC sont inférieures dans le peuplement de 14 ans par rapport à la savane, du moins en ce qui concerne la profondeur 0-25 cm. L'inverse est observé pour la profondeur 25-50 cm. Les différences entre ces deux types de couvert végétal sont en moyenne du même ordre de grandeur et valent 20 %.

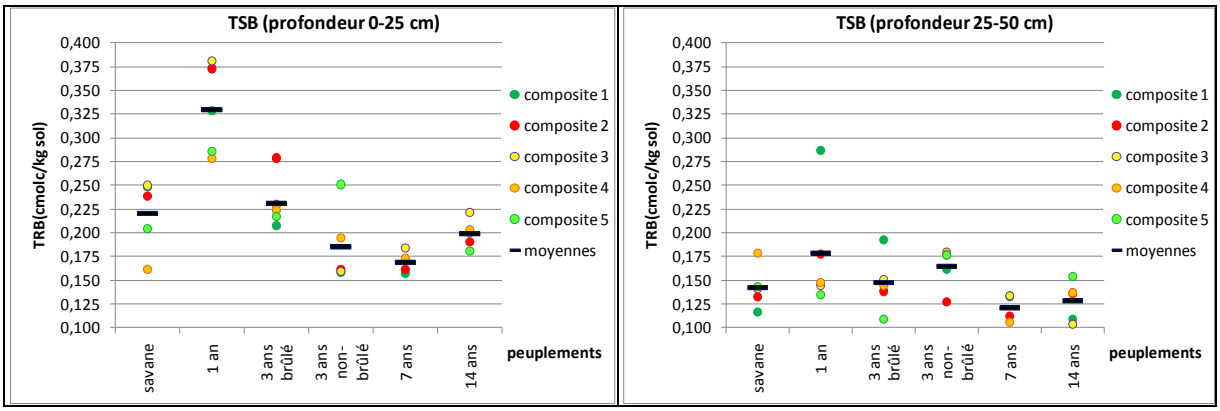


Figure 12 : Evolution du taux de saturation en bases en fonction du type de couvert végétal

En ce qui concerne les taux de saturation en bases, des différences significatives sont observées entre les types de couvert végétal. Tout comme l'ECEC, il n'existe pas de différences significatives entre les peuplements les plus jeunes et les plus âgés. Le taux de saturation en bases est supérieur dans le peuplement de 14 ans, pour la profondeur 0-25 cm, par rapport à la savane (+ 20%), bien que cette différence ne soit pas significative. Pour la profondeur 25-50 cm, l'inverse se passe avec une diminution de 30 % entre ces deux types de couvert végétal, bien que cette différence ne soit pas non plus significative au vu des résultats du test de Tukey-Kramer.

Les résultats des tests de Wilcoxon pour le taux de saturation de l'aluminium, sont semblables à ceux présentés pour le taux de saturation en bases : il existe des différences significatives. Le test de Tukey-Kramer forme 4 groupes pour la profondeur 0-25 cm : l'un reprenant la savane et le peuplement de 3 ans, un deuxième regroupant la savane et le peuplement de 14 ans, un troisième comprenant le peuplement de 3 ans et de 7 ans, et enfin un dernier qui isole le peuplement de 1 an. Les différences n'excèdent jamais 17 %. Pour la profondeur 25-50 cm, le test de

Tukey-Kramer regroupe les peuplements les plus âgés ensemble mais le peuplement de 7 ans est également présent dans un autre groupe avec le peuplement de 3 ans. On peut constater que les valeurs pour les peuplements les plus âgés sont donc significativement différentes de celles pour les peuplements les plus jeunes. Les différences ne dépassent pas 15%.

En conclusion, le taux de saturation en aluminium dans la couche 0-25 cm est maximal pour le peuplement de 7 ans et diffère significativement des valeurs des autres peuplements à l'exception du peuplement de 3 ans. Dans la couche 25-50 cm, le taux de saturation en aluminium maximal est observé dans le peuplement de 14 ans, et diffère significativement de valeurs des autres peuplements, à l'exception de la plantation de 7 ans.

Les concentrations en éléments échangeables ont également été transformées de manière à obtenir les stocks de ces éléments par hectare. Ceci a pu se réaliser à l'aide de la densité apparente, comme expliqué précédemment. Les résultats figurent à l'annexe 7.

c) Carbone et azote

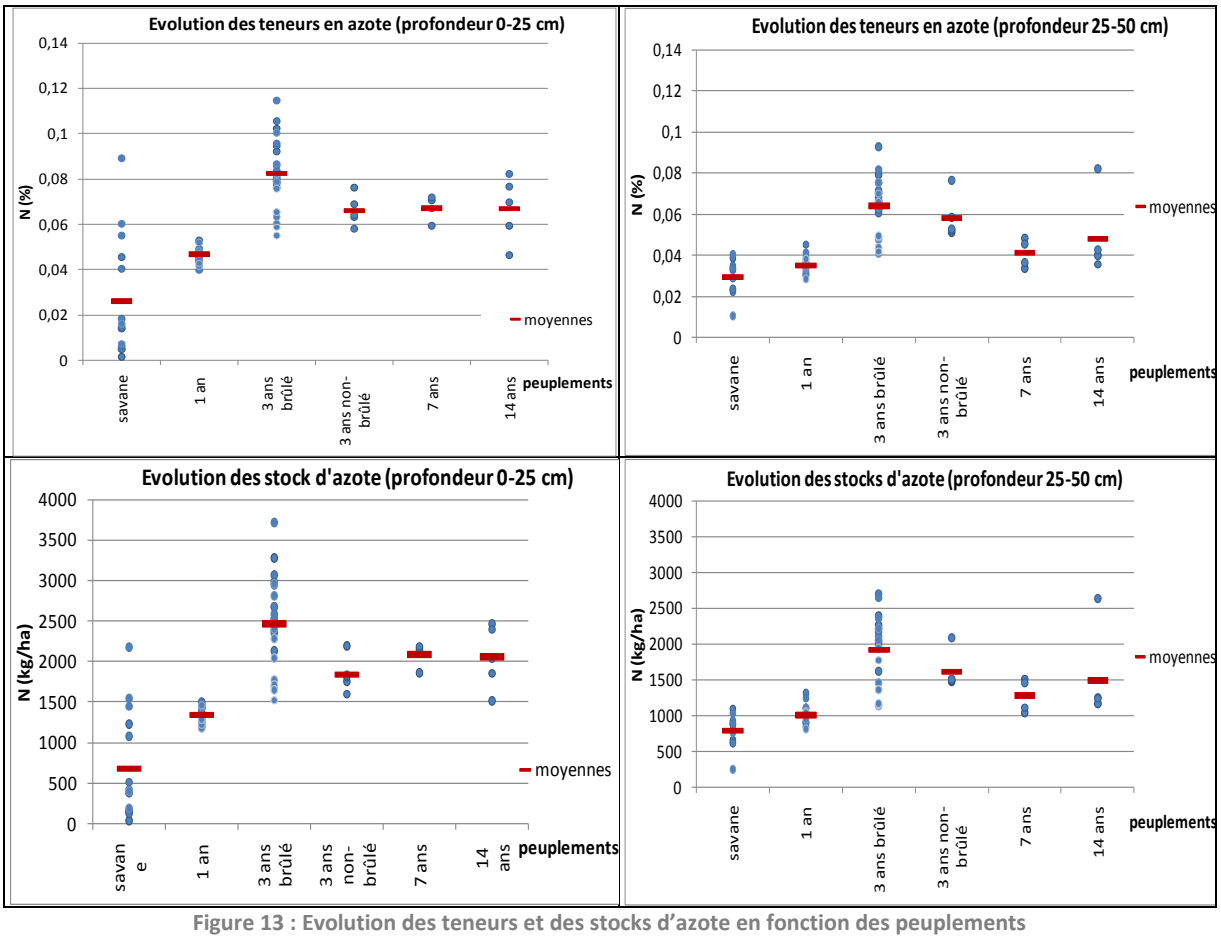


Figure 13 : Evolution des teneurs et des stocks d'azote en fonction des peuplements

Au vu des résultats des tests de Wilcoxon pour les teneurs en azote, il existe des différences significatives entre les types de couverts végétaux. Pour la profondeur 0-25 cm, les teneurs dans les peuplements sont significativement supérieures par rapport aux teneurs en savane. Le peuplement de 1 an présente des teneurs intermédiaires entre les teneurs en savane et dans les autres peuplements. Pour la profondeur 25-50 cm, les teneurs en savane et dans le peuplement de 1 an

sont significativement inférieures aux teneurs dans les autres peuplements à l'exception du peuplement de 7 ans. Les teneurs maximales sont atteintes pour le peuplement de 3 ans. Les teneurs pour le peuplement de 14 ans sont en moyenne 2,5 fois plus élevées que celles en savane, pour la profondeur 0-25 cm, et en moyenne 1,65 fois plus élevées pour la profondeur 25-50 cm.

Les stocks en azote sont également significativement différents d'après les résultats des tests de Wilcoxon. Ils suivent les mêmes tendances que les teneurs en azote et augmentent fortement, avec des valeurs pour le peuplement de 14 ans, en moyenne 3 fois plus élevées, pour la profondeur 0-25 cm, et 1,9 fois plus élevées pour la profondeur 25-50 cm, par rapport aux valeurs en savane. Cette augmentation peut également être mise en relation avec l'augmentation conjointe de la densité apparente et des teneurs.

Il existe une grande variabilité des résultats, principalement dans la zone brûlée du peuplement de 3 ans et en savane.

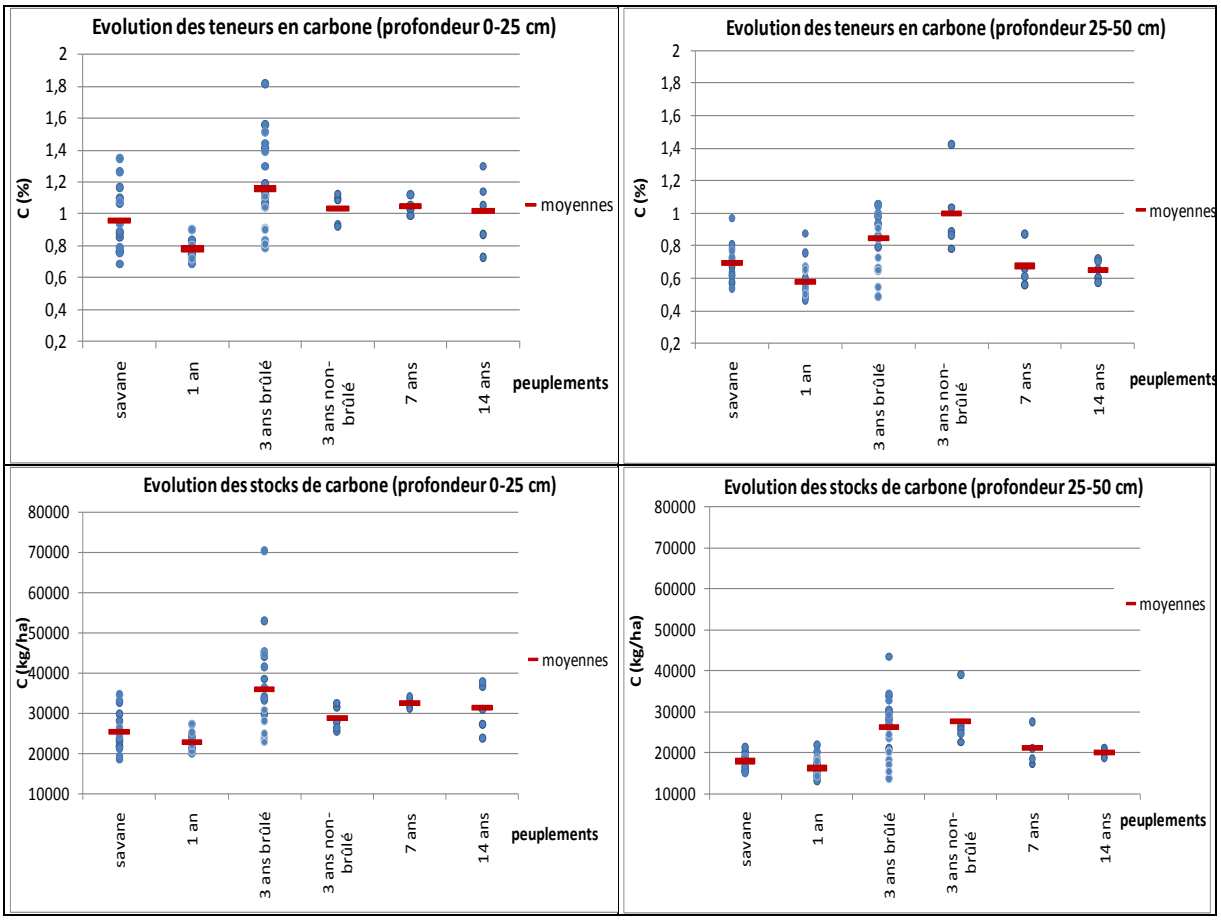


Figure 14 : Evolution des teneurs et des stocks de carbone en fonction des peuplements

Les tests de Wilcoxon prouvent que les résultats des teneurs en carbone diffèrent significativement d'un type de couvert végétal à l'autre. Les tests de Tukey-Kramer isolent le peuplement de 1 an par rapport aux autres, pour la profondeur 0-25 cm, et le peuplement de 3 ans, pour la profondeur 25-50 cm. Les autres types de couverts végétaux présentent donc des valeurs semblables. Le peuplement de 1 an est isolé des autres pour la profondeur 0-25 cm car il possède des valeurs inférieures aux autres. Cette différence est de l'ordre de 25%. Le peuplement de 3 ans pour la

profondeur 25-50 cm, quant-à-lui, présente des teneurs en carbone supérieures aux autres, de l'ordre de 40%. Les valeurs pour le peuplement de 14 ans sont semblables aux valeurs mesurées en savane, et ce pour les deux profondeurs.

Les résultats des tests de Wilcoxon pour les stocks en carbone montrent également que les couverts végétaux présentent des valeurs significativement différentes. Les tests de Tukey-Kramer sont différents de ceux effectués pour les teneurs en carbone. En effet, pour la profondeur 0-25 cm, ce test distingue 3 groupes : l'un reprenant la savane et le peuplement de 1 an, un autre regroupant la savane et le peuplement de 3 ans, et le dernier comprenant les peuplements de 3, 7 et 14 ans. Les valeurs pour les peuplements les plus âgés sont donc significativement différentes de celles pour les peuplements les plus jeunes. Elles sont plus élevées et cette augmentation est de l'ordre de 20%. Pour la profondeur 25-50 cm, le test de Tukey-Kramer permet également de former 3 groupes mais pas de la même manière. En effet, les groupes formés sont les suivants : savane, 1 an et 14 ans pour le premier groupe, savane, 7 et 14 ans pour le deuxième groupe, et enfin le troisième groupe est formé seulement par le peuplement de 3 ans. Les peuplements les plus âgés ne sont donc pas statistiquement différents des peuplements les moins âgés. Tout comme pour les teneurs en carbone, le peuplement de 3 ans présente les plus grandes valeurs. Elles sont en moyenne 35% plus élevées que celles des autres peuplements.

Tout comme pour l'élément azote, il existe une grande variabilité des teneurs en carbone et par conséquent également des stocks, pour la profondeur 0-25 cm, principalement en savane ainsi que dans la zone brûlée du peuplement de 3 ans, et dans le peuplement de 14 ans. Pour la profondeur 25-50 cm, cette variabilité est présente dans presque tous les peuplements. Le manque d'évolution des teneurs en carbone peut donc être dû à ces grandes variances qui caractérisent les distributions des résultats dans chaque peuplement.

Au niveau du rapport C/N les tests de Wilcoxon montrent des différences significatives entre les différents peuplements. Pour la profondeur 0-25 cm, le test de Tukey-Kramer isole la savane des peuplements. La savane possède des valeurs significativement supérieures aux valeurs des peuplements. Au sein des peuplements, le ratio a tendance à diminuer avec le vieillissement des arbres, bien que cette diminution ne soit pas significative. Pour la profondeur 25-50 cm, le rapport C/N est également maximal en savane mais n'est pas significativement différent des peuplements âgés de 3 et 7 ans. Il est significativement différent des valeurs pour les peuplements de 1 et 14 ans.

Les valeurs en savane sont en moyenne 4,8 fois plus faibles que les valeurs pour le peuplement de 14 ans, pour la profondeur 0-25 cm. En ce qui concerne la profondeur 25-50 cm, ce ratio est inférieur (1,4 fois) dans le peuplement de 14 ans par rapport à celui qui prévaut en savane.

De manière générale, les valeurs des éléments azote et carbone sont toujours supérieures pour le sol se trouvant sous le peuplement âgé de 7 ans, par rapport aux valeurs pour le sol sous le peuplement âgé de 14 ans.

d) Eléments totaux

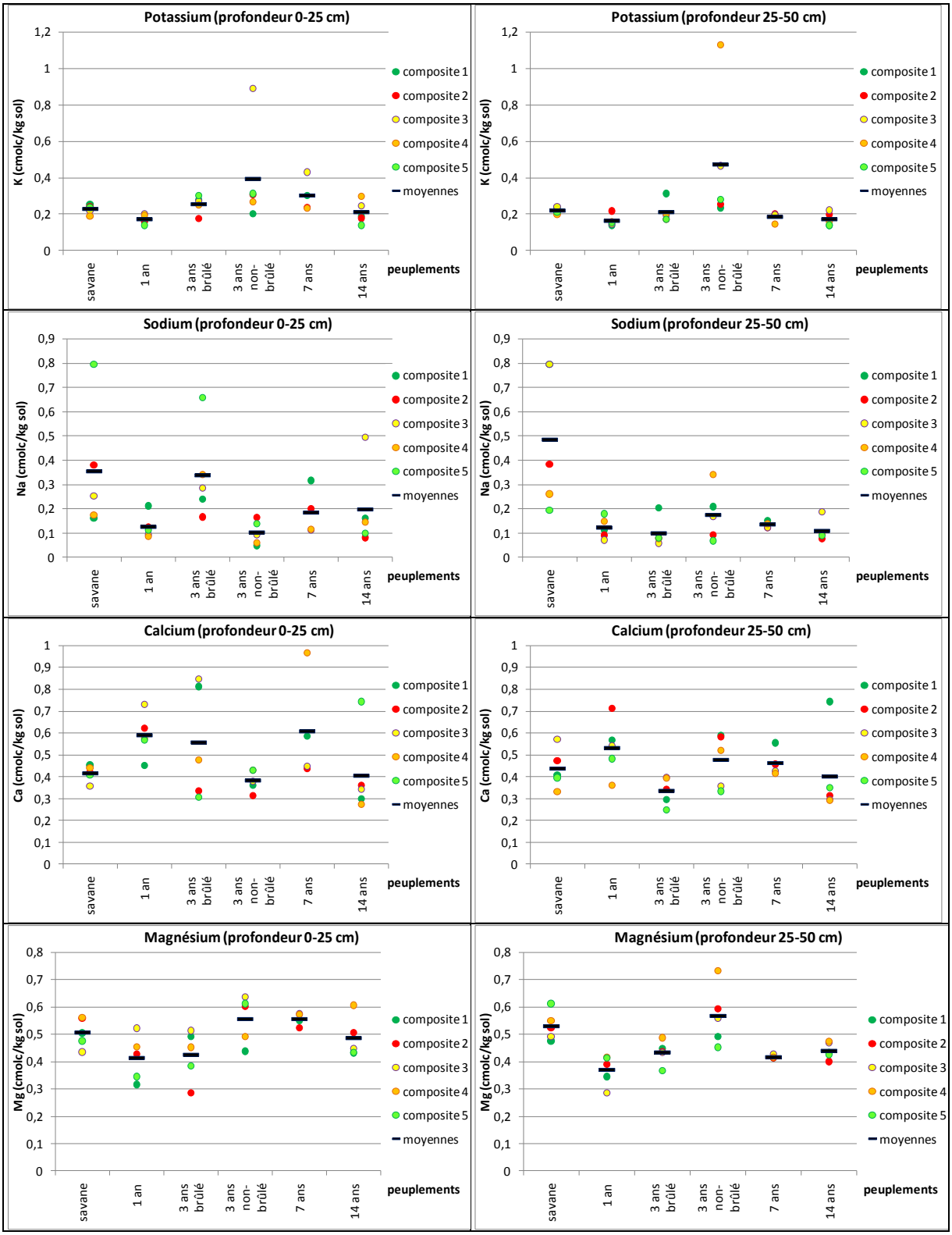


Figure 15 : Evolution des concentrations totales en bases en fonction du type de couvert végétal

En ce qui concerne les concentrations totales en bases, le test de Wilcoxon montre qu'elles ne sont pas significativement différentes pour les éléments sodium et magnésium pour la profondeur 0-25 cm, et pour l'élément calcium pour la profondeur 25-50 cm. Bien que les tests de Wilcoxon

montrent qu'il y a des différences significatives, les tests de Tukey-Kramer pour la profondeur 0-25 cm des éléments potassium et calcium, ne permettent pas d'identifier des groupes présentant des valeurs significativement différentes. Il est dès lors impossible d'observer des différences significatives entre type de couvert végétal pour la profondeur 0-25 cm.

Pour la profondeur 25-50 cm, deux groupes distincts sont observables pour l'élément potassium : l'un reprenant la savane et les peuplements âgés de 1,7 et 14 ans, et un autre formé par la savane et le peuplement de 3 ans. Il n'est donc pas possible de séparer les peuplements âgés des peuplements les plus jeunes. Les valeurs en savane sont semblables aux valeurs pour le peuplement de 14 ans. Les valeurs les plus élevées sont observées pour le peuplement de 3 ans qui présentent des valeurs environ 2 fois plus élevées que les valeurs valables pour la savane.

Il est à noter que pour le peuplement de 3 ans, dans la partie non-brûlée, les concentrations trouvées pour l'échantillon composite 3 à la profondeur 0-25 cm et pour l'échantillon composite 4 à la profondeur 25-50 cm semblent s'écarter fortement des valeurs des autres échantillons composites, avec des valeurs 2 à 3 fois plus élevées. Il semble par conséquent logique que les maximas soient atteints pour ce peuplement. Ces fortes variations ont pour conséquence une forte variance dans ce peuplement.

Les regroupements issus des tests de Tukey-Kramer pour l'élément sodium permettent d'isoler la savane des plantations d'*Acacia*. Les valeurs dans les peuplements sont significativement plus faibles que les valeurs en savane, avec en moyenne des valeurs 4,5 fois plus faibles pour le peuplement de 14 ans, par rapport aux valeurs en savane.

Le test de Tukey-Kramer ne permet pas non plus d'isoler les peuplements les plus âgés des autres pour l'élément magnésium. En effet, le test regroupe à la fois la savane et le peuplement de 3 ans, mais également la savane et les peuplements de 7 et 14 ans, et enfin, il regroupe également le peuplement de 1 an avec les peuplements de 7 et 14 ans. Les valeurs les plus élevées sont pour le groupe reprenant la savane et le peuplement de 3 ans. Elles sont en moyenne 25 % plus élevées que les valeurs pour les autres peuplements.

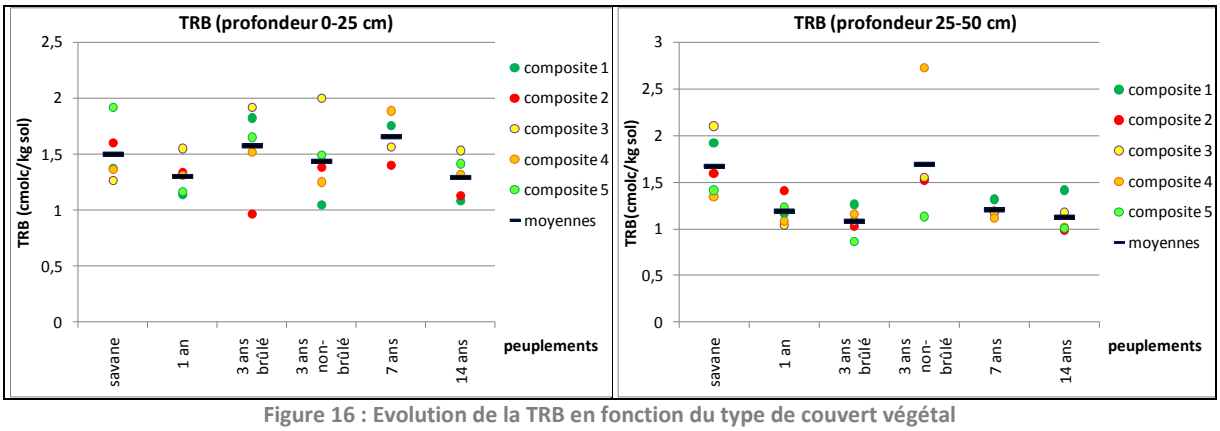


Figure 16 : Evolution de la TRB en fonction du type de couvert végétal

Les valeurs du TRB ne sont pas significativement différentes entre les peuplements pour la profondeur 0-25 cm mais le sont pour la profondeur 25-50 cm. Les différences sont observées entre le groupe comprenant la savane et le peuplement de 3 ans, et entre l'autre groupe formé par les peuplements de 1, 7 et 14 ans. Ces différences sont de l'ordre de 30 % en moyenne.

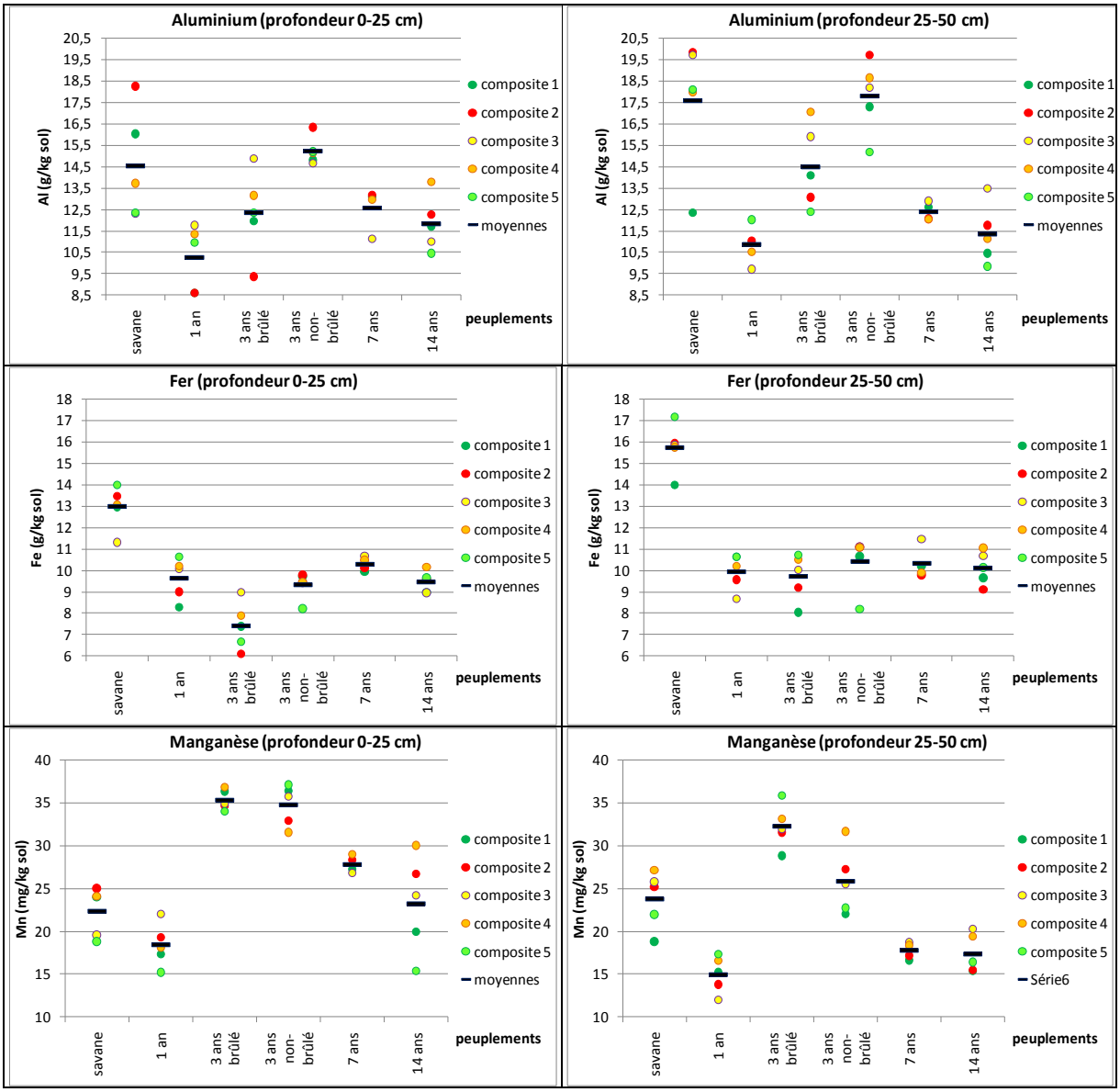


Figure 17 : Evolution des concentrations totales des éléments acides en fonction du type de couvert végétal

Les tests de Wilcoxon en ce qui concerne les éléments acides, montrent qu'il existe des différences significatives entre les types de couvert végétal, et ce pour les deux profondeurs.

Seuls les résultats du test de Tukey-Kramer pour le fer permettent d'isoler la savane des peuplements d'*Acacias*, et ce pour les deux profondeurs. Les teneurs en fer sont en moyenne 1,3 fois moins élevées pour le peuplement de 14 ans, par rapport à la savane, pour la profondeur 0-25 cm, et environ 1,6 fois moins élevées pour la profondeur 25-50 cm.

Les groupes formés par le test de Tukey-Kramer pour la profondeur 0-25 cm pour le manganèse sont les suivants : le premier regroupe la savane avec les peuplements de 1 et 14 ans, le deuxième comprend la savane et les peuplements de 7 et 14 ans, et le dernier isole le peuplement de 3 ans. Il n'est donc pas possible d'isoler les peuplements les plus âgés des peuplements les plus jeunes. Les maximas sont atteints pour le peuplement de 3 ans, avec des valeurs 1,5 fois plus élevées que les autres. Pour la profondeur 25-50 cm, seuls deux groupes ont été formés : un composé de la savane et du peuplement de 3 ans, et un autre reprenant les peuplements âgés de 1, 7 et 14 ans.

Pour l'aluminium, les regroupements sont quasi identiques à ceux observés pour l'élément manganèse, sauf en ce qui concerne les premiers et troisièmes regroupements pour la profondeur 0-25 cm. En effet, le premier groupe est composé de la savane, ainsi que des peuplements de 3 et 7 ans. Le troisième groupe, quant-à-lui est formé par les peuplements âgés de 1, 7 et 14 ans. Les maximas sont atteints pour le peuplement de 3 ans, et ce pour les deux profondeurs.

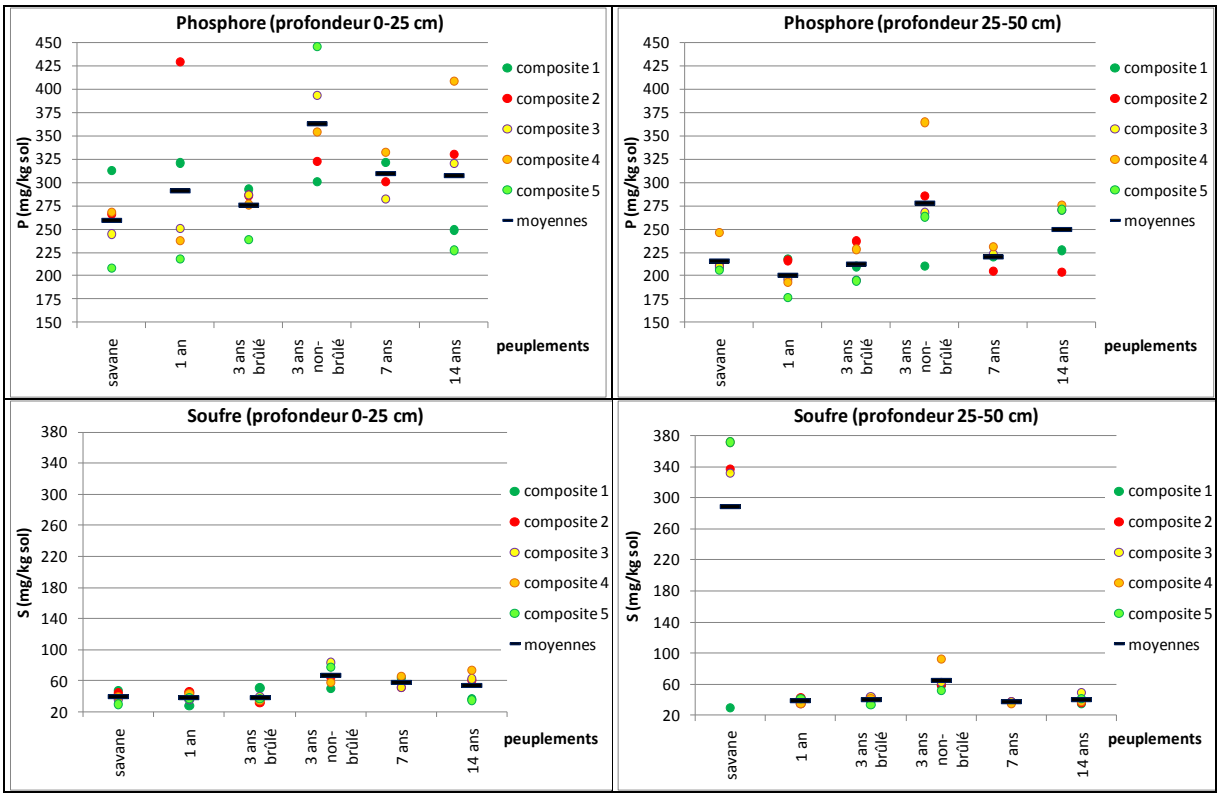


Figure 18 : Evolution des concentrations totales du fer et du soufre, en fonction du type de couvert végétal

Les tests de Wilcoxon montrent qu'il existe des différences significatives pour les concentrations en phosphore et soufre, sauf pour le phosphore à la profondeur 0-25 cm.

Les concentrations en soufre pour la profondeur 0-25 cm sont semblables à la fois dans la savane mais également dans les peuplements âgés de 1, 7 et 14 ans. Elles sont également comparables entre les peuplements de 3, 7 et 14 ans. Les concentrations les plus élevées sont observées pour le peuplement de 3 ans qui possède des valeurs 1,7 fois plus élevées que pour la savane et le peuplement de 1 an, et 1,2 fois plus élevées que pour les peuplements de 7 et 14 ans.

Pour la profondeur 25-50 cm, les concentrations en soufre dans la savane sont significativement différentes des concentrations observées dans les peuplements d'*Acacias*. Elles sont en moyenne 6,5 fois plus élevées en savane par rapport aux peuplements.

Les résultats du test de Tukey-Kramer pour le phosphore, pour la profondeur 25-50 cm, sont identiques à ceux valables pour la profondeur 0-25 cm du soufre. Le maxima est également atteint pour les concentrations sous le peuplement de 3 ans, qui sont en moyenne 1,3 fois plus élevées que celles valables pour la savane et le peuplement de 1 an, et en moyenne 1,2 fois plus élevées que les concentrations sous les peuplements de 7 et 14 ans.

A nouveau, les concentrations en éléments totaux sont dans la plupart des cas toujours supérieures pour les échantillons issus du peuplement de 7 ans que pour les échantillons prélevés dans le peuplement âgé de 14 ans.

Comme le montrent les graphiques, chaque peuplement, et également la savane, sont caractérisés par une grande variabilité dans leurs résultats, et ce pour les majorités des éléments présentés, et également pour le TRB.

Les stocks en éléments totaux ont également été calculés à partir des valeurs de densité apparente. Les résultats sont repris à l'annexe 7.

e) Densité apparente

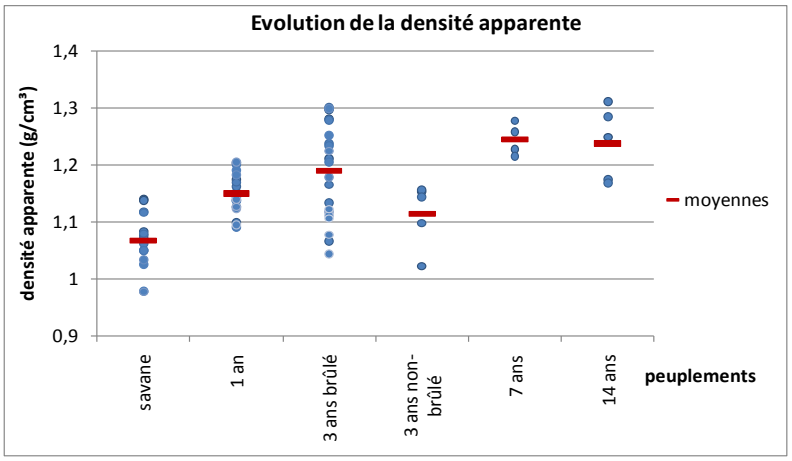


Figure 19 : Evolution de la densité apparente en fonction des peuplements

Le test de Wilcoxon permet de dire qu'il existe des différences significatives des valeurs de densité dans les différents types de couverts végétaux étudiés. Les valeurs de densité apparente sont significativement inférieures dans la savane par rapport aux peuplements les plus âgés (7 et 14 ans). Les peuplements de 1 et 3 ans possèdent des valeurs intermédiaires entre la savane et les peuplements plus âgés. Les peuplements de 7 et 14 ans présentent les mêmes valeurs de densité apparente. La densité apparente est en moyenne 1,16 fois plus élevée pour les peuplements de 7 et 14 ans, par rapport à la savane.

4. Impact du feu dans le peuplement de 3 ans

Afin d'identifier si le passage du feu dans le peuplement de 3 ans, a eu un impact significatif sur les propriétés étudiées, un test de Wilcoxon a été effectué en comparant les résultats de la zone brûlée et de la zone non-brûlée, et ce pour les deux profondeurs. Les résultats sont présentés dans les tableaux 10,11 et 12.

Tableau 10 : Impact du feu sur les propriétés du sol dans le peuplement de 3 ans-pH, C, N, P, S et densité apparente

zone	pH H2O	pH CaCl2	N(%)	C(%)	C/N	D.A.(g/cm³)	N (kg/ha)	C (kg/ha)	P(mg/kg)	S(mg/kg)
profondeur 0-25 cm										
brûlée	5,03	4,29	0,082	1,16	14,4	1,19	2466	36033	275,93	38,79
non-brûlée	4,49	4,16	0,066	1,03	15,7	1,11	1840	28730	363,25	66,54
résultat Wilcoxon	*0,0006*	*0,0006*	*0,0245*	*0,4538*	*0,0873*	*0,099*	*0,0332*	*0,1972*	*0,009*	*0,0163*
profondeur 25-50 cm										
brûlée	5,00	4,41	0,064	0,85	13,5		1918	26207	213,00	40,08
non-brûlée	4,93	4,27	0,058	1,00	17,0		1615	27663	278,16	64,79
résultat Wilcoxon	*0,4898*	*0,0029*	*0,4181*	*0,3179*	*0,0006*		*0,2421*	*0,9761*	*0,0283*	*0,009*

D.A.= densité apparente

Tableau 11 : Impact du feu sur les propriétés du sol dans le peuplement de 3 ans- éléments échangeables

zone	K^+ (cmolc/kg)	Na^+ (cmolc/kg)	Ca^{2+} (cmolc/kg)	Mg^{2+} (cmolc/kg)	∑ B.E. (cmolc/kg)	Mn^{2+} (cmolc/kg)	Al^{3+} (cmolc/kg)	Fe^{3+} (cmolc/kg)	∑ C.A. (cmolc/kg)	ECEC (cmolc/kg)	TSB (%)	TS Al (%)
profondeur 0-25 cm												
brûlée	0,022	0,018	0,138	0,054	0,231	0,0011	0,870	0,009	0,880	1,111	20,864	78,244
non-brûlée	0,013	0,015	0,115	0,042	0,185	0,0007	1,084	0,004	1,089	1,274	14,540	85,124
résultat Wilcoxon	0,0283	0,1745	0,1172	0,0163	0,0758	0,0264	0,009	0,009	0,009	0,0163	0,0163	0,0163
profondeur 25-50 cm												
brûlée	0,009	0,016	0,086	0,037	0,147	0,000	0,700	0,010	0,710	0,857	17,055	81,835
non-brûlée	0,011	0,014	0,102	0,038	0,164	0,00007081	0,941	0,004	0,946	1,110	14,874	84,721
résultat Wilcoxon	*0,1745*	*0,3472*	*0,1745*	*0,4647*	*0,3472*	*0,3173*	*0,009*	*0,009*	*0,0163*	*0,009*	*0,1172*	*0,0758*

∑ B.E.= somme des bases échangeables (K, Na, Ca et Mg) ; *∑ C.A.*= somme des cations acides (Mn, Al et Fe)
TSB= taux de saturation en bases ; *TS Al*= taux de saturation de l'aluminium

Tableau 12 : Impact du feu sur les propriétés du sol dans le peuplement de 3 ans- éléments totaux

zone	K (cmolc/kg)	Na (cmolc/kg)	Ca (cmolc/kg)	Mg (cmolc/kg)	Mn (mg/kg)	Al (mg/kg)	Fe (mg/kg)	TRB (mg/kg)
profondeur 0-25 cm								
brûlée	0,255	0,338	0,556	0,425	35,345	12345,735	7410,098	1,575
non-brûlée	0,396	0,101	0,383	0,556	34,755	15237,305	9323,676	1,436
résultat Wilcoxon	*0,2506*	*0,009*	*0,4647*	*0,0758*	*0,9168*	*0,0283*	*0,0163*	*0,4647*
profondeur 25-50 cm								
brûlée	0,210	0,100	0,335	0,435	32,259	14502,269	9701,572	1,080
non-brûlée	0,473	0,176	0,476	0,566	25,830	17802,074	10424,362	1,691
résultat Wilcoxon	*0,0472*	*0,1745*	*0,1172*	*0,0163*	*0,0283*	*0,0283*	*0,1172*	*0,0283*

TRB= somme de K, Na, Ca et Mg

Dans l'ensemble, on note des différences significatives dans les résultats de pH entre la zone brûlée et non-brûlée du peuplement de 3 ans, excepté pour le pH H_2O de la profondeur 25-50 cm. Le feu a tendance à augmenter les valeurs de pH, de 0,5 unité de pH, pour la profondeur 0-25 cm pour le pH- H_2O, et de 0,13 unité de pH pour le pH-$CaCl_2$, pour les deux profondeurs.

L'impact du feu sur le complexe d'échange est significatif mais s'effectue surtout pour la profondeur 0-25 cm, avec une augmentation des concentrations pour les éléments échangeables Fe, K, Mg, Mn, ainsi qu'une augmentation du taux de saturation en bases. En revanche, le feu diminue les teneurs en aluminium, l'ECEC, ainsi que la somme des cations acides et le taux de saturation de

l'aluminium. Dans la profondeur 25-50 cm, il y a également une augmentation significative des teneurs en fer, et une diminution significative des teneurs en aluminium, de l'ECEC et de la somme des cations acides. Il est à noter que pour les autres éléments (Ca et Na), bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les deux zones, les teneurs de ces deux éléments augmentent après le passage du feu, sauf pour le calcium pour la profondeur 25-50cm. Etant donné que tous les éléments échangeables, excepté l'aluminium ont des valeurs supérieures dans la zone brûlée, la diminution de l'ECEC n'est certainement due qu'à la diminution des quantités d'aluminium. On peut donc en conclure que le feu augmente les teneurs en cations basiques et réduit le taux de saturation en aluminium, l'ECEC diminuant significativement. Cependant, en ce qui concerne la base potassium, l'impact du feu pourrait être estompé par la forte variance qui avait été constatée dans ce peuplement. En effet, les valeurs pour l'échantillon composite 3 pour la profondeur 0-25 cm et l'échantillon composite 4 pour la profondeur 25-50 cm, avaient pour conséquence une augmentation non négligeable de la moyenne. Il est dès lors possible que la moyenne pour la zone non-brûlée du peuplement de 3 ans ait été surestimée par la prise en compte de cet échantillon.

En ce qui concerne, les teneurs en azote, ainsi que le stock en azote, on observe une augmentation significative de l'azote dans le sol pour la profondeur 0-25 cm, mais pas pour la profondeur 25-50 cm. Par contre, les teneurs en carbone et les stocks en carbone ne semblent pas présenter des valeurs significativement différentes, ce qui signifie que le feu n'a pas d'impact significatif sur le carbone dans le sol. Les valeurs du rapport C/N sont significativement différentes entre les deux zones, mais seulement pour la profondeur 25-50 cm, avec une diminution de ce ratio dans la zone brûlée.

En ce qui concerne l'influence du feu de savane sur les concentrations en éléments totaux, on peut dire qu'il y a un impact significatif mais cela dépend fortement de l'élément considéré, ainsi que de la profondeur. En effet, les éléments Al, Fe, Na, P et S ont des valeurs significativement différentes pour la profondeur 0-25 cm mais les éléments Fe et Na ont des valeurs semblables pour la profondeur 25-50 cm. Par contre, d'autres minéraux présentent des résultats significativement différents pour la profondeur 25-50 cm. Il s'agit des éléments K, Mg et Mn. Au vu de ces résultats, on peut quand même noter un impact du feu puisque pour la majorité des minéraux, sauf les minéraux Na, Ca et Mn, les concentrations dans la zone brûlée sont inférieures à celles dans la zone non-brûlée.

Le feu n'a pas d'impact significatif sur le TRB pour la profondeur 0-25 cm, mais le test de Wilcoxon indique des valeurs significativement différentes pour la profondeur 25-50 cm, avec une diminution des valeurs dans la zone brûlée. Pour la profondeur 0-25 cm, le TRB est supérieur pour la zone brûlée, bien que cette différence ne soit pas significative.

Suivant les résultats du test de Wilcoxon, le feu n'a pas d'impact significatif sur la densité apparente.

5. Litière et végétation herbacée

Les tableaux ci-dessous reprennent les résultats issus des analyses en laboratoire effectuées pour les compartiments litière et végétation herbacée. Les tableaux reprennent également les résultats des tests de Wilcoxon et de Tukey-Kramer.

Tableau 13 : Evolution des propriétés de la litière et de la végétation herbacée selon le couvert végétal- N, C, C/N, Stocks de MS

âge du peuplement (années)	N (%)		C (%)		C/N		stocks MS (kg/ha)		N (kg/ha)		C(kg/ha)	
	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.	moyennes	test T.
litière												
0	0,506	A	32,7	A	68,8	A	1387,8	A	6,6	A	445,4	A
1	0,963	B	35,6	A B	37,1	B	879,4	A	8,6	A	315,8	A
3	1,467	C	44,0	B	30,1	B	5806,7	A	84,7	A	2536,0	A
7	1,634	C D	35,1	A B	21,6	B	13652,2	A	225,6	A	4879,4	A B
14	2,036	D	36,9	A B	18,2	B	47224,3	B	841,4	B	15649,5	B
résultats Wicoxon	*p < 0,0001*		*0,0279*		*p < 0,0001*		*p < 0,0001*		*p < 0,0001*		*p < 0,0001*	
végétation												
0	0,341	A	43,5	A	126,2	A	5108,0	A	17,2	A	2225,9	A
1	0,730	B	41,6	B	58,3	B	649,3	B	4,6	B	270,4	B
3	1,474	C	40,6	B	27,8	C	765,5	B	2,0	B	316,7	B
résultats Wicoxon	*0,0001*		*0,0070*		*0,0002*		*p < 0,0001*		*p < 0,0001*		*p < 0,0001*	

Stocks MS= stocks de matière sèche

Test T.= test de Tukey-Kramer

Dans la litière et la végétation, les teneurs en azote (%) évoluent significativement avec l'âge du peuplement et sont approximativement quatre fois supérieures sous le peuplement de 14 ans par rapport aux teneurs dans la savane.

En ce qui concerne les teneurs en carbone (%) dans la litière, le test de Wilcoxon montre des différences significatives entre les différents types de couvert végétal mais le test de Tukey-Kramer ne permet pas de séparer les peuplements plus âgés des peuplements moins âgés ou de la savane. Les teneurs maximales sont atteintes pour le peuplement de 3 ans. Les teneurs en carbone dans la végétation sont significativement différentes dans la savane par rapport aux peuplements de 1 et 3 ans, avec une diminution de ces dernières.

Le rapport C/N est significativement différent d'un type de couvert végétal à l'autre, pour la litière et la végétation herbacée. En ce qui concerne la litière, les valeurs en savane sont significativement différentes des valeurs dans les peuplements d'*Acacias*. Bien qu'il n'existe pas de différences significatives entre les peuplements, le ratio a tout de même tendance à diminuer avec le vieillissement des arbres. Pour la végétation, le test de Tukey-Kramer sépare les trois couverts végétaux étudiés. Le ratio diminue environ de moitié entre la savane et le peuplement de 1 an qui présente également une valeur 2 fois plus élevée par rapport au peuplement de 3 ans.

Etant donné que les teneurs en carbone et en azote, bien que différentes, sont du même ordre de grandeur dans la litière et la végétation, c'est en considérant la production de litière et de végétation par hectare que nous pouvons comprendre les différences qui existent entre les stocks de carbone et d'azote dans la litière et la végétation pour chaque peuplement, ainsi que leur tendance évolutive. Les stocks de carbone et d'azote ont tendance à augmenter dans la litière, et ce de manière significative, comme le prouvent les résultats des tests de Wilcoxon et des tests de Tukey-Kramer. Cette tendance est à mettre en relation avec le fait que les quantités de litières sont largement supérieures dans les peuplements de 7 et 14 ans. Les tendances observées pour la

végétation sont opposées aux résultats précédents. En effet, les stocks d'azote et de carbone ont tendance à diminuer avec l'âge du peuplement, avec des valeurs très supérieures dans la savane. De nouveau, cette tendance évolutive est à mettre en relation avec les quantités de végétation présentes par hectare pour chaque peuplement. Les tests statistiques confirment l'évolution significative des stocks en fonction de l'âge du peuplement.

Le tableau ci-dessous résume les résultats des analyses en éléments totaux pour la litière et la végétation.

Tableau 14 : Evolution des propriétés de la litière et de la végétation herbacée selon le couvert végétal-éléments totaux

âge du peuplement (années)	Ca(mg/kg) moyennes	test T.	K(mg/kg) moyennes	test T.	Mg (mg/kg) moyennes	test T.	Na(mg/kg) moyennes	test T.	P(mg/kg) moyennes	test T.	S(mg/kg) moyennes	test T.
litière												
0	4408,411	A	1670,268	A	1275,564	A	32,251		729,038	A B C	956,326	A
1	7836,057	B	4667,984	B	1821,090	B	43,871		963,554	A	1369,053	B C
3	5267,222	A	1584,867	A	1244,441	A	35,571		579,485	C	1190,982	A B
7	3630,296	A	1310,106	A	1092,535	A	27,311		646,453	B C	1249,151	A B C
14	4102,684	A	1306,175	A	1174,100	A	37,285		860,277	A B	1542,068	C
résultats Wicoxon	*0,0082*		*0,0082*		*0,0302*		*0,0605*		*0,0045*		*0,0108*	
végétation												
0	2006,492	A	2979,503	A	1039,713	A	20,260		1058,741	A	778,027	A
1	2938,660	A B	7809,385	B	1786,311	B	21,886		1288,141	A B	1487,780	B
3	3417,976	B	2814,030	A	1170,969	A	23,839		877,870	B	1209,710	B
résultats Wicoxon	*0,0075*		*0,0087*		*0,0104*		*0,2645*		*0,0140*		*0,0068*	

Test T.= test de Tukey-Kramer

Les résultats des tests de Wilcoxon démontrent que les concentrations en éléments totaux sont significativement différentes d'un peuplement à l'autre dans les deux compartiments, sauf pour l'élément sodium.

Les stocks des éléments calcium, potassium, magnésium, sodium et phosphore dans la litière sont les plus élevés pour le peuplement de 1 an. Les tests de Tukey-kramer montrent que ces différences ne sont significatives que pour les éléments calcium, potassium et magnésium. Cette même tendance avait été observée dans les sols pour les éléments sodium, calcium et magnésium.

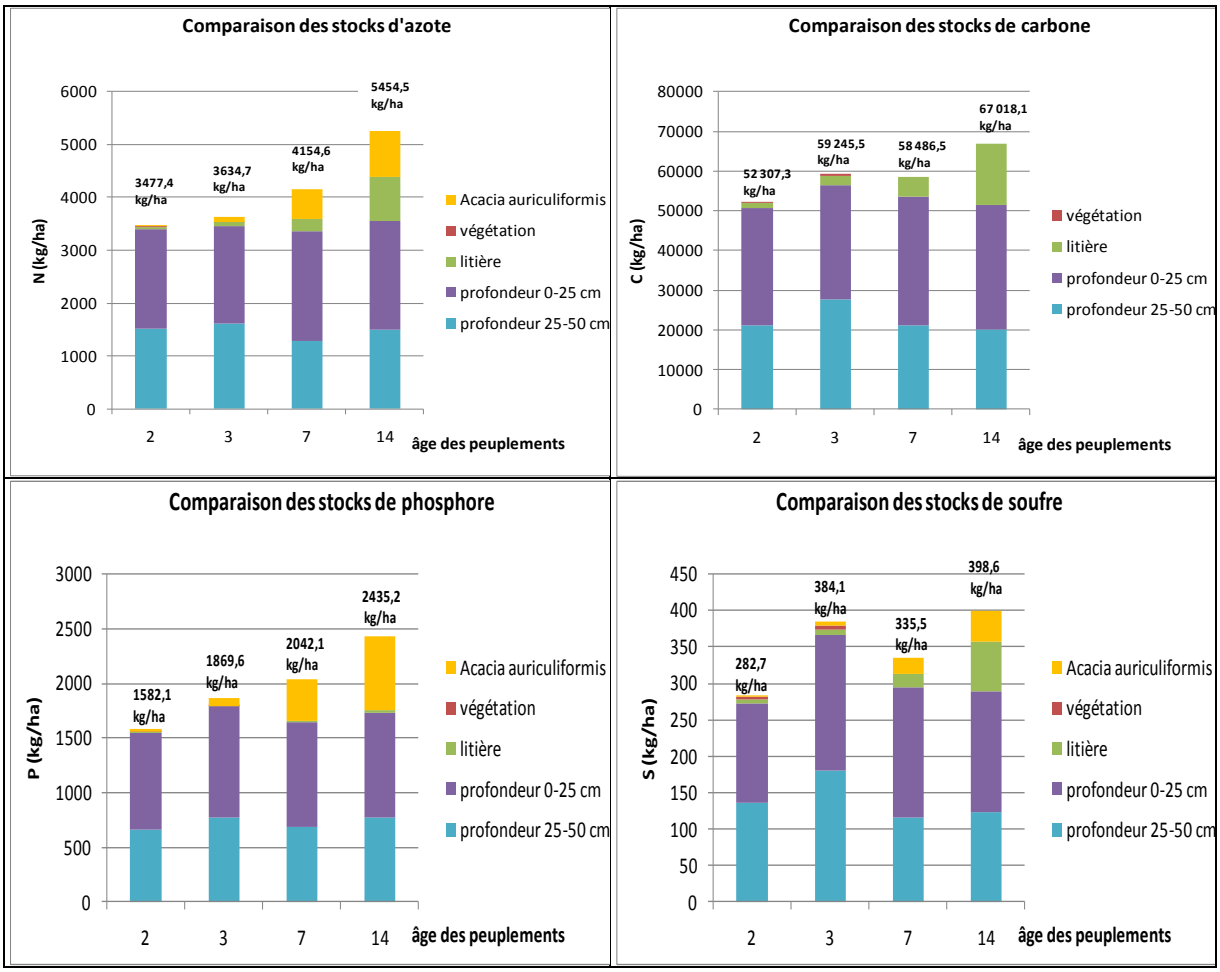
Au niveau des stocks de phosphore et de soufre, le test de Tukey-Kramer ne permet pas de distinguer les peuplements les plus âgés des peuplements les moins âgés et de la savane.

Les stocks en potassium, et magnésium dans la végétation herbacée sont également significativement supérieurs pour le peuplement de 1 an, par rapport aux autres couverts végétaux. Pour les éléments calcium, phosphore et soufre, les peuplements possèdent des valeurs significativement différentes par rapport à la savane, avec une augmentation des stocks pour le calcium et une diminution des stocks pour le phosphore. Les stocks en soufre sont les plus élevés pour le peuplement de 1 an.

Ces concentrations ont été rapportées à l'hectare, en tenant compte des productions respectives de biomasse par la litière et la végétation, en vue d'effectuer une comparaison des stocks en éléments totaux dans les différents compartiments. Les résultats sont repris à l'annexe 7.

6. Evolution des stocks

Afin de se rendre compte des stocks en éléments totaux (N, P, S, Na, K, Ca et Mg) dans chaque compartiment et ce pour chaque peuplement étudié, les stocks dans les cinq compartiments (*l'Acacia auriculiformis* (troncs et branches), la végétation herbacée, la litière, la profondeur 0-25 cm et la profondeur 25-50 cm des sols) ont été portés sur des histogrammes, en utilisant les résultats de Gengler (2011) pour les stocks dans *l'Acacia auriculiformis*. Pour le carbone, seuls les compartiments végétation herbacée, litière et sol (0-25 cm, 25-50 cm) ont été considérés. C'est la zone non-brûlée du peuplement de 3 ans qui a été considérée dans cette partie. Les valeurs des stocks en éléments dans chaque compartiment sont présentées à l'annexe 8.



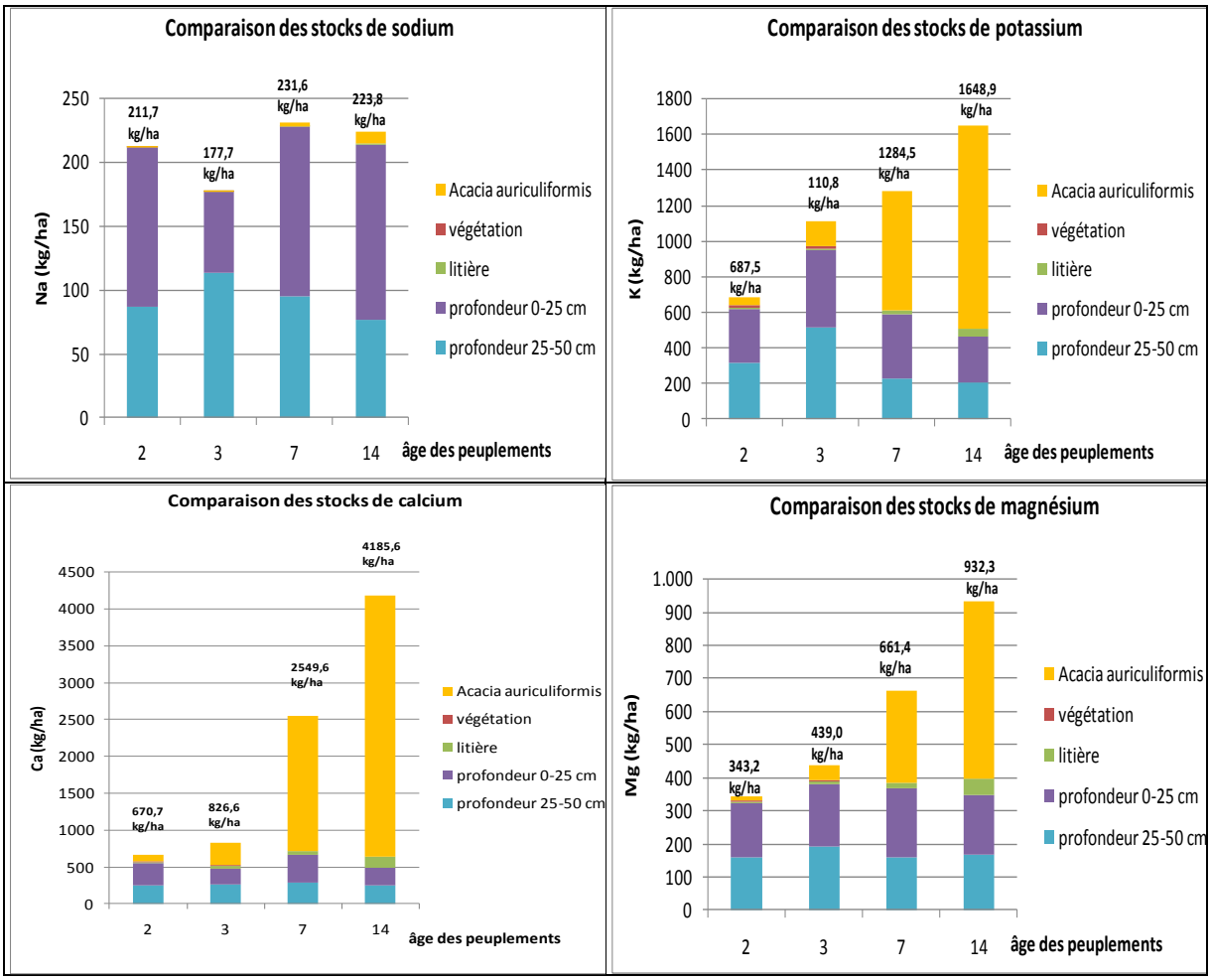


Figure 20 : comparaison des stocks en éléments totaux dans le sol, la litière, la végétation herbacée et dans les acacias.

Les stocks totaux d'azote augmentent légèrement avec l'âge des peuplements. En effet, ils sont en moyenne 1,5 fois plus élevés après 14 ans, par rapport aux stocks après 2 ans. Cette progression est la conséquence de l'augmentation des stocks dans les *Acacias* et dans la litière, les autres compartiments ne présentant pas d'évolution significative dans leurs stocks. Les stocks d'azote dans l'*Acacia* sont 37 fois plus élevés dans les arbres âgés de 14 ans, par rapport à ceux âgés de 2 ans. L'augmentation des stocks dans la litière est moindre, puisque les stocks sont 18 fois plus élevés sous le peuplement de 14 ans, par rapport aux stocks sous le peuplement de 2 ans.

L'augmentation des stocks totaux de carbone (sans le compartiment arbre) n'est pas non plus considérable, puisque les stocks sont 1,3 fois plus élevés après 14 ans, par rapport aux stocks après 2 ans. Les stocks dans le sol et dans la végétation herbacée ne montrent à nouveau pas d'évolution. Ce sont donc les stocks dans la litière qui présentent des modifications. Ils sont en moyenne 11 fois plus élevés sous le peuplement de 14 ans.

L'évolution des stocks totaux en phosphore est identique à celle des stocks totaux en azote. Les causes de cette évolution sont identiques à celles présentées pour les stocks totaux d'azote : les stocks évoluent dans la litière et les *Acacias*. Mais, contrairement aux stocks d'azote, les stocks dans la végétation herbacée augmentent légèrement (+70%). Les stocks dans les sols, quant-à-eux, n'évoluent pas d'un peuplement à l'autre.

Les stocks totaux en soufre pour le peuplement de 14 ans, sont 1,4 fois plus élevés que les stocks totaux en soufre pour le peuplement de 2 ans. Les stocks dans l'*Acaci*a pour le peuplement de 14 ans, sont environ 30 fois plus élevés que les stocks dans les arbres âgés de 2 ans. Les stocks en soufre dans la litière augmentent également, puisqu'ils sont multipliés par 16, entre les deux peuplements (2 et 14 ans). Une légère évolution des stocks dans les sols est observée pour la profondeur 0-25 cm, avec des teneurs 1,2 fois plus élevées pour le peuplement de 14 ans. Le changement des stocks dans la végétation est identique aux changements observés pour les stocks de phosphore.

Aucun changement n'est observé dans les stocks totaux de sodium du peuplement de 2 ans et du peuplement de 14 ans, mais ils augmentent entre 2 et 3 ans, pour rediminuer ensuite. Pour cet élément, on observe surtout un cycle géochimique puisque les compartiments arbres, litière et végétation ne contribuent quasi pas aux stocks totaux. Néanmoins, l'évolution des stocks dans les arbres est considérable puisqu'ils sont 128 fois plus élevés pour le peuplement de 14 ans, par rapport au peuplement de 2 ans. Cette hausse n'a pas d'impact sur les stocks totaux puisque les stocks dans les arbres ne représentent en moyenne que 4 % des stocks totaux dans le peuplement de 14 ans.

Un accroissement considérable entre les peuplements de 2 et 14 ans, est observé pour les stocks totaux de potassium, avec des stocks 2,4 fois plus élevés pour le peuplement de 14 ans. Cette augmentation est due aux évolutions des stocks dans les compartiments arbres (23 x), litière (7 x) et végétation herbacée (1,5 x). Les stocks dans les sols diminuent dans les deux profondeurs (- 17 % pour la profondeur 0-25 cm, et -34 % pour la profondeur 25-50 cm).

Le calcium est l'élément pour lequel les stocks totaux évoluent le plus, puisqu'ils sont multipliés par 6,2 entre les peuplements de 2 et 14 ans. A nouveau, ce sont les compartiments arbres, litière et végétation herbacée qui voient leurs stocks évoluer entre les peuplements de 2 et 14 ans (40 x pour les arbres, 7,8 x pour la litière et 1,8 x pour la végétation).

Les mêmes tendances sont observées pour les stocks de l'élément magnésium, avec toutefois une évolution moindre entre les stocks totaux des peuplements de 2 et 14 ans (2,7 fois au lieu de 6,2).

Pour l'ensemble des éléments considérés, les stocks dans la végétation herbacée sont largement inférieurs aux stocks dans les deux profondeurs de sol. Leurs proportions n'excèdent jamais 8 % des stocks dans les sols.

Il existe des variabilités de ces stocks dans les compartiments étudiés pour chaque tranche d'âge de peuplement étudié, y compris en savane, comme le prouvent les résultats de variance et d'écart-types présentés à l'annexe 8.

Discussion

1. Caractéristiques dendrométriques des plantations et itinéraires techniques

De nombreux facteurs peuvent influencer les propriétés des sols et il est par conséquent difficile de quantifier avec précision l'influence réelle de *l'Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols des plateaux Batéké.

Les résultats issus des placettes circulaires ont montré que la végétation ligneuse accompagnatrice est très dense et plus nombreuse que l'*Acacia* mais comporte beaucoup d'individus à faible circonférence. Il est donc certain que cette végétation joue tout comme l'*Acacia*, un rôle dans les modifications physico-chimiques du sol et qu'il est dès lors compliqué de définir quelle est l'influence effective de l'*Acacia auriculiformis* sur celles-ci.

Les propriétés du sol et l'impact de la végétation sur celles-ci dépendent aussi largement des travaux et pratiques agro-sylvicoles. Dans le cadre de ce mémoire, cet aspect, bien qu'important, ne sera abordé que brièvement.

Les travaux de terrain préparatoires aux plantations à Ibi-station, consistent à provoquer dans un premier temps un feu de savane contrôlé. Les arbres et la végétation ligneuse restants sont abattus et retirés de la zone brûlée. Un dessouchage est ensuite effectué. Il est suivi par un labour du sol. Les arbres peuvent ensuite être plantés suivant des grilles de 3x3 mètres. Les plantations se déroulent durant la saison des pluies. Dans les systèmes agro-forestiers, le manioc est également planté et ce en même temps que l'*Acacia*.

A Mampu, la savane est également brûlée avant les plantations mais aucun labour n'est réalisé. Les arbres et la végétation ligneuse présente sont également abattus et débardés. Les cultures vivrières (principalement le manioc et le maïs) sont les premières à être plantées, les *Acacias* sont plantés environ 3 mois après ces cultures. Les cultures vivrières durent environ 2 ans ; par après, seuls les *Acacias* continuent à grandir.

Aucun amendement n'est réalisé sur ces deux sites. Ceci n'étant pas nécessaire puisque les espèces cultivées sont bien adaptées aux limitations imposées par le type de sol rencontré dans cette région.

Les travaux préparatoires influencent les conditions que l'on peut trouver dans les plantations d'*Acacias*. Le labour permet une aération du sol, bien que cela ne soit pas nécessairement indispensable dans ces sols sableux déjà bien aérés. Il permet néanmoins un enfouissement dans le sol des débris végétaux résultant du passage du feu, pouvant éventuellement à terme modifier la composition organique des sols et aussi influencer l'activité microbienne des sols. La technique du labour est parfois contestée, notamment par le fait qu'à long terme, elle peut perturber la stabilité de l'habitat des microorganismes (FAO, Agriculture Sans Labour) du sol.

Les cultures vivrières peuvent également influencer les équilibres des stocks en éléments nutritifs dans le sol et peuvent donc influencer les résultats concernant l'étude de l'influence de

l'*Acacia* sur les propriétés des sols. Cette influence n'a pas du tout été abordée dans le cadre de ce mémoire mais pourrait constituer une piste de réflexion intéressante.

Au-delà des feux contrôlés lors de l'installation, les propriétés des sols peuvent également être modifiées par des feux non contrôlés. Sur les deux sites, des pare-feux sont installés afin d'éviter le passage de feux de savane, nombreux dans cette région. Il arrive que les pare-feux ne soient pas toujours assez bien entretenus et qu'un feu déclenché ravage quelques hectares de plantations. Ces feux de savane peuvent être dangereux pour les *Acacias* car cette espèce est sensible au feu. En effet, le feu induit un décollement de son écorce, le rendant sensible aux maladies. Néanmoins, il a été observé à Ibi-station, lors du passage du feu de savane dans le peuplement de 3 ans, que les *Acacias* n'ont pas été touchés par le feu, les pertes n'étant pas considérables. L'impact du feu sur les *Acacias* est donc variable et dépend surtout de la durée et de l'intensité du feu. Il est cependant certain que le passage de ces feux peut induire des changements dans la composition chimique des sols et dès lors influencer nos résultats (*cfr.* section 4 de la discussion).

Les pratiques agro-sylvicoles et culturales peuvent donc influencer les propriétés physico-chimiques des sols dans les plantations d'*Acacias*. Il est dès lors difficile d'étudier avec précision l'influence effective de *l'Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols puisqu'elles sont modifiées avant les plantations et sont donc déjà différentes des conditions en savane. Les différences observées entre la savane et le peuplement de 1 an pourraient donc en partie s'expliquer par la préparation du sol avant plantation. L'impact réel de ces pratiques n'a pas été étudié dans le cadre de ce mémoire mais pourrait être envisagé dans d'autres études afin d'améliorer l'interprétation des résultats.

2. Caractéristiques générales des sols

Les pH sont semblables à ce que l'on peut trouver dans la littérature. En effet, les Arénosols (FAO classification) ou Psamments selon la classification américaine (US taxonomy), sont généralement acides et ont des pH-eau compris entre 4 et 5, ce qui coïncide avec les résultats présentés dans cette étude. Kasongo *et al.* (2009 ; 2010 ; 2011) ont réalisé plusieurs études sur des Arénosols sur les plateaux Batéké et présentent ces sols comme acides, avec des valeurs de pH-eau comprises entre 4,9 et 5,3 (valeurs pour la savane) en fonction des sites d'étude, ce qui correspond bien aux valeurs de cette étude. Laclau *et al.* (2003 ; 2010) quant à eux, ont trouvé des valeurs de pH-eau comprises entre 4,7 et 5,4 dans les arénosols sous savane au Congo-Brazaville.

En ce qui concerne le pH mesuré dans une solution de sel, les mêmes conclusions peuvent être tirées : les résultats de Kasongo *et al.* (2009 ; 2010 ; 2011) coïncident avec ceux présentés dans le cadre de cette étude, avec des valeurs comprises entre 4,1 et 4,3.

En ce qui concerne les teneurs en azote, Kasongo *et al.* rapportent des valeurs comprises entre 0,045 et 0,06 % dans la savane, c'est-à-dire des valeurs 2 à 3 fois plus élevées que celles mesurées dans cette étude. Néanmoins, les différences absolues restent très limitées et ne sont que de l'ordre de 0,03%, ce qui est très faible. L'essentiel est que ces sols ne possèdent pas beaucoup d'azote. D'autres auteurs, comme Laclau *et al.* (2003) et Bernhard-Reversat (1996), ont mesuré les teneurs en azote dans des Arénosols au Congo-Brazzaville, plus précisément à la Pointe-Noire, et ont trouvé des valeurs nettement plus élevées puisqu'elles sont généralement 10 fois supérieures à celles que l'ont peut trouver sur les plateaux Batéké. Ces différences peuvent être en partie dues aux pratiques agro-sylvicoles qui ne sont peut-être pas les mêmes qu'à Ibi et Mampu. Ces sols ont peut être déjà été soumis à des cultures qui ont modifié leur composition chimique.

A nouveau, pour les teneurs en carbone, les résultats obtenus par Kasongo *et al.* (2009, 2010, 2011) sur leurs différents sites d'étude, sont semblables à nos résultats, avec des valeurs comprises entre 0,7 et 1,05% pour le carbone organique.

Les valeurs élevées du rapport C/N pourrait signifier que la matière organique est riche en substances non décomposées, preuve d'une faible activité microbienne (Dufey & Delvaux (2009)). Ce ratio élevé pourrait être dû à la richesse en lignine de la végétation herbacée et de la pauvreté de cette végétation en azote (Dabin (1980)).

La densité apparente est légèrement inférieure aux valeurs mesurées à la Pointe-Noire au Congo (Laclau *et al.*, 2003) qui étaient comprises en 1,3 et 1,5 g/cm³. Elle est par contre semblable aux valeurs trouvées par Schwartz & Namri (2002) sur les plateaux Batéké au Congo-Brazaville.

Etant donné que les valeurs de densité apparente à Ibi-station en savane sont comparables à celles que l'on trouve dans la littérature sur les plateaux Batéké, on peut en déduire que les stocks de carbone et d'azote seront du même ordre de grandeur entre les sites étudiés par Kasongo *et al. (*2009, 2010, 2011), et les nôtres, bien que ces auteurs n'aient pas calculé les stocks par hectare. Schwartz et Namri (2002) ont présenté des valeurs de stocks en carbone sur les plateaux Batéké comprises entre 8,8t/ha et 35,3 t/ha pour la profondeur 0-25 cm et comprises entre 11,6 t/ha et 35,6 t/ha pour la profondeur 25-50 cm. Les valeurs présentées dans le cadre de cette étude sont comprises entre ces dernières.

En ce qui concerne les concentrations en bases échangeables, elles sont semblables pour la profondeur 25-50 cm à celles mentionnées dans les études de Kasongo *et al.* (2009 ; 2010 ; 2011). Par contre, pour la profondeur 0-25 cm, les concentrations en calcium échangeable et en magnésium échangeable sont environ deux fois inférieures à Ibi-station, ce qui a pour conséquence une somme des bases échangeables également environ deux fois inférieure à celle présentée par Kasongo *et al.* (2009 ; 2010 ; 2011). Laclau *et al.* (2003), quant-à-eux ont trouvé les mêmes résultats de concentrations en bases échangeables que ceux présentés dans notre étude, sur le site de la Pointe-Noire. Au niveau des concentrations en aluminium, les mêmes résultats ont été présentés par Kasongo *et al.* (2009 ; 2011), ainsi que pour le taux de saturation de cet élément sur l'ECEC. Ce n'est pas le cas pour Laclau *et al.* (2003), qui ont trouvé des valeurs très nettement inférieures en aluminium, de l'ordre de 0,24 cmolc/kg sol. Comme mentionné précédemment, les valeurs d'ECEC sont faibles et montrent la faible fertilité chimique de ces sols. Latham *et al.* (1984-1985) ont mentionné que l'acidité du sol était une preuve d'un état de désaturation très poussé du complexe d'échange et que cet état de désaturation devient critique en dessous d'un pH-eau de 5, ce qui est le cas dans notre étude. Il est à noter que les teneurs en cations sur le complexe d'échange dépendent de beaucoup d'autres facteurs, comme la granulométrie, la minéralogie, les teneurs en carbone,…

Les faibles teneurs en bases échangeables trouvent en partie leur origine dans la composition minéralogique de ces sols. En effet, ces sols sont constitués principalement de quartz et de kaolinite (Kasongo *et al.,* 2009), minéraux peu altérables fournissant donc très peu d'éléments assimilables pour les plantes. Ces sols sont déjà très altérés. Cette tendance pourrait être inversée par l'apport de matière organique via les constituants végétaux comme cela sera discuté plus loin.

3. Influence de l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés des sols

Importance relative de l'effet « peuplement »

Avant toute discussion des résultats, il est important de rappeler que la méthodologie utilisée comporte quelques limites. En effet, il aurait été judicieux de prendre en compte plusieurs chronoséquences d'acacias afin de pouvoir comparer leurs résultats. De plus, le peuplement de 7 ans étant issu d'une deuxième rotation de 7 ans, les sols ont été influencés pendant 14 ans par les *Acacias*. Il est également possible, bien que ceci nous ait été infirmé sur place, que le peuplement de 14 ans ne soit pas non plus issu d'une première rotation, étant donné que les plantations de cette espèce ont commencé en 1987 sur le site de Mampu.

En ce qui concerne l'influence de *l'Acacia auriculiformis* sur les propriétés du sol, les résultats dépendent des propriétés étudiées, mais dans la majorité des cas, on ne note pas d'influence significative de l'*Acacia* ni sur les concentrations en éléments nutritifs, ni sur le complexe d'échange. Néanmoins l'*Acacia* diminue significativement les pH des sols et augmente les teneurs en azote. Le rapport C/N diminue également de manière significative.

L'étude de l'évolution des propriétés physico-chimiques avec l'âge des peuplements peut être contrastée par d'autres facteurs : les feux de savane qui sont nombreux dans cette région, ainsi qu'un éventuel effet de site entre les deux zones échantillonnées. La végétation présente sous les peuplements influence également les résultats, en particulier dans le cas des peuplements plus âgés, pour lesquels les quantités d'autres espèces ligneuses sont considérables. A cela s'ajoute l'historique des rotations des acacias sur le site de Mampu qui est incertain. Les travaux agro-sylvicoles peuvent également avoir un impact sur les propriétés des sols et dès lors masquer l'impact de l'*Acacia* sur ces propriétés. Ces impacts, comme mentionné précédemment, n'ont pas été étudiés dans le cadre de ce mémoire. Cependant, pour les éléments échangeable sodium, calcium, magnésium et potassium, il a été observé que les concentrations étaient supérieures pour le peuplement de 1 an, qui se distinguait significativement des autres peuplements et de la savane. Ces résultats peuvent être une preuve de modifications engendrées par les travaux agro-sylvicoles puisqu'il n'est pas raisonnable de penser que l'*Acacia* ait pu engendrer de telles modifications en seulement 1 an. De plus, les teneurs en ces éléments ne sont pas significativement modifiées dans les autres peuplements, même les plus âgés qui possèdent des valeurs proches de celles observées en savane.

Il est difficile d'étudier un éventuel effet de site entre Ibi-station et Mampu, en raison de l'absence de données concernant les sols en savane à Mampu. Néanmoins, au vu de la forte variabilité observée au sein de chaque peuplement, mais également en savane, il n'est pas impossible qu'une variabilité existe entre les deux sites d'étude.

Un certain nombre d'auteurs se sont déjà intéressés à l'influence de l'*Acacia* sur les sols et ne sont pas tous arrivés aux mêmes conclusions. La restauration de la fertilité des sols par la plantation d'*Acacia auriculiformis* est parfois mitigée et dépend beaucoup d'une région à l'autre, ainsi que du type de sol sur lequel est installée la plantation.

Kasongo *et al.* (2009), ainsi que Wang *et al.* (2010), Doi & Ranamukhaarachchi (2007) concluent leur travaux en disant l'*Acacia auriculiformis* peut être utilisé pour restaurer la fertilité de sols dégradés. D'autres auteurs rejoignent leur avis en ce qui concerne l'aptitude de l'*Acacia* à

restaurer les teneurs en carbone et en azote, et donc à restaurer les cycles de carbone et d'azote dans des sols chimiquement pauvres ou dégradés. Ces auteurs sont : Nyamadzawo *et al.* (2007), Lehmann *et al.* (1998), Isaac *et al*.(2010)(étude sur l'*Acacia mangium*), Macedo *et al. (*2008). Certains auteurs (Bernhard-Reversat *et al.* (1998), Bernhard-Reversat (1996), Partey *et al.* (2011), Salako *et al.* (2001)) n'ont trouvé aucune augmentation de la fertilité des sols, suite à la plantation d'*Acacia auriculiformis* pendant une courte durée (7 à 9 ans) mais néanmoins ils affirment qu'au bout d'un laps de temps plus long, l'*Acacia* est susceptible d'améliorer les propriétés physico-chimiques des sols, principalement par l'accumulation importante de litière produite par l'*Acacia*, qui à long-terme pourrait permettre le retour des nutriments au sol. Ce retour au sol des nutriments n'est pas constaté au bout de 7 à 9 ans car le taux de décomposition de la litière d'*Acacia auriculiformis* est très lent et la libération des éléments nutritifs est pas conséquent très lente. Kang *et al.* (1997) quant à eux, affirment que l'*Acacia* ne permet pas une amélioration significative de la fertilité des sols.

Une autre source d'apport de nutriments, et par conséquent d'amélioration de la fertilité pourrait être trouvée dans l'installation d'espèces sous les peuplements d'*Acacias*, qui par leur production de litière et de débris végétaux pourrait à long terme amener suffisamment de nutriments au sol. C'est en tout cas l'hypothèse émise par les auteurs Doi & Ranamukhaarachchi (2007) et Macedo *et al.* (2008) qui ont constaté que la plantation d'*Acacias* entraîne une colonisation de l'espace par beaucoup d'espèces, ce qui a pour conséquence une augmentation de la biodiversité locale. L'importance des espèces accompagnatrices dans le cadre de notre étude nous a permis également de conclure à l'arrivée massive d'espèces sous les plantations d'acacias. Cette hypothèse est évidemment valable dans le cas où ces espèces ne puisent pas plus de nutriments qu'elles n'en redonnent au sol et que les feux n'influencent pas les dynamiques des nutriments.

pH

Au niveau de l'influence de l'*Acacia auriculiformis* sur le pH du sol, Kasongo *et al.* (2009) et Yamashita *et al.* (2008) ont montré que la plantation d'*Acacia auriculiformis* (*Acacia mangium* pour Yamashita) avait pour conséquence une acidification des sols. Cette tendance a été confirmée par notre étude. Une acidification des sols peut amener à une saturation du complexe d'échange en aluminium et entraîner ainsi une toxicité aluminique pour les cultures (Kasongo *et al.* (2009), Dufey & Delvaux (2009)). Kasango *et al.* (2009) avaient d'ailleurs trouvé de fortes teneurs en aluminium, comparables aux nôtres ; selon ces auteurs, de telles teneurs sont susceptibles d'induire une certaine toxicité. Dans notre étude, l'évolution du taux de saturation en aluminium pour la profondeur 0-25 cm, ne suit pas l'évolution de pH observée puisque ce taux n'est pas supérieur pour les peuplements les plus âgés (7 et 14 ans). Cependant, pour la profondeur 25-50 cm, le taux de saturation a tendance à augmenter au fur et à mesure que le pH des sols diminue. Néanmoins, d'autres auteurs (Bernhard-Reversat (1996), Wang *et al.* (2010) et Kang *et al.* (1997)) n'ont pas relevé d'impact significatif de l'*Acacia* sur le niveau du pH des sols.

Le processus de nitrification pourrait être une des causes de l'acidification des sols (Kasongo *et al.* ,2009 ; Dufey & Delvaux, 2009). La nitrification n'a toutefois pas été étudiée dans ce mémoire. Certains auteurs tels que Wang *et al.* (2010) ont mesuré le taux de nitrification que l'on peut avoir sous des peuplements d'*Acacias* par rapport à d'autres espèces non fixatrices d'azote (*Eucalyptus citriodora, Schima superba, Schima wallichii, Castanopsis hystrix, Listea cubeba, Evodia lepta*) ; ils ont trouvé que ce taux ne variait pas significativement d'une espèce à l'autre dans le Sud de la Chine,

même si *l'Acacia auriculiformis* présentait les taux les plus élevés de nitrification. Yamashita *et al*. (2008) présentent d'autres sources potentielles d'acidification des sols notamment la diminution de la quantité de bases échangeables sur le complexe d'échange par l'immobilisation de ces cations par les plantes. Cette hypothèse d'acidification ne pourrait pas être retenue dans cette étude puisqu'il n'y a pas de diminution significative des concentrations en bases dans les échantillons de sol analysés. L'acidification des sols peut être provoquée par d'autres facteurs, notamment par l'augmentation de l'activité microbiologique du sol qui libère du CO_2. La décomposition des végétaux par les microorganismes acidifie également les sols via la minéralisation de la matière organique. L'*Acacia* influence probablement l'activité microbienne dans le sol en la stimulant via l'apport progressif de matière organique par la litière et les débris végétaux, bien que cette accumulation de matière organique soit contestée par certains auteurs, comme cela sera expliqué dans la suite du texte. Inversement, cette espèce pourrait freiner l'activité microbienne en acidifiant les sols car l'activité optimale de ces microorganismes se situe aux valeurs de pH proches de la neutralité (pH 6 à 8) (Dufey & Delvaux (2009) ; certaines bactéries manifestent néanmoins une certaine tolérance à l'acidité. Aucune mesure de l'activité microbienne n'a été établie dans le cadre de ce mémoire, il n'est dès lors pas possible de connaître l'impact de l'*Acacia* sur cette microfaune.

Eléments échangeables

Selon certains auteurs, l'*Acacia auriculiformis* peut influencer les teneurs en éléments échangeables présents sur le complexe d'échange. Kasongo *et al*. (2009) observent des valeurs moyennes deux fois plus élevées dans la somme des bases échangeables au bout de 10 ans de plantation d'*Acacias* par rapport à la savane (elles passent de 0,39 cmolc/kg à 0,84 cmolc/kg), pour la profondeur 0-25 cm, et sont trois fois plus élevées pour la profondeur 25-50 cm (elles passent de 0,14 cmolc/kg à 0,45 cmolc/kg). Ces augmentations sont dues principalement à l'élément calcium et un peu à l'élément magnésium, mais les auteurs ne notent pas d'évolution significative des concentrations des bases potassium et sodium avec l'âge des arbres. Pour les valeurs de CEC à pH 7, elles augmentent significativement avec l'âge des peuplements : elles sont doublées après 17 ans de plantation (les valeurs passent de 2,5 cmolc/kg à 4,8 cmolc/kg). Ces résultats confirment le fait qu'il faut attendre un certain temps avant d'observer un impact de l'*Acacia* sur les propriétés du sol, affirmation émise par les auteurs Bernhard-Reversat *et al.* (1998), Bernhard-Reversat (1996), Partey *et al.* (2011) et Salako *et al.* (2001). En ce qui concerne l'aluminium, Kasongo *et al.* (2009) observent une augmentation de ses concentrations avec l'âge des arbres (elles sont doublées, et passent de 1,03 cmolc/kg à 2 cmolc/kg). Les auteurs affirment cependant que le taux de saturation en aluminium du complexe d'échange n'est pas suffisant (il équivaut à environ 70 % de l'ECEC pour la profondeur 0-25 cm, et 80 % pour la profondeur 25-50 cm) pour induire une toxicité aluminique mais il est tel qu'il faut surveiller le pH du sol afin qu'il ne diminue pas. Il est à noter que dans l'étude de Kasongo *et al.* (2009), aucune étude de variance des résultats n'a été effectuée puisque les analyses chimiques se sont opérées sur un seul échantillon composite par peuplement et deux échantillons composites pour la savane. Il est par conséquent possible que les résultats présentés par ces auteurs ne tiennent pas compte d'une variabilité existante au sein de chaque site d'étude. Par contre, les auteurs Bernhard-Reversat (1996) et Yamashita *et al.* (2008) avaient noté une diminution des concentrations en éléments échangeables suite à la plantation d'*Acacia mangium*. Nos résultats se situent à l'intermédiaire entre ces deux types de résultats et renforcent l'idée que l'influence de l'*Acacia* sur la fertilité des sols est assez limitée.

Carbone et azote

Il semble logique que les teneurs en azote augmentent sous les plantations d'acacias puisque cette espèce fixe l'azote atmosphérique qui lui est nécessaire. Cet azote est ramené au sol via les retombées des débris végétaux et surtout des retombées de feuilles. Les résultats ont d'ailleurs prouvé l'augmentation des teneurs en azote dans la litière.

Le fait que les teneurs en carbone ne semblent pas augmenter de manière significative avec l'âge des peuplements est à priori, surprenant au regard de la théorie des cycles biochimiques de cet élément. En effet, l'acacia, par sa photosynthèse capte le CO_2 atmosphérique pour produire de la matière organique. Cette matière organique retombe au sol via les retombées de litière et de débris végétaux, ainsi que par les racines mortes contribuant donc, à terme à augmenter les teneurs en carbone organique dans le sol. Les analyses des stocks de matière sèche et de carbone dans la litière ont montré que ces stocks étaient considérables sous le peuplement de 14 ans (47 224 kg/ha de matière sèche et 15 649 kg/ha de carbone). Ces stocks sont donc susceptibles de modifier les teneurs en carbone dans les sols. Le manque d'évolution pourrait être dû au fait que la matière organique restituée au sol est minéralisée par les microorganismes et la majorité du carbone peut donc être libérée sous forme de CO2. Inversement, la litière peut s'accumuler à la surface du sol (les résultats des stocks de matière sèche vont dans ce sens) si elle ne se décompose pas facilement. Le carbone organique aura donc tendance à rester dans cette couche superficielle et ne sera pas redistribué au sol. Il est possible également que le carbone soit transféré sous la forme soluble mais que la texture sableuse des sols entraîne une lixiviation de cet élément en profondeur. Il est dès lors possible qu'au final les rapports inputs/outputs du sol soient conservés d'un type de couvert végétal à l'autre (savane *versus Acacia*), et que par conséquent les teneurs et stocks en carbone n'évoluent pas significativement dans le sol. Au vu de l'importance des autres compartiments (litière et végétation herbacée) sur les équilibres dans les stocks en carbone, mais aussi pour les autres éléments, une étude de la distribution des stocks entre les différents compartiments sera entreprise dans la suite de ce travail (*cfr.* section 5 de la discussion).

La plupart des auteurs constatent un enrichissement en carbone et en azote des sols présents sous des peuplements d'*Acacia auriculiformis*. Kasongo *et al.* (2009) et Isaac *et al.* (2010) ont constaté l'augmentation des teneurs en carbone organique et en azote, déjà après 4 ans pour Kasongo *et al.* (2009), grâce à la plantation de l'espèce *Acacia*, avec pour Kasongo *et al.* (2009) des teneurs six fois plus élevées dans un peuplement de 17 ans, par rapport aux conditions en savane. Kansongo *et al.* (2009) ont également constaté une diminution du rapport C/N avec l'âge du peuplement. Bernhard-Reversat (1996) note aussi, l'augmentation des teneurs en carbone et en azote dans le sol, après 7 à 9 ans. Cette augmentation n'est pas observée sous des arbres moins âgés. Selon cette même auteur, il faut un certain laps de temps pour constater une augmentation des teneurs en azote car l'azote fixé par l'*Acacia* s'accumule surtout dans la biomasse de l'arbre et donc dans la litière. Il faut donc attendre que la libération des nutriments de la litière ait lieu pour qu'il y ait une augmentation significative de ces éléments dans le sol. Wang *et al.* (2010) ont trouvé que les *Acacias* permettent de mieux enrichir le sol en azote et en matière organique, que d'autres espèces locales (Sud de la Chine). Nyamadzawo *et al.* (2007) avaient également conclu que les jachères avec de l'*Acacia augustissima*, et de manière générale, les jachères avec des arbres fixateurs d'azote, étaient capables d'augmenter plus significativement les quantités de carbone dans le sol que des espèces non fixatrices d'azote, surtout à long terme. Macedo *et al.* (2008) ont montré qu'utiliser

l'*Acacia* pour restaurer des sols dégradés suite à la déforestation, était une bonne idée puisqu'ils permettaient en 13 ans d'arriver aux mêmes teneurs en azote et en carbone que les teneurs présentes dans les sols sous forêt « naturelle ». Lehmann *et al.* (1998) ont étudié l'impact sur le sol de différents types d'amendements, notamment par l'ajout de biomasse issue d'arbres capables de fixer l'azote atmosphérique. Ils en avaient conclu, que ces types d'amendements permettaient d'augmenter significativement les teneurs en azote. En ce qui concerne les teneurs en carbone, tous les amendements (légumineux et non-légumineux) augmentaient de manière semblable ces teneurs, et donc l'*Acacia* n'avait pas une meilleure aptitude à augmenter les teneurs en carbone dans le sol. On pourrait donc en conclure suite à cette étude, qu'à long terme, l'*Acacia* peut enrichir le sol en azote principalement, mais aussi en carbone, suite à la retombée de débris végétaux et de litière. Kang *et al.* (1997), en revanche, ne notent aucun changement dans les teneurs en carbone organique, suite à la plantation d'arbres fixateurs d'azote, notamment l'*Acacia*. Enfin, Salako *et al.* (2001) constatent une diminution des teneurs en carbone organique.

Plusieurs auteurs (Feller et Beare (1997), Lehmann *et al.* (1998), Feller (1991), Bernhard-*Reversat et al.* (1998) insistent sur le fait que les teneurs en carbone et azote dépendent largement des proportions de sable, limon et argile dans sol. En effet, un sol riche en argile aura tendance à fixer d'avantage l'azote et le carbone. Les sols sableux sont donc par définition moins susceptibles de fixer ces deux éléments. On comprend dès lors pourquoi les auteurs Salako *et al.* (2001) avaient trouvé une diminution des teneurs en carbone organique puisqu'ils notaient également une augmentation de la teneur en sable dans les sols liée au vieillissement des arbres, et donc une diminution significative des teneurs en limon et en argile.

L'augmentation des teneurs en azote est souvent mise en lien dans la littérature avec la capacité de fixation de l'azote atmosphérique de l'*Acacia* grâce à ses nombreuses symbioses. Bernhard-Reversat (1996) a calculé la quantité d'azote fixée par deux espèces d'*Acacia*. L'*Acacia auriculiformis* fixe en moyenne 140 kg/ha d'azote par an et l'*Acacia mangium* fixe 120 kg/ha d'azote par an. Normalement, selon elle, cette fixation d'azote leur permet de couvrir en moyenne 50 % de leurs consommations annuelles en azote mais d'autres auteurs cités dans son étude (Roberston et Rosswall (1986)) estiment que cette fixation d'azote assure 85 à 95% de leur consommation en azote. Bernhard-Reversat *et al.* (1998) ont également écrit que la minéralisation de l'azote fournit 50 % des besoins de l'*Acacia*, et donc que la fixation de l'azote apporte également 50 % de leurs besoins.

Il semble important que l'*Acacia* trouve d'autres sources d'azote dans le sol. Isaac *et al.* (2010) avaient d'ailleurs explicité que la fixation d'azote par l'*Acacia* dépendait fortement de l'âge de l'individu et avait tendance à diminuer avec l'âge. Il est par conséquent clair que l'*Acacia* s'alimente en azote à partir d'autres sources que la fixation atmosphérique au fur et à mesure qu'il grandit. Sa source principale provient des processus de minéralisation de la matière organique et de la nitrification par les microorganismes surtout dans les sols déjà altérés, comme le sont les sols tropicaux. D'après Isaac *et al.* (2010), le vieillissement des acacias entraîne une stimulation de l'activité microbienne dans le sol, induisant par conséquent une augmentation de la minéralisation de l'azote dans le sol. Le taux de fixation d'azote serait selon eux corrélé au taux d'azote dans le sol : au plus il y en a dans le sol, au moins l'*Acacia* aura tendance à fixer de l'azote atmosphérique car ses besoins seront déjà bien couverts par les quantités présentes dans le sol. Kasongo *et al.* (2009) et Bernard-Reversat (1996) avaient également constaté l'augmentation de la minéralisation de l'azote et de la nitrification dans les peuplements plus âgés. Dans une autre étude, Bernard-Reversat *et al.*

(1998), n'avaient pas observé d'augmentation des teneurs en azote dans le sol suite au dépôt de litière d'*Acacia*. Ils en avaient conclu également que cette absence d'augmentation des teneurs ou des stocks était probablement à mettre en lien avec l'augmentation de la minéralisation de l'azote et donc à l'appauvrissement de la matière organique en azote. Comme présenté précédemment, Wang *et al. (*2010) donnent des valeurs de minéralisation de l'azote et de nitrification sous des peuplements d'*Acacia auriculiformis*. Elles sont pour la minéralisation de l'azote de 10,9 ± 2,08 kg/ha/mois et de 0,93 ±0,92 kg/ha/mois, respectivement pour la saison des pluies et la saison sèche. En ce qui concerne la nitrification, elles sont de 14,67 ±1,40 kg/ha/mois et de 4,09 ± 0,35 kg/ha/mois, respectivement pour la saison des pluies et la saison sèche. Ces auteurs constataient que l'*Acacia auriculiformis* était l'espèce présentant les plus hautes valeurs de ces taux.

Densité apparente

En ce qui concerne l'impact de l'*Acacia auriculiformis* sur la densité apparente du sol, nous avions constaté que celle-ci augmentait avec l'âge des arbres mais pas de manière significative. Salako *et al.* (2001) étaient arrivés aux mêmes conclusions, avec une diminution de cette densité la première année et une augmentation les années suivantes. Par contre, Kang *et al.* (1997) ont observé une diminution de la densité apparente sous des peuplements d'*Acacias*.

Influence de la litière

La litière joue un rôle majeur dans le retour des nutriments aux sols mais aussi un rôle dans l'augmentation de l'azote dans le sol, via la fixation symbiotique de l'azote par l'*Acacia* qui fournit de grandes quantités d'azote au système aérien des arbres, et plus particulièrement aux feuilles. L'*Acacia auriculiformis* est une espèce qui a tendance à produire beaucoup de litière, surtout pour les individus les plus âgés Cette production vaut environ, 10 t/ha/an selon Bernhard-Reversat & Schwartz (1997). Cette production élevée a déjà été mise en avant dans notre étude et est confirmée également par Bernhard-Reversat (1996) et par Wang *et al.* (2010) qui avaient constaté que cette espèce en produisait beaucoup plus que les autres espèces étudiées, même comparativement aux autres espèces fixatrices d'azote. Macedo *et al.* (2008) avaient comparé les productions de litière par l'*Acacia* et par la forêt native et avaient conclu que les productions étaient identiques, ce qui confirme ces valeurs élevées de production de litière par l'*Acacia*. En ce qui concerne la qualité de cette litière, les avis divergent. Partey *et al.* (2011) soutiennent une faible qualité minérale des litières d'acacias, avec des teneurs en azote inférieures à 2,5% et des teneurs en phosphore inférieures à 0,25%. Si nous nous basons sur ces références, on peut également en déduire que dans le cadre de notre étude, la litière est pauvre en nutriments. Bernhard-Reversat et Schwartz (1997) font état de teneurs élevées en azote dans la litière d'*Acacia* en accord avec la fixation d'azote atmosphérique par cette espèce. Par contre, tous sont d'accord pour dire que la litière se décompose très lentement et qu'il faut donc attendre plusieurs années pour remarquer un effet significatif de la litière sur la quantité de nutriments dans le sol. D'après Bernhard-Reversat et Schwartz (1997), ce taux de décomposition vaut 0,69 et dépend fortement du taux de tannins présents dans la litière, ce taux ayant tendance à diminuer avec l'âge des arbres. Le taux de décomposition a été calculé en divisant la quantité de litière tombée par la somme de la litière sur le sol et de la litière fragmentée au sol.

4. Feux de savane : impact sur le sol

L'impact du feu sur le peuplement de 3 ans, dépend des propriétés considérées et des éléments, mais également de la profondeur à laquelle on s'intéresse. Généralement, la couche de surface est la plus touchée, ce qui paraît normal puisque le feu, à court terme, n'a qu'un impact en surface.

Le feu a eu pour conséquence une augmentation du pH, ce qui est positif pour ces sols très acides. Il a également eu un impact significatif sur le complexe d'échange, avec une augmentation des teneurs en Fe, K, Mg et Mn échangeables et du taux de saturation en bases, et une diminution des teneurs en Al échangeable, ainsi que de son taux de saturation, de l'ECEC et du taux de saturation des cations acides. La diminution de l'ECEC est principalement due à la diminution des quantités d'aluminium. Les teneurs en azote ont également été modifiées suite au passage du feu, avec une augmentation significative de ces dernières dans la profondeur 0-25 cm et une diminution du rapport C/N pour la profondeur 25-50 cm, les teneurs en carbone restant semblables dans les deux zones. Les concentrations en éléments totaux K, Mg, Al et Fe dans la profondeur 0-25 cm étaient plus faibles dans la zone brûlée du peuplement de 3 ans, mais cette différence n'était pas significative dans la majorité des cas, sauf pour le fer et l'aluminium. Les teneurs en Na, Ca et Mn, ainsi que le TRB étaient plus élevées dans la zone brûlée, bien que ces différences ne soient significatives que pour le sodium. Au niveau de l'impact sur la densité apparente, il semble que le feu n'ait pas modifié significativement les valeurs.

Les résultats ont permis de déterminer l'impact du feu sur les propriétés du sol dans cette zone mais il est important de nuancer nos résultats. En effet, l'objectif premier de ce travail n'était pas d'étudier l'impact du feu, et donc la méthodologie n'a pas été mise au point pour répondre spécifiquement à cette question. Il faudrait procéder à d'autres études approfondies à Ibi-station pour prétendre connaître l'impact du feu dans cette région. La méthodologie envisageable serait de comparer plusieurs couples de peuplements brûlés et non-brûlés.

Ces résultats permettent tout de même de conclure qu'il est important de connaître l'historique des feux dans la région que l'on étudie, afin de nuancer l'effet possible de l'*Acacia* sur les propriétés du sol. Malheureusement, dans le cadre de cette étude, l'historique des feux pour les peuplements de 7 et 14 ans n'était pas connu, et donc nous ne pouvons pas affirmer que les deux zones, Ibi-station d'une part, et Mampu d'autre part, sont des sites comparables au niveau des propriétés initiales du sol.

L'impact du feu sur les propriétés du sol peut s'étudier selon deux approches qui sont complémentaires. En effet, certains auteurs se sont directement intéressés aux propriétés du sol qui étaient affectées par le passage d'un ou plusieurs feux consécutifs, alors que d'autres se sont d'avantage intéressés à l'impact sur la végétation présente en savane, en essayant de quantifier les éléments nutritifs volatilisés, ainsi qu'en décrivant les dynamiques de recolonisation de l'espace brûlé.

Impact du feu sur les propriétés du sol

En ce qui concerne l'impact du feu sur les propriétés physico-chimiques du sol, immédiatement mesurées après le passage du feu, les avis divergent. Pour Savadogo *et al.* (2007), il

n'y a aucun impact du feu. Pour Jensen *et al.* (2001), le feu n'entraîne ni perte, ni augmentation des teneurs en éléments nutritifs, sauf une légère diminution des teneurs en azote qui peut être compensée par la fixation d'azote atmosphérique des légumineuses. En l'absence d'espèce fixatrice d'azote, il risque donc d'y avoir une perte en azote suite au passage du feu. Ces mêmes auteurs avaient tout de même constaté une augmentation du pH du sol après le passage du feu, tendance également constatée dans notre comparaison des deux zones dans le peuplement de 3 ans. Selon eux, cette augmentation provient des fortes teneurs en cations dans les cendres. Kang *et al.* (1997) notent un impact à court terme du feu se manifestant par une augmentation du pH et une augmentation des teneurs en éléments nutritifs (43% pour le carbone organique, 87% pour le phosphore, 86% pour le potassium, 71% pour le calcium et 61% pour le magnésium) à la surface du sol. Cependant, ils affirment qu'à long terme, il n'y a pas de changement dans les teneurs et dans les valeurs de pH du sol car ces changements restent en surface. Coetsee *et al.* (2010) ne notent pas non plus d'impact négatif ou positif du feu sur les teneurs en azote total et en carbone du sol, mais nuancent leurs résultats en affirmant que si le feu empêche la réinstallation du couvert, les cycles de carbone et d'azote de l'écosystème peuvent être affectés par ce changement de composition végétale. Les zones soumises fréquemment à des feux de savane, pourraient donc être sujettes à une diminution des teneurs en carbone et en azote des sols, pouvant entraîner une perte de fertilité.

D'autres études ont montré l'impact positif des feux sur les propriétés physico-chimiques des sols. L'étude réalisée par Munitz da Silva & Batalha (2008) compare trois zones de savane arbustive soumises au feu à des fréquences différentes : l'une est soumise à un feu chaque année, une autre à un feu occasionnel et une autre protégée du feu pendant toute la durée de l'étude. Leurs résultats sont les suivants : les teneurs en matière organique, en argile et en limon, ainsi que les concentrations en magnésium échangeable sont supérieures dans la zone soumise au feu annuel. Les concentrations en phosphore et calcium échangeables, quant à elles, sont identiques dans les trois modalités. Les auteurs notent une perte d'azote via la volatilisation qu'ils considèrent toutefois comme négligeable par rapport aux réserves en azote du sol, et à la fixation d'azote par des espèces légumineuses. Leur étude a également démontré que le pH est le plus faible dans la zone protégée du feu, et que par conséquent les concentrations en aluminium échangeable y sont également les plus élevées. On pourrait donc en déduire que le feu permet d'augmenter le pH et diminuer la proportion d'aluminium sur le complexe d'échange. L'effet positif sur le rendement des cultures, après le feu, a été observé par Kato *et al.* (1999) au Brésil, avec une augmentation de l'accessibilité des nutriments. Cet effet positif était plus important que lors de l'incorporation directe de la biomasse au sol. Ceci est du probablement, d'après eux, à la vitesse lente de minéralisation de la matière organique dans cette région. Une autre étude élaborée au Brésil (Pivello *et al.* (2010)) a montré des résultats semblables, avec une augmentation du pH, ainsi qu'une augmentation de la disponibilité des éléments calcium, magnésium et potassium, et une réduction des concentrations en aluminium échangeable, phosphore et magnésium assimilable. Pivello et al.(2010) ont cependant nuancé leurs résultats car le feu peut fortement affecter les dynamiques dans la végétation, et ainsi contribuer à une perte en nutriments due à leur volatilisation lors du passage d'un feu. D'après eux, les nutriments présents dans le sol ne peuvent pas être volatilisés car les températures de surface du sol ne sont jamais assez élevées. Ils ont mesuré à une profondeur de 1 cm, une température n'excédant jamais 31°C. Selon les auteurs, les effets du feu dépendent surtout de la fréquence des feux et pas tellement de la durée. Si une zone est soumise régulièrement au feu, elle pourrait à long terme voir sa fertilité diminuer.

Cook (1994) a étudié l'influence du feu dans une savane tropicale en Australie et n'a pas noté d'impact négatif du feu sur les concentrations en éléments nutritifs P, S, K, Ca, Mg, Zn et Cu car les pertes sont négligeables par rapport aux réserves dans le sol. Toutefois, en ce qui concerne l'azote, les pertes ne peuvent pas être compensées, ni par le dépôt atmosphérique, ni par la fixation symbiotique de cet élément, même si cette dernière était stimulée. Il cite les auteurs Norman et Wetselaar (1960), qui ont indiqué qu'une perte de 0,45g N/m² pouvait être considérée comme insignifiante, au vu des réserves disponibles dans les sols de cette région. En se basant, sur cette limite, Cook (1994) en a conclu que les pertes d'azote qu'il avait observées (2 g N/m²/an) étaient supérieures à ce seuil et que par conséquent les pertes d'azote ne pouvaient pas être compensées par d'autres sources.

Les impacts du feu sur les propriétés du sol d'une région, sont donc très variés et dépendent beaucoup des conditions initiales qui régnaient avant le feu, ainsi que de la fréquence de ces feux.

Impacts du feu sur la végétation : impacts indirects à long terme

Le feu peut influencer également les réserves en nutriments du sol et ses propriétés physiques par l'intermédiaire de la végétation. Deux aspects de l'impact du feu vont être envisagés : l'impact du feu sur la volatilisation des minéraux dans la végétation, et donc leur non-retour au sol, ainsi que l'impact du feu sur les dynamiques de régénération de la végétation, qui inévitablement influenceront les quantités de minéraux que l'on pourra trouver dans le sol, après leur décomposition.

Apani (1990), Savadogo *et al.* (2007) et Sheuyange *et al.* (2005), ont montré que les feux n'influencent généralement pas la biodiversité des sites, ni la couverture végétale que l'on peut trouver. Savadogo *et al.* (2007) parlent même d'un impact positif du feu sur les dynamiques des écosystèmes de savane, à condition que la fréquence des feux ne soit pas trop élevée pour éviter de réduire la résistance au feu de certaines espèces. Apani (1990) modère ses résultats en insistant sur le fait que les conséquences du feu sur les dynamiques de régénération dépendent beaucoup de la période à laquelle se déroule l'événement (la végétation repousse moins vite en saison sèche qu'en saison des pluies), de l'intensité du feu, ainsi que de sa durée. Minitz da Silva et Batalha (2008), suspectaient une diminution de la richesse des espèces avec le feu, car l'espace pouvait être recolonisé par des espèces invasives, tolérantes aux feux de savane. Dans le cadre des plateaux Batéké, la plupart des espèces sont tolérantes aux feux (Apani (1990)), et donc le risque de recolonisation par d'autres espèces au détriment de celles présentes est minime.

La volatilisation des minéraux dans l'atmosphère par le feu peut être très importante et peut donc influencer le retour des nutriments de la végétation au sol, ce qui peut dans le cas de feux fréquents, mener à long terme à un appauvrissement de ces sols. D'après Jensen *et al.* (2001), les quantités d'éléments volatilisés dépendent de la température du feu, ainsi que de sa durée et de son intensité. Dans l'étude de Laclau *et al.* (2002), les quantités volatilisées étaient respectivement de 85, 25, 39, 21 et 28% pour les éléments N, P, K, Ca et Mg, présents dans la biomasse aérienne et dans la litière. Cook (1994) avait quant à lui, trouvé des valeurs de 70 % pour les éléments N, S et Zn, et des valeurs inférieures à 60% pour les éléments K, Ca, Mg et Cu. La volatilisation peut être parfois compensée par les retombées atmosphériques dans les pluies lors des saisons des pluies, sauf, selon lui en ce qui concerne l'azote. Laclau *et al.* (2002) avaient tenu les même propos au sujet de l'azote et insistaient par conséquent sur l'importance des espèces capables de fixer l'azote atmosphérique

pour espérer un retour de l'azote au sol. On pourrait imaginer, dans le cadre de notre étude, qu'une partie des pertes d'azote engendrées par les feux, a pu être compensée par la fixation de l'azote par l'*Acacia auriculiformis*. Les cendres issues du brûlage de la végétation, si elles ne sont pas transportées trop loin, peuvent contribuer également au retour au sol d'une partie des minéraux. Pivello *et al.* (2010) avaient cependant observé de faibles quantités en azote et en soufre dans les cendres, ce qui suggère que ces cendres, surtout dans le cas de l'azote, ne permettent pas un retour au sol suffisant. De plus, Cook (1994) avait estimé les pertes en nutriments suite au transport des cendres par le vent : les pertes étaient de 45% pour les éléments N, S et Zn et de plus de 60% pour les autres nutriments (P, K, Ca, Mg et Cu).

L'influence des feux de savane sur les propriétés du sol sont variables et dépendent principalement de la fréquence de ces feux, ainsi que des conditions initiales avant son passage, et du type de végétation. Il est également important de déterminer le temps écoulé entre le passage du feu et les analyses de sol effectuées car cela peut fortement influencer les résultats fournis dans le cadre de ce mémoire et ceux fournis par les auteurs précités. En effet, le feu peut à court terme diminuer de manière significative les teneurs en minéraux dans le sol mais à long terme ces pertes en nutriments peuvent être contrebalancées par la réinstallation de la végétation herbacée et arbustive.

5. Evolution des stocks en azote, carbone et en éléments totaux dans les compartiments de l'écosystème

A partir des graphiques illustrés à la figure 20, il a été possible de déduire l'évolution des stocks dans les différents compartiments.

Les stocks totaux augmentent avec l'âge des peuplements, pour les éléments potassium, calcium et magnésium et ce parfois de manière considérable. Pour les autres éléments, les tendances sont moins marquées. Les changements dans les stocks totaux sont principalement dus aux modifications des stocks dans les *Acacias* et dans la litière, sauf pour les stocks de l'élément sodium qui sont quasi uniquement influencés par les stocks dans les sols.

Les stocks de carbone et d'azote ont tendance à augmenter dans la litière, et ce de manière significative, comme le prouvent les résultats des tests de Wilcoxon et des tests de Tukey-Kramer. Cette tendance est à mettre en relation avec le fait que les quantités de litières sont largement supérieures dans les peuplements de 7 et 14 ans, ce qui semble logique puisque les couvertures végétale, arbustive et arborescente sont très denses, ce qui a pour conséquence d'augmenter la production totale de litière.

Etant donné que les stocks dans les sols n'évoluent pas sensiblement sauf pour le potassium dont les stocks ont tendance à diminuer avec le vieillissement des *Acacias*, d'autres sources d'éléments nutritifs sont mobilisées pour permettre la croissance de cette espèce sur ces sols chimiquement pauvres et altérés. Il est probable que l'A*cacia* puise en partie ses éléments dans d'autres couches du sol que celles étudiées, ce qui semble logique puisque ses racines peuvent atteindre plusieurs mètres (Bernhard-Reversat *et al.* (1993)). Il est à noter que pour les peuplements âgés de 2 et 3 ans, les stocks dans la végétation sont très faibles, comparativement à ceux des sols et des *Acacias*. La végétation herbacée ne peut donc pas influencer sensiblement les stocks dans le sol.

Les retombées atmosphériques liées aux précipitations pourraient également jouer un rôle important sur l'équilibre des stocks dans les sols et les apports en éléments pour les *Acacias*. La période à laquelle l'événement pluvieux se déroule influence les concentrations présentes dans la pluie. En effet, elles sont moindres pendant la saison des pluies (Laclau *et al.* (2003)). La composition des précipitations a été mesurée à la Pointe-Noire au Congo-Brazaville (Laclau *et al.* (2003)) et elle était dominée par H^+ , Ca^{2+}, Cl^- et par le DOC (Carbone Organique Dissous). Ces chercheurs ont également observé des augmentations des concentrations en NH_4^+, NO_3^-, K^+ et SO_4^{2-} durant la saison sèche, suite à la combustion de la biomasse de savane. Les feux de savane influencent donc les quantités en éléments présents dans les précipitations. Les quantités en éléments sont également influencées dans cette région par les dépôts marins et par les particules provenant des déserts africains qui peuvent être transportées sur de longues distances.

Les concentrations dans les précipitations valables pour la saison des pluies ont été utilisées afin d'estimer les quantités d'éléments nutritifs que les précipitations peuvent apporter annuellement sur les plateaux Batéké. Ces quantités ont été calculées en utilisant la pluviométrie moyenne des plateaux Batéké (1500 mm/an). Les concentrations valables pour la saison sèche n'ont pas été utilisées car aucune donnée concernant l'intensité et la fréquence des événements pluvieux durant cette saison n'a été fournie. Ces données sont difficiles à récolter puisque les éléments

pluvieux sont très aléatoires durant cette saison. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 15 : Estimation des apports en éléments dans les précipitations

Elements (kg/an/ha)				
K	**Ca**	**Mg**	**Na**	**DOC**
2,70	15,87	1,17	6,31	66

DOC= Carbone Organique Dissous

Les apports par les pluies sont toutefois faibles au regard des immobilisations annuelles dans les *Acacias* (environ 66,2 kg/ha/an pour le K, 244,2 kg/ha/an pour le Ca, 36,6 kg/ha/an pour le Mg) sauf pour le sodium puisque les stocks dans les *Acacias* évoluent d'environ 0,77 kg/ha/an. Il est à noter que pour le sodium, il avait été observé que le cycle était principalement géochimique puisque l'*Acacia* ne semblait pas prélever de quantités significatives. Au vu du rapport entre les apports atmosphériques et les immobilisations annuelles dans les acacias, il est difficilement envisageable que les apports via les précipitations constituent une source majeure d'éléments pour cette espèce, sauf pour le sodium. De plus, une partie de ces éléments retrouvés dans les pluies, peut subir une lixiviation en profondeur du sol. Il est à noter que les retombées atmosphériques dans les précipitations durant la saison sèche sont beaucoup plus élevées puisque les concentrations dans les pluies étaient en moyenne, 100 fois plus élevées.

Les apports par les précipitations sont comparables aux stocks dans la végétation pour l'élément calcium. Ils sont nettement plus élevés pour l'élément sodium, puisqu'ils sont environ 80 fois plus élevés dans l'eau de pluie par rapport aux stocks dans la végétation sous le peuplement de 2 ans, et 40 fois plus élevés par rapport aux stocks dans la végétation sous le peuplement de 3 ans. Pour les autres éléments, les apports par la pluie sont environ 5 fois plus faibles que les stocks dans la végétation.

Les stocks des éléments dans la litière influencent également les stocks dans les sols via sa dégradation qui libère des éléments nutritifs. Ces stocks dans la litière augmentent considérablement, ce qui permet un retour d'une partie des nutriments au sol. Les stocks dans la litière sont en moyenne de 7 à 18 fois plus importants sous les *Acacias* de 14 ans par rapport à ceux de 2 ans, cela étant dû principalement à l'augmentation de la production de litière par l'*Acacia*, comme mentionné précédemment. La litière peut donc à terme contribuer à redistribuer les stocks dans les sols. Les retombées de litière annuelles pour cette espèce sont estimées à plus ou moins, 10 t/ha/an pour une installation des arbres selon des grilles de 3,5 x 3,5 mètres pour des individus âgés d'environ 7 ans (Bernhard-Reversat & Schwartz (1997)). Il est à noter que la litière présente sous les peuplements d'*Acacia*s âgés de 14 ans, ne provient pas uniquement de ces derniers mais également des autres espèces accompagnatrices présentes dans le peuplement. Les quantités de litière déposées annuellement sont donc en réalité plus élevées que celles estimées dans l'étude de Bernhard-Reversat & Schwartz (1997). Si nous tenons compte de ces valeurs pour les retombées annuelles, l'âge de la litière présente sous le peuplement de 14 ans peut être estimé à plus ou moins 4,5 ans puisque les stocks de matière sèche s'élèvent à environ 47 200 kg/ha. Ces chiffres prouvent une fois de plus le faible taux de décomposition de la litière d'Acacia, constaté par des auteurs déjà précités. Les stocks dans la litière influencent donc à long terme les stocks dans les sols mais il faut probablement attendre un certain laps de temps pour constater un retour au sol de ces éléments.

Bien que les stocks dans les *Acacias* augmentent considérablement, on ne note pas de modifications des stocks totaux en éléments dans la couche 0-50 cm des sols. Il est donc probable que les couches plus profondes du sol puissent être modifiées par le prélèvement des racines des *Acacias*. Les éventuelles pertes d'éléments dans les horizons de surface des sols pourraient être en partie compensées par les stocks dans la litière. Ceci pourrait suggérer que l'exportation des arbres après 14 ans n'induirait pas de diminution significative des stocks dans la couche 0-50 cm des sols. Les apports atmosphériques via les précipitations et les apports par la végétation, quant-à-eux, ne peuvent pas permettre un retour suffisant des nutriments au sol, excepté pour le sodium dans les précipitations.

Il serait donc opportun d'étudier les stocks à plus grande profondeur afin de déceler un impact éventuel de l'*Acacia* dans ces couches profondes du sol.

Il faut également nuancer nos propos, puisque comme mentionné dans les résultats, les stocks dans chaque compartiment sont assez variables au sein de chaque peuplement et peuvent donc varier énormément d'un point de prélèvement à l'autre.

Conclusions et perspectives

Dans le cadre de ce mémoire, des échantillons de sol (0-25 cm et 25-50 cm), de litière et de végétation herbacée ont été prélevés sur deux sites d'étude situés sur les plateaux Batéké, en République Démocratique du Congo. L'échantillonnage s'est effectué en savane mais également dans des peuplements d'*Acacias auriculiformis* d'âge différent (1, 3, 7 et 14 ans), formant ainsi une chronoséquence. Cette étude comprenait plusieurs objectifs.

Le premier objectif consistait à décrire certaines propriétés des sols sur lesquels ont été plantés des *Acacias auriculiformis*, dans les deux zones d'étude. Ces propriétés sont les suivantes : pH H_2O et $CaCl_2$ des sols, les teneurs en azote et en carbone, ainsi que les concentrations en éléments échangeables et en éléments totaux. La densité apparente a également été mesurée, afin de permettre les calculs des stocks en éléments. Ce travail a permis de démontrer une fois de plus la faible fertilité chimique qui caractérise les arénosols des plateaux Batéké, avec des valeurs faibles d'ECEC, ainsi qu'une pauvreté des stocks en éléments nutritifs. Les mesures de pH ont également confirmé l'acidité de ces sols qui est certainement responsable du taux de saturation important de l'aluminium sur le complexe d'échange, pouvant amener à un risque de toxicité aluminique pour l'agriculture.

L'influence de l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés du sol prises en compte dans le cadre de ce mémoire, a également été étudiée en examinant leur évolution dans la chronoséquence d'*Acacias*, ainsi qu'en savane pour avoir une connaissance des conditions qui régnaient avant plantation. Cette étude n'a pas permis de définir une influence significative de cette espèce sur les sols des deux sites d'étude sur lesquels se sont effectuées les prises d'échantillons, sauf en ce qui concerne l'acidité du sol et les teneurs en azote. En effet, il a été démontré que le pH du sol diminuait significativement avec le vieillissement des arbres et que les teneurs en azote augmentaient de manière significative dans les horizons de surface.

Le faible impact de l'*Acacia auriculiformis* pourrait avoir plusieurs origines et certaines d'entre elles ont été mises en avant : les feux de savane fréquents dans cette région, les différences de conditions initiales avant plantation, en particulier entre les deux sites d'étude, ainsi que l'importance de la végétation accompagnatrice et les pratiques agro-sylvicoles et culturales.

En ce qui concerne l'influence des feux de savane, une étude comparative entre deux zones d'un peuplement âgé de trois ans, l'une touchée par un feu de savane, et l'autre épargnée, a été effectuée en vue de déterminer l'impact du feu dans ce peuplement. Les résultats ont montré que le feu pouvait avoir un impact significatif sur les propriétés du sol, surtout dans l'horizon de surface, en augmentant le pH des sols et les teneurs en azote, ainsi qu'en diminuant de manière non significative les concentrations en éléments totaux. Le feu a été responsable également de l'augmentation du taux de saturation en bases sur le complexe d'échange et à la diminution du taux de saturation de l'aluminium sur ce dernier, réduisant ainsi probablement le risque de toxicité aluminique.

L'effet de site n'a pas pu être déterminé dans le cadre de ce mémoire par manque de prises d'échantillons en savane dans un des deux sites d'étude. Les résultats obtenus font toutefois

apparaître une forte variabilité intra-peuplement pour certaines propriétés, dont l'ampleur devrait pouvoir être comparée à la variabilité inter-sites.

La végétation ligneuse accompagnatrice dans les peuplements les plus âgés a été répertoriée et les diamètres à 1,3 mètre ont été mesurés. Il en résulte que cette végétation est très abondante, principalement dans les faibles classes de circonférences. Il en a été conclu que cette végétation, par sa densité, est susceptible d'influencer les résultats concernant l'impact de l'*Acacia auriculiformis* sur les propriétés du sol. Certains auteurs ont mis en évidence que l'*Acacia* lui-même était responsable de l'installation de ces espèces accompagnatrices, influençant indirectement les propriétés du sol. En ce qui concerne les pratiques agro-sylvicoles, le labour et l'incinération de la savane avant les plantations sont deux pratiques pouvant modifier les propriétés physico-chimiques des sols et donc entraîner un biais dans les résultats concernant l'étude de l'influence de l'*Acacia* sur les propriétés des sols. L'étude des évolutions entre peuplements ont d'ailleurs montré que le peuplement de 1 an présentait souvent les valeurs plus élevées, suggérant un impact de ces pratiques sur les propriétés des sols.

Le dernier objectif de ce travail concernait l'étude de l'évolution des stocks dans les compartiments de l'écosystème en fonction de l'âge des peuplements. L'évolution des stocks totaux est principalement due aux modifications des stocks dans l'*Acacia* et dans la litière. Les stocks dans les sols ne semblaient pas évoluer d'un peuplement à l'autre, bien que la variabilité des stocks puisse réfuter cette constatation. Les stocks dans la litière peuvent constituer un retour important des nutriments aux sols et permettraient donc de compenser les éventuelles pertes liées au prélèvement des racines des *Acacias*. La végétation herbacée ne présente pas des stocks élevés susceptibles d'influencer les stocks dans les sols. Enfin, les retombées atmosphériques via les précipitations ont été approximées pour la région étudiée et ont permis d'en déduire que ces inputs sont très faibles et comparables aux stocks présents dans la végétation herbacée, excepté pour le sodium. Les stocks dans les couches plus profondes du sol (> 50 cm) n'ont pas été déterminés mais il est probable que l'*Acacia* distribue son système racinaire sur une profondeur plus ou moins importante.

En dépit des résultats obtenus dans ce travail, certaines questions méritent d'être précisées. La présente section recense un certain nombre d'améliorations qui pourraient être envisagées.

Par manque de temps et de moyens, il n'a pas été possible d'échantillonner le sol d'autres peuplements touchés par le feu, ce qui aurait été nécessaire pour confirmer nos résultats. Au vu de l'importance des feux de savane dans cette région, il serait opportun d'étudier plus en profondeur, l'impact des feux de savane sur les deux sites d'étude investigués. Cela pourrait permettre une réinterprétation des résultats concernant l'influence de l'*Acacia* sur les propriétés du sol, ainsi qu'une meilleure compréhension des phénomènes qui régissent les conditions présentes en savane.

Le manque d'informations concernant l'historique des plantations de 7 et 14 ans n'a pas permis d'identifier un éventuel effet de site entre les deux zones d'étude et a eu également pour conséquence un échantillonnage dans un peuplement âgé de 7 ans issu d'une deuxième rotation. Cet échantillonnage a pu amener à un biais dans nos résultats puisque le sol a été en réalité influencé également pendant 14 ans, tout comme le sol sous le peuplement de 14 ans choisi dans notre étude.

Une étude approfondie de l'impact des pratiques agro-sylvicoles et culturales sur les propriétés des sols serait également intéressante dans cette région afin d'évaluer si leur influence à

long terme sur les propriétés des sols est bénéfique ou au contraire dommageable sur ces sols fragiles.

Afin de minimiser les biais liés à un éventuel effet de site, il aurait été également opportun d'effectuer des prises d'échantillons dans plusieurs chronoséquences d'*Acacias* reprenant les mêmes âges de peuplement que ceux sélectionnés dans notre étude. Cette validation avait été envisagée mais malheureusement n'a pas pu être effectuée sur place, pas manque de temps et de moyens. Elle pourrait être envisagée dans d'autres études.

Au vu de conclusions présentées par certains auteurs sur l'influence tardive de *l'Acacia auriculiformis* sur les propriétés du sol, il aurait été sensé d'élargir la chronoséquence étudiée à des tranches d'âges plus élevées, de l'ordre de 20 ans ou de considérer l'impact de rotations multiples.

Dans le cadre de prochaines études, il serait également judicieux de prendre en compte d'autres propriétés du sol (telles que la texture, la minéralogie, l'infiltration, etc.), car elles ont également toute leur importance dans la compréhension des phénomènes qui régissent la fertilité des sols. Latham et al.(1984-1985) ont d'ailleurs écrit dans leur étude : « *les critères constitutifs (nature des minéraux et des matières organiques), organisationnels et fonctionnels, sont autant de facteurs à étudier simultanément aux critères chimiques, pour mieux comprendre et mieux traiter les transformations prenant place dans ces sols au cours de leur mise en culture* ».

En conclusion, les aléas du terrain ont imposé parfois certaines limites pour le bon déroulement des échantillonnages. Cependant, toute recherche comporte des limites et les résultats issus de cette étude constituent une bonne base de réflexion sur les sujets abordés dans ce travail.

Bibliographie

Apani E.(1990). Thèse pour l'obtention du titre de docteur de l'université de Rennes (mention Science Biologiques). Contribution à l'étude phytoécologique de la savane à *Loudetia demeusei* et *Hymenocardia acida* des contreforts des plateaux Téké (RDC).

Bernhard-Reversat F., Diangana D., Tsatsa M. (1993). Biomasse, minéralomasse et productivité en plantation d'*Acacia mangium* et *Acacia auriculiformis* au Congo. Bois et Forêts des Tropiques, n° 238, 4e *trimestre.*

Bernhard-Reversat F. (1996). Nitrogen cycling in tree plantations grown on a poor sandy savanna soil in Congo. Applied Soil Ecology, vol. 4, pp.161-172.

Bernhard-Reversat F. & Schwartz D. (1997). Evolution de la teneur en lignine et décomposition de la litière dans les sols des forêts tropicales (Congo) : comparaison de plantations exotiques et de peuplements naturels. Earth & Planetary Sciences, vol. 325, pp. 427-432.

Bernhard-Reversat F., Harmand J-M. & Uguen K. (1998). Les litières et la dynamique de l'azote dans divers biotopes à acacia d'Afrique occidentale et centrale. In « L'acacia au Sénagal, ORSTOM ed., ISBN 2-7099-1423-9, Paris, 205-219.

Coetsee C., Bond W. J. & February E. C. (2010). Frequent fire affects soil nitrogen and carbon in an African savanna by changing woody cover. Oecologia, vol.162, pp.1027-1034.

Cook G.D (1994). The fate of nutrients during fires in a tropical savanna. Australian Journal of Ecology, vol.19,pp.359-365.

Cuevas E.& Lugo A. E (1998). Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantations species. Forest Ecology and Management, vol. 112, pp. 263-279.

Dabin B. (1980). Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol.18 n°3-4, pp. 197-215.

Doi R. & Ranamukhaarachchi S. L. (2007). Integrative evaluation of rehabilitative effects of *Acacia auriculiformis* on degraded soil. Journal of Tropical Forest Science, vol. 19, pp.150-163.

Elenga H., Schwartz D. & Vincens A. (1994). Pollen evidence of late Quaternary vegetation and enferred climate changes in Congo. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, vol. 109, pp. 345-356.

Feller C. Fritsch E., Poss R. & Valentin C. (1991). Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). Cahier ORSTOM, série Pédologie, vol. 26, n°1, pp. 25-36.

Feller C. & Beare M.H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. Geoderma, vol.79, pp.69-116.

Guillot B.& Peyrot B. (1979). Etude du fonctionnement des vallées sèches du plateau Mbé (Congo) : problèmes hydrologiques et morphologiques, Cahiers. O.R.S.T.O.M., sér. Sci. Hum., vol. XVI, no 3, pp.206-231.

Isaac M. E., Harmand J-M., Lesueur D. & Lelon J. (2010). Tree age and soil phosphorous conditions influence N_2-fixation rates and soil N dynamics in natural populations of *Acacia Senegal*. Forest Ecology and Management, vol. 261, pp. 582-588.

Jensen M., Michelsen A. & Gashaw M. (2001). Response in plant, soil inorganic and microbial nutrient pools to experimental fire, ash and biomass addition in a woodland savanna. Oecologia, vol.128, pp.85-93.

Kang B.T., Salako F.K., Akobundu I. O., Pleysier J. L. & Chianu J. N. (1997). Amelioration of a degraded Oxic Paleustalf by leguminous and natural fallows. Soil Use and Mangement, vol.13, pp.130-136.

Kansongo R.K. , Van Ranst E., Verdoodt A., Kanyankagote P. & Baert G. (2009).Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Batéké plateau, D.R. Congo. Soil Use and Management, vol. 25, p21-27.

Kasongo R.K., Van Ranst E., Verdoodt A., Kanyankagote P. & Baert G. (2010).Roche phosphatée de Kanzi comme engrais à propriété amendante pour des sols sableux de l'Hinterland de Kinshasa. Etude et Gestion des sols, vol.17, 1, pp.47-58.

Kasongo R.K., Verdoodt A., Kanyankagote P., Baert G. & Van Ranst E.(2011). Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. Soil Use and Mangement, vol.27, pp 94-102.

Kato M. S. A., Kato O. R., Denich M. & Vlek P. L. G. (1999). Fire-free alternatives to slash-and-burn for shifting cultivation in the eastern Amazon region : the role of fertilizers. Field Crops Research, vol.62, pp.225-237.

Laclau J-P., Sama-Poumba W., Nzila J. de D., Bouillet J-P. & Ranger J. (2002). Biomass and nutrient dynamics in a littoral savanna subjected to annual fires in Congo. Acta Oecologica, vol.23, pp.41-50.

Laclau J-P., Ranger J., Nzila J. de D., Bouillet J-P. & Deleporte P.(2003). Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo,1. Chemical composition of rainfall, throughfall and stemflow solutions. Forest Ecology and Management, vol.176, pp.105-119.

Laclau J-P., Ranger J., Nzila J. de D., Bouillet J-P. & Deleporte P.(2003). Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo, 2.Chemical composition of soil solutions. Forest Ecology and Management, vol.180, pp 527-544.

Laclau J-P., Levillain J., Deleporte P., Nzila J. de D., Bouillet J-P., Saint André L., Versini A., Mareshal L., Nouvellon Y., Thongo M'Bou A. & Ranger J. (2010). Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in Eucalyptus plantations established on a sandy tropical soil. Forest Ecology and Management, vol.260, pp 2148-2159.

Latham M., Kilian J. & Pieri C. (1984-1985). Fertilité des sols acides tropicaux : une démarche pour les projets IBSRAM. Cahiers ORTSOM, série Pédologie, vol. 21, n°1, pp.34-41.

Lehmann J., Poidy N., Schroth G. & Zech W. (1998). Short-term effects of soil amendment with tree legume biomass on carbon and nitrogen in particle size separates in central Togo. Soil Biol. Biochem., vol. 30, pp. 1545-1552.

Le Marechall A., (1966). Contribution à l'étude des Plateaux Batéké (géologie, géomorphologie, hydrogéologie). Doc. ORSTOM, Brazzaville, 42 p.

Loumeto J.J. & Huttel C. (1997). Understory vegetation in fast-growing tree plantations on savanna soils in Congo. Forest Ecology and Management, vol.99, pp 65-81.

Lugo A.E.(1997). The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures. Forest Ecology and Management, vol. 99, pp. 9-19.

Macedo M.O., Resende A. S., Garcia P. C., Boddey R. M., Jantalia C. P., Urquiaga S., Campello E. F. C. & Franco A. A. (2008). Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. Forest Ecology and Management, vol.255, pp.1516-1524.

Munitz da Silva D. & Batalha M. A. (2008). Soil-vegetation relationships in cerrados under different fire frequencies. Plan Soil, vol. 311, pp.87-96.

Nyamadzawo G., Chikowo R., Nyamugafata P. & Giller K. E. (2007). Improved legume tree fallows and tillage effects on structural stability and inflitration rates of kaolinitic sandy soil from central Zimbabwe. Soil & Tillage Research, vol. 96, pp182-194.

Partey S.T., Quashie-Sam S. J., Thevathasan N. V. & Gordon A. M. (2011). Decomposition and nutrient release patterns of the leaf biomass of the wild sunflower (*Tithonia diversifolia*) : a comparative study with four leguminous agroforestry species. Agroforest Syst, vol.81, pp.123-134.

Pivello V.R. Oliveras I., Miranda H. S., Haridasan M., Sato M. N. & Meirelles S. T (2010). Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. Plant Soil, vol.337, pp.111-123.

Salako F.K., Hauser S., Babalola O. & Tian G. (2001). Improvement of the physical fertility of a degraded Alfisol with planted and natural fallows under humid tropical conditions. Soil Use and Mangement, vol.17, pp.41-47.

Savadogo P. Sawadogo L. & Tiveau D. (2007). Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. Agriculture, Ecosystems and Environment, vol.118,pp.80-92.

Schwartz D. (1988). Some Podzols on Bateke Sands and their Origins, People's Republic of Congo. Geoderma, vol.43, pp. 229-247.

Schwartz D. & Namri M. (2002). Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. Global and Planetary Change, vol.33, pp 77-93.

Sheuyange A., Oba G. & Weladji R. B. (2005). Effects of anthropogenic fire history on savanna vegetation in northeastern Namibia. Journal of Environmental Management, vol. 75, pp. 189-198.

Wang F. et al.(2010). Effects of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species on soil properties and nitrogen transformation during forest restoration in southern China. Soil Science and Plant Nutrition , vol.56, pp. 297-306.

Yamashita N. et al. (2008). Soil changes induced by Acacia mangium plantation establishment: comparaison with secondary forest and Imperata cylindrical grassland soils in South Sumatra, Indonesia. Forest Ecology and Mangement, vol.254,pp.362-370.

Sites internet

Glossaire des termes utilisés par la CCNUCC, en français, disponible sur : http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/ghg_inventories/french/8_glossary/Glossary.htm#P [consulté le 23 juillet 2011]

Site officiel de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), disponible sur : http://www.fao.org/countries/55528/fr/cod/,[consulté le 17 juillet 2011]

Article sur l'Agriculture sans labours (ASL), écrit et disponible sur le site officiel de la FAO : www.fao.org/ag/ca/doc/Y3782f.pdf [consulté le 3 août 2011].

Site officiel de l'unité géomatique de l'Université catholique de Louvain, concernant la République Démocratique du Congo, disponible sur : http://sites.uclouvain.be/enge/maps/UCL_RDC/, [consulté le 16 mai 2011]

Cartographique de la République Démocratique du Congo par les Nations Unies, disponible sur : http://www.un.org/Depts/Cartographic/map/profile/drcongo.pdf,**[** consulté le 17 mai 2011)**]**

Harmonised World Soil Database, disponible sur: http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/index.html, [consulté le 21 mai 2011]

CD-ROM du livre « Lectures Notes on the Major soils of the World (World Soil Ressources Reports,94, FAO, 2011) », disponible sur : http://www.isric.org/Isric/Webdocs/Docs/Major_Soils_of_the_World/start.pdf [consulté le 21 mai 2011]

Site officiel du projet Ibi-village, disponible sur : http://www.ibi-village.cd, [consulté le 23 mai 2011]

Site officiel du site de Mampu, disponible sur : http://www.mampu.org, [consulté le 23 mai 2011]

Site officiel de la fondation Hanns Seidel , disponible sur :http://www.hss.de/, [consulté le 23 mai 2011]

Fiche descriptive de l'Acacia auriculiformis des auteurs G. M. Gnahoua & D. Louppe (2003), disponible sur le site du CIRAD (la recherche agronomique pour le développement) : http://hal.cirad.fr/cirad-00429281/fr/, [consulté le 26 mai 2011]

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri,R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)].

GIEC, Genève, Suisse, …, 103 pages.disponible sur : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf [consulté le 3 août 20111].

Publications de référence :

NOVACEL, 2009. Clean Development Mechanism Project Design Document Form for Afforestation and Reforestation Project Activities (CDM-AR-PDD) Version 04.

Dufey J. et Delvaux B. (2009). Syllabus du cours de sciences du sol, volume 1 et 2. Université catholique de Louvain, faculté ingénierie biologique, agronomique et environnementale. Duc Diffusion universitaire CIACO

Van Wambeke A. (1995). Sols des Tropiques: Propriétés et Appréciation. CTA et Huy Trop asbl, 335 pages.

Annexes

Annexe 1 : Inventaires des placettes circulaires
Annexe 2 : Composition des échantillons
Annexe 3 : Mesure du pH des sols
Annexe 4 : Dosage des cations échangeables
Annexe 5 : Dosage du carbone et de l'azote
Annexe 6 : Dosage des éléments totaux (sols et végétaux)
Annexe 7 : Stocks dans les sols et dans la litière
Annexe 8 : Résultats des comparaisons des stocks en éléments totaux dans tous les compartiments
Annexe 9 : Inventaire dendrométrique dans le peuplement de 14 ans d'Acacia auriculiformis
Annexe 10 : Résultats des stocks dans les Acacias (troncs et branches) de Sarah Gengler

Annexe 1 : inventaire des placettes circulaires

placette	arbre	espèce	circonférence équivalente (cm) à 1,3 m	nombre de tiges
1	1	Gaertnera paniculata	12,800	1
1	2	inconnue 1	12,900	1
1	3	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	4	Gaertnera paniculata	7,800	1
1	5	Gaertnera paniculata	10,600	1
1	6	Gaertnera paniculata	17,127	2
1	7	Gaertnera paniculata	9,420	2
1	8	Gaertnera paniculata	6,200	1
1	9	Gaertnera paniculata	3,600	1
1	10	Gaertnera paniculata	4,900	1
1	11	Gaertnera paniculata	10,800	1
1	12	Gaertnera paniculata	5,500	1
1	13	Gaertnera paniculata	3,500	1
1	14	Gaertnera paniculata	10,984	2
1	15	Gaertnera paniculata	9,700	1
1	16	Gaertnera paniculata	4,500	2
1	17	Gaertnera paniculata	4,800	1
1	18	Macaranga spinosa	7,500	1
1	19	Gaertnera paniculata	6,600	1
1	20	inconnue 1	10,400	1
1	21	Vernonia brazzavillensis	4,300	1
1	22	Gaertnera paniculata	15,670	3
1	23	Macaranga spinosa	42,000	1
1	24	Gaertnera paniculata	6,653	2
1	25	Gaertnera paniculata	12,627	3
1	26	Vernonia brazzavillensis	26,317	12
1	27	Gaertnera paniculata	4,000	1
1	28	Gaertnera paniculata	8,000	1
1	29	Gaertnera paniculata	12,400	1
1	30	Gaertnera paniculata	11,900	1
1	31	Gaertnera paniculata	8,732	2
1	32	Gaertnera paniculata	4,000	1
1	33	Gaertnera paniculata	5,600	1
1	34	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	35	Gaertnera paniculata	16,700	1
1	36	inconnue 1	11,696	4
1	37	Annona senegalensis	13,100	1
1	38	Vernonia brazzavillensis	12,360	4
1	39	Gaertnera paniculata	4,500	1
1	40	Gaertnera paniculata	4,700	1
1	41	Gaertnera paniculata	5,000	1
1	42	Albizia adianthifolia	12,500	1
1	43	Gaertnera paniculata	7,433	2
1	44	Gaertnera paniculata	6,400	1
1	45	Gaertnera paniculata	6,100	1
1	46	Gaertnera paniculata	7,500	1
1	47	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	48	Gaertnera paniculata	4,200	1
1	49	Gaertnera paniculata	9,500	1
1	50	Gaertnera paniculata	5,300	1
1	51	Gaertnera paniculata	8,500	1
1	52	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	53	Gaertnera paniculata	7,106	2
1	54	Gaertnera paniculata	4,900	1
1	55	Gaertnera paniculata	19,152	4
1	56	Vernonia brazzavillensis	11,930	3
1	57	Gaertnera paniculata	9,000	1
1	58	Gaertnera paniculata	6,700	1
1	59	Vernonia brazzavillensis	11,342	4
1	60	Gaertnera paniculata	7,800	1
1	61	Gaertnera paniculata	6,500	1
1	62	Gaertnera paniculata	9,000	1
1	63	Gaertnera paniculata	9,200	1
1	64	Gaertnera paniculata	6,600	1
1	65	Gaertnera paniculata	4,500	1
1	66	Vernonia brazzavillensis	10,352	4
1	67	Gaertnera paniculata	5,400	1
1	68	Gaertnera paniculata	4,900	1
1	69	Gaertnera paniculata	3,900	1
1	70	Gaertnera paniculata	3,600	1
1	71	Gaertnera paniculata	3,100	1
1	72	Gaertnera paniculata	2,900	1
1	73	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	74	Gaertnera paniculata	5,900	1
1	75	Gaertnera paniculata	3,900	1
1	76	Gaertnera paniculata	3,800	1
1	77	Vernonia brazzavillensis	10,701	4
1	78	Gaertnera paniculata	14,900	1
1	79	Vernonia brazzavillensis	5,700	1
1	80	inconnue 3	18,489	3
1	81	Vernonia brazzavillensis	7,500	1
1	82	Gaertnera paniculata	3,000	1
1	83	Gaertnera paniculata	2,900	1
1	84	Macaranga spinosa	5,300	1
1	85	Gaertnera paniculata	5,880	2
1	86	Gaertnera paniculata	3,500	1
1	87	Gaertnera paniculata	2,500	1
1	88	Gaertnera paniculata	3,600	1
1	89	Gaertnera paniculata	2,700	1
1	90	Gaertnera paniculata	5,200	1
1	91	Gaertnera paniculata	5,300	1
1	92	Gaertnera paniculata	3,000	1
1	93	Gaertnera paniculata	5,000	1
1	94	Gaertnera paniculata	2,100	1
1	95	Gaertnera paniculata	3,200	1
1	96	Gaertnera paniculata	3,000	1
1	97	Gaertnera paniculata	2,800	1
1	98	Gaertnera paniculata	4,200	1
1	99	Gaertnera paniculata	3,900	1
1	100	Vernonia brazzavillensis	6,159	2
1	101	Gaertnera paniculata	13,500	1
1	102	Gaertnera paniculata	12,800	1
1	103	Anthocleista schweinfurthii	9,800	1
1	104	Gaertnera paniculata	11,600	1
1	105	Gaertnera paniculata	8,900	1
1	106	Gaertnera paniculata	9,500	1
1	107	Gaertnera paniculata	14,800	1
1	108	Gaertnera paniculata	10,400	1
1	109	Vernonia brazzavillensis	4,200	1
1	110	Vernonia brazzavillensis	4,400	1
1	111	Vernonia brazzavillensis	4,600	1
1	112	Vernonia brazzavillensis	3,800	1
1	113	Vernonia brazzavillensis	4,400	1
1	114	Vernonia brazzavillensis	4,700	1
1	115	Vernonia brazzavillensis	12,594	2
1	116	Vitex Madiensis	40,000	1
1	117	Gaertnera paniculata	14,900	1
1	118	Bridelia sp	18,535	2
1	119	Caloncoba Welwitschii	9,300	1
1	120	Gaertnera paniculata	7,000	1
1	121	Gaertnera paniculata	8,500	1
1	122	Gaertnera paniculata	7,100	1
1	123	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	124	Gaertnera paniculata	3,400	1
1	125	Gaertnera paniculata	4,600	1
1	126	Gaertnera paniculata	12,400	1
1	127	Vernonia brazzavillensis	3,400	1
1	128	Vernonia brazzavillensis	3,100	1
1	129	Gaertnera paniculata	4,900	1
1	130	Gaertnera paniculata	2,800	1
1	131	Vernonia brazzavillensis	8,500	1
1	132	Vernonia brazzavillensis	9,100	1
1	133	Inconnue 2	5,900	1
1	134	Vernonia brazzavillensis	13,173	2
1	135	Vernonia brazzavillensis	15,900	1
1	136	Caloncoba Welwitschii	3,300	1
1	137	Vernonia brazzavillensis	3,400	1
1	138	Gaertnera paniculata	7,642	2
1	139	Gaertnera paniculata	10,500	1

placette	arbre	espèce	circonférence équivalente (cm) à 1,3 m	nombre de tiges
1	140	Vernonia brazzavillensis	9,100	1
1	141	Vernonia brazzavillensis	8,900	1
1	142	Gaertnera paniculata	17,000	1
1	143	Gaertnera paniculata	3,700	1
1	144	Inconnue 2	10,300	1
1	145	Gaertnera paniculata	2,400	1
1	146	Gaertnera paniculata	2,800	1
1	147	Gaertnera paniculata	4,100	1
1	148	Gaertnera paniculata	3,300	1
1	149	Macaranga spinosa	10,200	1
1	150	Macaranga spinosa	11,500	1
1	151	Gaertnera paniculata	2,000	1
1	152	Gaertnera paniculata	2,600	1
1	153	Gaertnera paniculata	2,800	1
1	154	Gaertnera paniculata	2,000	1
1	155	Gaertnera paniculata	2,400	1
1	156	Gaertnera paniculata	3,500	1
1	157	Macaranga spinosa	5,400	1
1	158	Vernonia brazzavillensis	32,500	1
1	159	Gaertnera paniculata	15,200	1
1	160	Gaertnera paniculata	25,200	1
1	161	Macaranga spinosa	2,900	1
1	162	Gaertnera paniculata	3,400	1
1	163	Vernonia brazzavillensis	25,166	5
1	164	Gaertnera paniculata	22,100	1
1	165	Vernonia brazzavillensis	11,500	1
1	166	Macaranga spinosa	13,200	1
1	167	Inconnue 2	12,000	1
1	168	Gaertnera paniculata	18,900	1
1	169	Vernonia brazzavillensis	6,600	1
1	170	Gaertnera paniculata	5,000	1
1	171	Gaertnera paniculata	3,600	1

placette	arbre	espèce	circonférence équivalente (cm) à 1,3 m	nombre de tiges
2	1	Acacia auriculiformis	9,20	1
2	2	Albizia adianthifolia	4,70	1
2	3	Anthocleista schweinfurthii	23,60	1
2	4	Acacia auriculiformis	21,30	1
2	5	Gaertnera paniculata	6,10	1
2	6	Vernonia brazzavillensis	13,80	1
2	7	Vernonia brazzavillensis	5,90	1
2	8	Gaertnera paniculata	14,80	1
2	9	Vernonia brazzavillensis	16,20	1
2	10	Vernonia brazzavillensis	24,30	1
2	11	Vernonia brazzavillensis	4,90	1
2	12	Gaertnera paniculata	14,20	1
2	13	Vernonia brazzavillensis	4,40	1
2	14	Vernonia brazzavillensis	6,10	1
2	15	Vernonia brazzavillensis	5,31	2
2	16	Vernonia brazzavillensis	11,30	1
2	17	Gaertnera paniculata	8,10	1
2	18	Acacia auriculiformis	14,20	1
2	19	Macaranga spinosa	19,20	1
2	20	Gaertnera paniculata	15,30	1
2	21	Vernonia brazzavillensis	3,80	1
2	22	Vernonia brazzavillensis	4,50	1
2	23	Vernonia brazzavillensis	5,60	1
2	24	Vernonia brazzavillensis	4,50	1
2	25	Vernonia brazzavillensis	13,64	2
2	26	Vernonia brazzavillensis	4,90	1
2	27	Vernonia brazzavillensis	5,32	2
2	28	Vernonia brazzavillensis	6,76	3
2	29	Vernonia brazzavillensis	6,50	1
2	30	Vernonia brazzavillensis	6,10	1
2	31	Anthocleista schweinfurthii	12,60	1
2	32	Vernonia brazzavillensis	4,60	1
2	33	Macaranga spinosa	11,50	1
2	34	Vernonia brazzavillensis	4,80	1
2	35	Gaertnera paniculata	7,10	1
2	36	Vernonia brazzavillensis	3,60	1
2	37	Vernonia brazzavillensis	4,50	1
2	38	Vernonia brazzavillensis	7,23	3
2	39	Vernonia brazzavillensis	7,10	1
2	40	Vernonia brazzavillensis	5,00	1
2	41	Vernonia brazzavillensis	6,50	1
2	42	Vernonia brazzavillensis	44,00	1
2	43	Alchornea cordifolia	19,00	1
2	44	Macaranga spinosa	11,10	1
2	45	Gaertnera paniculata	29,70	1
2	46	Gaertnera paniculata	17,50	1
2	47	Gaertnera paniculata	6,00	1
2	48	Gaertnera paniculata	3,00	1
2	49	Alchornea cordifolia	15,40	1
2	50	Gaertnera paniculata	4,60	1
2	51	Vernonia brazzavillensis	35,00	1
2	52	Gaertnera paniculata	5,80	1
2	53	Gaertnera paniculata	4,50	1
2	54	Gaertnera paniculata	4,00	1
2	55	Gaertnera paniculata	4,50	1
2	56	Gaertnera paniculata	4,00	1
2	57	Gaertnera paniculata	5,60	1
2	58	Gaertnera paniculata	3,80	1
2	59	Gaertnera paniculata	3,70	1
2	60	Gaertnera paniculata	5,94	2
2	61	Macaranga spinosa	14,00	1
2	62	Gaertnera paniculata	4,90	1
2	63	Gaertnera paniculata	11,30	1
2	64	Gaertnera paniculata	9,00	1
2	65	Alchornea cordifolia	9,20	1
2	66	Gaertnera paniculata	6,80	1
2	67	Gaertnera paniculata	19,40	1
2	68	Vernonia brazzavillensis	16,30	1
2	69	Gaertnera paniculata	7,50	1
2	70	Gaertnera paniculata	17,60	1
2	71	Gaertnera paniculata	11,00	1
2	72	Gaertnera paniculata	8,90	1
2	73	Gaertnera paniculata	3,90	1
2	74	Gaertnera paniculata	10,51	3
2	75	Gaertnera paniculata	6,22	2
2	76	Vernonia brazzavillensis	11,60	1
2	77	Vernonia brazzavillensis	17,90	1
2	78	Vernonia brazzavillensis	8,10	2
2	79	Gaertnera paniculata	10,98	2
2	80	Vernonia brazzavillensis	7,57	3

placette	arbre	espèce	circonférence équivalente (cm) à 1,3 m	nombre de tiges
2	81	Vernonia brazzavillensis	7,65	2
2	82	Inconnue 2	11,20	1
2	83	Macaranga spinosa	9,40	1
2	84	Gaertnera paniculata	14,90	1
2	85	Vernonia brazzavillensis	3,10	1
2	86	Gaertnera paniculata	4,20	1
2	87	Vernonia brazzavillensis	8,62	2
2	88	Vernonia brazzavillensis	6,66	2
2	89	Gaertnera paniculata	13,80	1
2	90	Gaertnera paniculata	14,70	1
2	91	Gaertnera paniculata	13,30	1
2	92	Gaertnera paniculata	14,90	1
2	93	Gaertnera paniculata	2,90	1
2	94	Gaertnera paniculata	3,50	1
2	95	Gaertnera paniculata	10,40	1
2	96	Gaertnera paniculata	5,50	1
2	97	Gaertnera paniculata	21,70	1
2	98	Gaertnera paniculata	2,20	1
2	99	Vernonia brazzavillensis	7,30	1
2	100	Gaertnera paniculata	13,00	1
2	101	Vernonia brazzavillensis	5,60	1
2	102	Macaranga spinosa	10,40	1
2	103	Vernonia brazzavillensis	6,20	1
2	104	Vernonia brazzavillensis	3,50	1
2	105	Vernonia brazzavillensis	8,50	1
2	106	Vernonia brazzavillensis	13,20	1
2	107	Vernonia brazzavillensis	5,90	1
2	108	Vernonia brazzavillensis	7,44	4
2	109	Anthocleista schweinfurthii	2,80	1
2	110	Caloncoba Welwitschii	15,12	3
2	111	Vernonia brazzavillensis	10,01	3
2	112	Gaertnera paniculata	12,40	1
2	113	Vernonia brazzavillensis	13,80	1
2	114	Macaranga spinosa	8,00	1
2	115	Macaranga spinosa	6,90	1
2	116	Gaertnera paniculata	6,80	1
2	117	Gaertnera paniculata	2,60	1
2	118	Anthocleista schweinfurthii	6,40	1
2	119	Gaertnera paniculata	18,10	1
2	120	Gaertnera paniculata	3,30	1
2	121	Gaertnera paniculata	17,60	1
2	122	Gaertnera paniculata	34,06	3
2	123	Gaertnera paniculata	12,90	1
2	124	Gaertnera paniculata	14,50	1
2	125	Gaertnera paniculata	4,55	2
2	126	Ficus exesperata	4,90	1
2	127	Gaertnera paniculata	2,90	1
2	128	Vernonia brazzavillensis	4,70	1
2	129	Gaertnera paniculata	6,70	1
2	130	Gaertnera paniculata	8,20	1
2	131	Gaertnera paniculata	5,20	1
2	132	Gaertnera paniculata	8,52	2
2	133	Gaertnera paniculata	8,90	1
2	134	Gaertnera paniculata	5,10	1
2	135	Gaertnera paniculata	8,00	1
2	136	Gaertnera paniculata	8,00	1
2	137	Gaertnera paniculata	4,10	1
2	138	Gaertnera paniculata	9,20	1
2	139	Gaertnera paniculata	6,70	1
2	140	Gaertnera paniculata	5,40	1
2	141	Gaertnera paniculata	3,90	1
2	142	Gaertnera paniculata	10,96	2
2	143	Gaertnera paniculata	38,71	10
2	144	Gaertnera paniculata	7,90	1
2	145	Gaertnera paniculata	10,60	1
2	146	Gaertnera paniculata	9,50	1
2	147	Gaertnera paniculata	9,70	1
2	148	Gaertnera paniculata	11,00	1
2	149	Gaertnera paniculata	12,60	1
2	150	Gaertnera paniculata	12,50	1
2	151	Gaertnera paniculata	3,50	1
2	152	Gaertnera paniculata	12,60	1
2	153	Gaertnera paniculata	15,08	2
2	154	Inconnue 2	6,40	1
2	155	Gaertnera paniculata	15,40	1
2	156	Vernonia brazzavillensis	8,48	2
2	157	Vernonia brazzavillensis	9,70	1

Annexe 2 : composition des échantillons

1. Composition des échantillons revenus du Congo (litière et végétation)

1. Savane : On a pris pour chaque échantillon, un sous-échantillon dont le poids est égal à 40g
2. 1 an : *remarque : ces numéros ont été tirés au sort. Le poids prélevé pour chaque placette est de 10g*
    - échantillon 1 : mélange des placettes 18, 4, 13 et 1
    - échantillon 2 : mélange des placettes 12, 19, 6 et 10
    - échantillon 3 : mélange des placettes 20, 8, 3 et 11
    - échantillon 4 : mélange des placettes 14, 17, 9 et 5
    - échantillon 5 : mélange des placettes 2, 15, 7 et 16
3. 3 ans : les 10 échantillons ont été ramenés tels quels
4. 7 ans :
    - Échantillon 1 : 14g de chaque sous-placette (donc 14g de 1A, 1B et 1C)
    - Echantillon 2 : 14g de chaque sous-placette
    - Echantillon 3 : 14g de chaque sous-placette
5. 14 ans : exactement même principe que pour les 7 ans.

6. Composition des échantillons pour les analyses de CEC et éléments totaux (sols+litière+VG)

1. Savane : échantillons composites identiques pour le sol, la litière et la végétation : prise de 2g/placette→ 1 échantillon composite pèse 6g
    - Échantillon 1 : placettes 1,6,10
    - Échantillon 2 : placettes 5,7,12
    - Échantillon 3 :placettes 8,11,14
    - Échantillon 4 : placette 2,4,15
    - Echantillon 5 : placettes 3,9,13

2. 1 an : les échantillons composites de litière et de végétation utilisés sont ceux provenant directement du Congo. Pour le sol : utilisation des mêmes mélanges de placettes que pour la végétation et la litière :
    - Échantillon 1 : placettes 1,4,13,18
    - Échantillon 2 : placettes 6,10,12,19
    - Échantillon 3 : placettes 3,8,11,20
    - Échantillon 4 : placettes 5,9,14,17
    - Échantillon 5 : placettes 2,7,15,16

    Pour chaque placette, 2g ont été prélevés → un échantillon composite pèse 8g

3. 3 ans non-brûlé : échantillons gardés tel quels

4. 3 ans brûlé : comme nous avions 23 placettes, 3 placettes sont retirées et ne seront pas analysées. Ces placettes ont été tirées au sort. Elles sont les placette n° 3,6,15
   Les autres placettes ont été utilisées pour former les échantillons composites avec prise des mêmes quantités : 2g/placette.
   - Échantillon 1 : 11,13,18,22
   - Échantillon 2 : 7,12,14,20
   - Échantillon 3 : 1,9,10,21
   - Échantillon 4 : 2,8,16,19
   - Échantillon 5 : 4,5,17,23

5. 7 ans et 14 ans : tous les échantillons sont analysés (rappel : pas de végétation pour ces classes d'âge)

Annexe 3: Mesure du pH des sols

1. Source de la méthode

Cette méthode est adaptée de 'Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, 4th edition. Edited in May 1998 by the Programme Coordinating Centre Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Leuschnerstr. 91, D–21031 Hamburg, Germany'. United Nations Economic Commission for Europe, Convention on long-range transboundary air pollution. International co-operative programme on assessment and monitoring of air pollution effects on forests.

2. Principe

Source : Rodier, J., 1996. L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. 8ème édition, Dunod, Paris, France, 1384 p.

La différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence (calomel-KCl 3M) plongeant dans une même solution, est une fonction linéaire du pH de celle-ci.

Selon les lois de Nernst, le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions H^+ présents par la relation :

$$E = E_0 + 2{,}3\frac{RT}{nF}\ln a_{H^+}$$, où :

E : potentiel mesuré ;
E_0 : constante dépendant du choix de l'électrode de référence et des solutions internes ;
R : constante des gaz (J °C^{-1}) ;
T : température absolue (°C) ;
n : charge de l'ion ;
F : Constante de Faraday (96500 C) ;
a_{H^+} : activité de l'ion H^+ dans l'échantillon.

La plupart des appareils sont étalonnés directement en unités de pH ; ils comportent aussi un régulateur ou compensateur de température pour les mesures effectuées à une température différente de 20°C.

3. Procédure

3.1. Equipement

- Appareil de mesure de pH, pH-mètre INOLAB, pH level 1, WTW

- Electrode combinée de pH avec sonde de température intégrée, SenTix 81
- Solutions tampons *Reagecon* (pH 7,00 $\pm$ 0,01 et pH 4,00 $\pm$ 0,01 à 25 °C) et solution de maintenance KCl 3 M. Ces solutions sont stockées au frigo à 4°C ; leur date de péremption est vérifiée avant toute utilisation.
- Pisette d'eau milliQ.
- Papier absorbant.
- Bécher de 250 ou 500 ml, pour le rinçage.
- Agitateur mécanique.

3.2. Réactifs

(1) pH $CaCl_2$. Solution de $CaCl_2$ 0,01 M. Dissoudre 1,4702 g de $CaCl_2.2H_2O$ dans un jaugé de 1000 ml et compléter au trait de jauge avec de l'eau milliQ.

(2) pH KCl. Solution de KCl 1 M. Dissoudre 74,56 g de KCl dans un jaugé de 1000 ml et compléter au trait de jauge avec de l'eau milliQ.

3.3. Echantillons de sol et suspensions

(1) Après séchage à l'air, les échantillons sont tamisés à 2 mm selon la procédure décrite dans la fiche protocole 'Prétraitement des échantillons solides'
(2) (2) Peser (à 0,01 g près) 5 g de sol sec à l'air pour les horizons minéraux et hémi-organiques ou 2,5 g de sol sec à l'air pour les horizons holorganiques, dans un tube de centrifugation de 50 ou 100 ml, respectivement.

(3) Ajouter 25 ml (horizons minéraux et hémi-organiques) ou 50 ml (horizons holorganiques) de la solution ($CaCl_2$ 0,01 M, KCl 1M, ou eau milliQ) à l'aide d'une pipette jaugée.

(4) Agiter les tubes durant 2 heures sur un agitateur mécanique placé dans une salle obscure thermostatisée à 20°C.

3.4. Etalonnage du pH-mètre et mesure du pH

- Tempérer la solution de maintenance et les solutions tampons.
- Brancher l'appareil de mesure.
- Faire glisser la barre d'obturation de l'électrode vers le bas et laisser ouvert durant toutes les mesures. Vérifier le niveau de solution KCl 3 M et compléter si nécessaire.
- Calibrer le pH-mètre quotidiennement, avant toute mesure de pH (voir pp. 19–22 du manuel). Si la calibration est correcte, démarrer les mesures ; dans le cas contraire, se référer à la p. 31 du manuel.
- Sélectionner le mode de mesure en appuyant sur la touche 'M' jusqu'à ce que 'pH' apparaisse ; activer alors la fonction 'AutoRead' en appuyant sur la touche 'AR' : les valeurs de pH ne sont affichées qu'une fois atteint le critère de stabilité présélectionné (automatisation de l'appareil)
- Rincer l'électrode avec l'eau milliQ.
- Juste avant la mesure, agiter le tube manuellement. Ouvrir alors le tube, et plonger l'électrode *dans le surnageant* en veillant à ce qu'elle soit complètement immergée dans le

liquide. Lancer ‘AutoRead’ avec la touche RUN ENTER ; l’indication ‘AR’ clignote jusqu’à ce que le signal soit stable, la valeur de pH s’affiche alors à l’écran. Noter la valeur de pH.
- Entre chaque échantillon, rincer l’électrode à l’aide d’une pissette d’eau milliQ au dessus d’un bécher, et sécher l’électrode avec du papier absorbant en la tamponnant délicatement.
- Une fois les mesures terminées, rincer et sécher l’électrode, la remplir si nécessaire, replacer l’électrode dans son étui rempli de solution KCl 3 M, refermer l’ouverture en glissant la barre d’obturation vers le haut Eteindre l’appareil.

4. Commentaires

Le rapport sol : solution (m : v) s’élève à 1 : 5 pour les horizons minéraux et hémi-organiques, et à 1 : 20 pour les horizons holorganiques. Si des rapports sol : solution différents de ceux-ci sont utilisés, le préciser.

5. Dernière mise à jour (date, nom)

30/04/2001, Q. Ponette

Annexe 4: Dosage des cations échangeables

1. Source de la méthode

- ISO-11260:1994. Soil Quality – Determination of effective cation exchange capacity and base saturaion level using barium chloride solution. International Organisation for Standardisation. Geneva, Switzerland. 10p. (disponible sur www.iso.ch)
- ISO-14254:1994. Soil Quality – Determination of exhangeableacidity in barium chloride extracts. International Organisation for Standardisation. Geneva, Switzerland. 5p. (disponible sur www.iso.ch)

2. Principe

Le sol est dans un premier temps saturé via une solution de chlorure de barium 0,1M. La concentration en cations échangeables (Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al) est déterminée dans la solution de chlorure de barium 0,1 M extraite de l'échantillon par ICP-AES.
Pour déterminer l'acidité d'échange, la solution 0,1 M extraite est titrée avec une solution de NaOH 0,05M jusqu'à pH 7,8. La détermination des H^+ libres est réalisée en additionnant une solution de fuorure de sodium avant la titration (les ions aluminiums sont ainsi complexés et seul les H^+ libres sont détectés).

3. Procédure

3.1. Equipement

- Centrifugeuse + tubes à centrifugation
- Agitateur mécanique
- Agitateur magnétique
- PH-mètre
- Burette graduée
- Jaugé de 100 ml
- Bécher
- ICP-AES

3.2. Solutions-échantillons

Après séchage à l'air, les échantillons de sol sont tamisés à 2 mm selon la procédure décrite dans la fiche « prétraitement des échantillons solides ».

3.3. Réactifs

- Chlorure de Barium ($BaCl_2$) 0,1 M : peser 24,427g de $BaCl_2.2H_2O$, mettre dans un jaugé de 1 L et porter au trait avec de l'eau milliQ après dissolution complète.
- Hydroxyde de sodium (NaOH) 0,05 M .
- Fluorure de sodium (NaF) 1 M.
- Acide chlorhydrique (HCl) 0,05 M.
- Solution de phénolphtaléine : solution prête à l'emploi de phénolphtaléine 1% dans l'alcool iso-propylique.

3.4. Mode opératoire

3.4.1. Extraction au $BaCl_2$

- Peser exactement environ 2,5g de sol sec à l'air. Doser l'humidité en parallèle selon la procédure décrite dans « Détermination de la teneur en eau dans les échantillons de sol », déterminer le poids sec et volume d'eau résiduel correspondant (cad poids de l'eau présent dans l'échantillon, la masse volumique de l'eau étant de 1).
- Placer l'échantillon dans un tube de centrifugation de 50 ml et y ajouter exactement 30 ml de la solution de $BaCl_2$ 0,1 M. Agiter pendant une heure.
- Centrifuger à 3000 g pendant 10 minutes et transférer le surnageant dans un jaugé de 100 ml.
- Répéter l'opération 2x (ajouter 30 ml de $BaCl_2$ 0,1 M, agiter pendant une heure, centrifuger et transférer le surnageant dans le même jaugé de 100 ml).
- Mettre au trait avec la solution de $BaCl_2$ 0,1 M, agiter et filtrer la solution sur Whatman 42. Conserver la solution filtrée pour analyses.

3.4.2. Détermination des cations échangeables (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn)

Les cations sont dosés par ICP-AES. Les teneurs ($cmol_c Kg^{-1}$) sont obtenues par la relation suivante :

$$\text{Teneur élément } (cmol_c/Kg) = \left(\frac{\text{torche} \cdot \left(V_{BaCl_2} + V_{Résid} \right)}{m_S} \right) \cdot \left(\frac{\text{Valence}}{PM} \right) \cdot \frac{1}{10}$$

avec torche (ppm) = valeur obtenue par l'ICP (en ppm)

V_{BaCl2} (ml) = Volume totale de $BaCl_2$ utilisé pour l'extraction (soit 100 ml)

$V_{Résid}$ (ml) = volume d'eau résiduel présente dans l'échantillon solide

m_S (g) = poids sec de l'échantillon

PM = poids moléculaire de l'élément dosé

Valence = valence de l'élément dosé soit :

K, Na : +1

Ca, Mn, Mg : +2

Al, Fe : +3

5. Dernière mise à jour (date, nom)

06/08/2002, François PISCAGLIA

Annexe 5: Dosage du carbone et de l'azote

1. Principes

Analyse élémentaire

Le principe consiste en une combustion « flash » à très haute température suivie d'une analyse chromatographique des gaz produits. Chaque atome, suite à des réactions d'oxydo-réduction en présence de catalyseur étant reconstitué sous une forme moléculaire unique. Des échantillonneurs automatiques tant pour solides que liquides sont adaptables..

2. Procédure

2.1. Equipement

Analyseur élémentaire Flash. Géré entièrement par ordinateur, ce système permet de déterminer la quantité de C, H, N, S et O dans tous les types de matrices (gaz, liquides, solides) dans une gamme de concentration allant de 100 ppm à 100%. L'entièreté du contrôle de l'appareil a lieu via le logiciel Eager 300.

2.2. Echantillons

Après séchage à l'air, les échantillons sont broyés avec le broyeur RETSCH 100 équipé d'une grille perforée de 0,25 mm . La teneur en eau pondérale est déterminée sur un sous-échantillon à une température de référence de 65°C (constituants organiques prédominants) ou de 105°C (constituants minéraux prédominants), suivant les deux procédures (étuve et balance 'Sartorius') décrites dans la fiche protocole 'Prétraitement des échantillons solides'.

2.3. Réactifs

- acide aspartique servant d'étalon
- catalyseur d'oxydation pour le premier réacteur
- cuivre réduit pour le second réacteur
- hélium et oxygène

2.4. Procédure

- Peser précisément (au 1/10 de mg) environ 10mg de l'échantillon sec à l'air dans une cupule en aluminium
- Placer les cupules dans le passeur d'échantillon

2.5. Calculs

La teneur en azote et du carbone de l'échantillon est donnée directement en % de N et % de C

3. Dernière mise à jour (date, nom)

30/06/07, Q. Ponette

Analyseur élémentaire : NC soil détermination (Flash)

Principe : QUANTIFICATION DE L'AZOTE TOTAL SELON LA METHODE DE DUMAS

1 Principe de la méthode de Dumas

L'analyse de l'azote total se trouvant dans une matrice organique peut-être réalisée par la méthode de Dumas (1831). Celle-ci consiste en une combustion totale de la matrice sous oxygène. Les gaz produits sont réduits par du cuivre puis desséchés ;

2 Principe de l'analyse

- Injection de l'échantillon et de l'oxygène dans le tube de combustion à 900°C

- Combustion « flash »
- La combustion de la nacelle en étain porte temporairement la température à 1800°C ;
- Oxydation complémentaire et piégeage des halogènes sur de l'oxyde

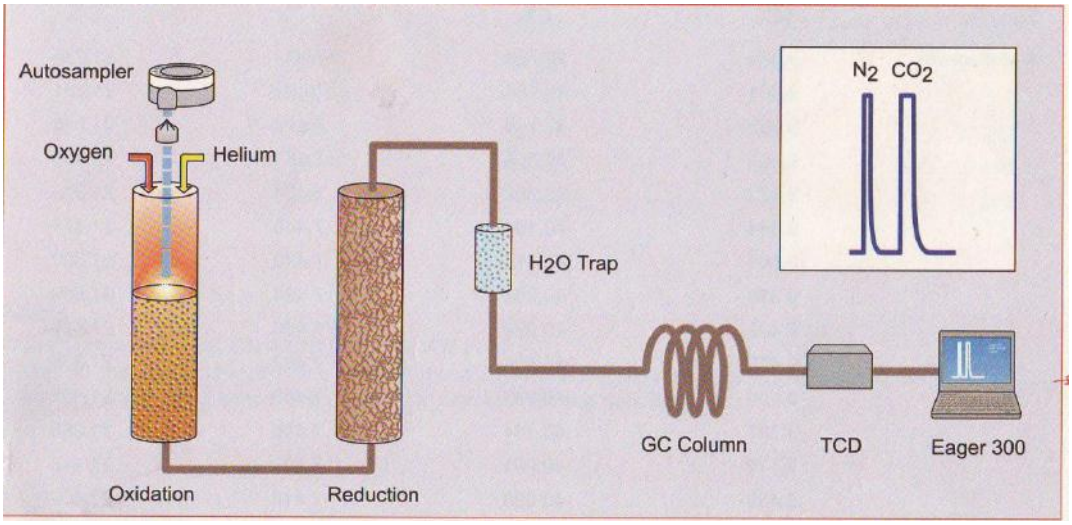
(catalyseur d'oxydation ? ? ?cobal argenté et sesquioxyde de chrome granulaire)

- Réduction des oxydes d'azote en N2 et piégeage des composés soufrés et de l'excès d'oxygène par du cuivre à 700°C

- Les gaz présents dans l'hélium sont les suivants : N2, CO2 et H2O
- Piégeage des éléments non dosés : H2O par de l'anhydrone (perchlorate de magnésium anhydre granulaire)
- Séparation chromatographique de l'azote et du CO2 présent

- Détection sur catharomètre

- Collection du signal et traitement des données



-

Détecteur à conductibilité thermique - catharomètre

Principe

Une résistance sensible à la température - tungstène, platine ou thermistance - est placée dans un flux gazeux. Un équilibre thermique est atteint quand le refroidissement de cette résistance provoqué par le

passage du gaz vecteur compense son réchauffement au moyen d'un courant électrique. Cet équilibre est modifié par l'arrivée d'un soluté entraîné par le gaz vecteur (à condition que la conductibilité du soluté soit différente de celle du gaz vecteur) car la capacité de refroidissement du mélange, différente de celle du gaz vecteur seul, entraîne une variation de la résistance.

Cette résistance est un élément d'un pont de Wheatstone (figure 2.13) opposé à une autre résistance où ne circule que le gaz vecteur. Le déséquilibre de ce pont génère un signal qui indique la présence d'un soluté.

Annexe 6: Dosage des éléments totaux (végétaux et sol)

Minéralisation par micro-onde pour les végétaux

1. Source de la méthode

Application CEM Mars express

Mark Gerdes, Ulf Sengutta

2. Principes

Le matériel végétal est digéré au micro-onde en présence d'acide nitrique.

Cette méthode permet le dosage des éléments suivants : P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Zn , B,Cu,Al,Cd, Ni, Cr, Pb

3. Procédure

4.1. Equipement

Mars express

4.2. Echantillons

Les échantillons sont des végétaux. Après séchage à l'air et pré-traitements complémentaires éventuels (cfr. fiche protocole 'Prétraitement des échantillons solides'), les échantillons sont broyés avec le broyeur RETSCH SK100 équipé d'une grille perforée de 0, 5 mm (renvoyer à une fiche protocole de synthèse). La teneur en eau pondérale de l'échantillon est déterminée à une température de référence de 65°C suivant la procédure décrite ci-dessous.

4.3. Réactif

Nitric acid, HNO_3 (65%) suprapur

4.4. Procédure

1. peser 1 g de l'échantillon dans XP-1500 vessel
2. ajouter 12 mL d'HNO_3
3. digestion au miro-onde

Program the MARS express

Heating Program: Time-to-Temperature

Power [W] 1200

Puissance 100%
Ramp Time 15 min (temps pour atteindre la t° voulue)
Temp. [°C] 200
Time at Temp. 15 min (temps de digestion)

4. récupération du volume digéré dans un jaugé et mise au trait de jauge avec de l'eau milli Q

4.5. Calculs

Les éléments P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Zn , B Cu, Al sont dosés à la torche à plasma.

Les teneurs en éléments sur la base du poids sec, en %, sont calculées suivant :

$$\text{teneur en élément } (\text{g}/100\,\text{g}) = \frac{\text{teneur en solution (ppm)} \times \text{V (ml)}}{\text{poids sec (g)} \times 10000}$$, avec :

V (ml) : volume du jaugé utilisé ;

poids sec (g) : poids sec à 65°C.

6. Dernière mise à jour (date, nom)

30/06/07, Q. Ponette

Minéralisation du matériel minéral par micro-onde

Digestion totale avec HNO_3/HF au four à micro-ondes, d'échantillons de sols et d'humus

1. Source de la méthode
Handbuch Forstliche Analytik (4. Ergänzung 2009)

2. Principes

Le mélange HNO_3/HF combine l'action oxydante de HNO_3 et la solubilisation des silicates par HF.

NO_3^- est transformé en gaz nitreux (NO_x) avec libération de O_2 provoquant l'oxydation :
$2HNO_3 \leftrightarrow 2HNO_2 + O_2$

D'autre part HF transforme tous les silicates en H_2SiF_6 instable suivi du dégagement de SiF_4.
$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$
$H_2SiF_6 \rightarrow SiF_4 + 2HF$

La matière organique est totalement décomposée :
$C_aH_bN_cO_eP_fM_g + zO_2 \rightarrow aCO_2 + b/2H_2O + cNO_x + eSO_4^{-2} + fPO4^{3-} + gM^{+/2+/3+}$

A quelques exceptions près (par ex certaines combinaisons de Zn, topaze, ..), les substances minérales sont complètement dissoutes.
Pour accélérer et compléter la dissolution et pour éviter des contaminations, on procède à des températures élevées (170-240°C) en enceinte fermée sous pression. L'apport d'énergie se fait par micro-onde.

2. Perturbations

L'effet oxydant de HNO_3/HF étant moindre que celui de HNO_3 pur, il convient de faire un prétraitement avec HNO_3 conc. quand la teneur en carbone (matière organique) est élevée.
Parfois, certains composés sont incomplètement solubilisés quand leur stabilité chimique est élevée ou que l'échantillon n'est pas broyé assez finement. Dans certains cas, des phases peu solubles peuvent précipiter ; citons à titre d'exemples : les oxydes de Ti et d'Al, les fluorides d'Al et Ca, les sulfates de Ba, Pb et Sr. Après évacuation des fumées, l'ajout de HNO_3 dilué à 150°C et sous pression s'avère utile.
Le risque de contamination est élevé. On l'évite en rinçant l'appareillage avec HNO_3 dilué.
L'utilisation du téflon ou matériaux similaires pour les tubes est requise ; de la sorte, le risque d'effet 'mémoire' est notablement réduit.

3. Appareils et accessoires

4.1. Equipement

- Mars express (four micro-ondes) avec récipients en téflon, y compris les unités d'évacuation des - fumées
- Balance analytique
- Pipettes
- Entonnoir
- Spatule

4.2. Echantillons

Les échantillons sont des sols ou des humus. Après séchage à l'air et pré-traitements complémentaires éventuels (cfr. fiche protocole 'Prétraitement des échantillons solides'), les échantillons sont broyés et tamisés. La teneur en eau pondérale de l'échantillon est déterminée à une température de référence de 105°C pour les sols et de 65°C pour les humus.

4.3. Réactif

Nitric acid, HNO_3 (65%) suprapur
Hydrofluoric acid, HF (40%) p.a ou suprapur
NaOH technique
H_3BO_3 technique

Commentaire [qp1] : Ou pour analyse ?

4.4. Solutions

Solution d'absorption soude caustique et/ou d'acide borique (solution saturée)

4. Mode d'emploi

4.1. Mise en solution

1. Préparation

Nettoyer les récipients de dissolution avec 8 ml HNO_3 conc. Fermer les récipients et chauffer au micro-ondes. Après refroidissement, jeter l'acide et rincer à l'eau milliQ.

2. Dissolution

Prise d'essai de 200 mg à 0.1mg près à humidifier avec un peu d'eau milliQ.
Ajouter 2 ml d'HNO_3 et 2 ml d'HF. Pour des échantillons riches en carbone, augmenter le volume de HNO_3 et laisser digérer la nuit en laissant ouvert la soupape du couvercle. Après fermeture du couvercle, chauffer avec le micro-onde.

Program the MARS express

a) programme température-durée

niveau	temps de montée en t° minutes	température °C	temps de minéralisation minutes
1	5	100	5
2	6	150	5
3	15	200	15

Remarques :

- introduire toujours un blanc dans la série pour le contrôle de la pureté du système (appareil + réactifs)
- introduire de préférence dans une série, des échantillons à réactivité similaire (ne pas mélanger des échantillons minéraux et organiques)

3. Evacuation des vapeurs

Après refroidissement, les bouchons sont enlevés et rincés avec de l'eau milliQ dans le tube en téflon.
On change les bouchons et on fixe le système d'évacuation des vapeurs sur les tubes. Ce système est relié à une pompe à vide et à 3 flacons de récupération des vapeurs. Les vapeurs acides sont neutralisées avec H_3BO_3 saturé et/ou NaOH. Cette opération est poursuivie jusqu'à sec. Il faut éviter que le résidu sec ne brûle dans le tube. Pour ce faire, il faut développer un programme température qui assure une évaporation progressive des réactifs de solubilisation. Au départ, l'évaporation peut être accentuée ; vers la fin, l'apport d'énergie doit être plus prudent pour éviter que le résidu sec ne colle dans le récipient de dissolution. L'ensemble de l'opération prend 1h à 1h30.

Program the MARS express
Heating Program: Time-to-Temperature

Commentaire [qp2] : Karine, d'où provient ce mode opératoire ? Ceci ne correspond pas à la méthode proposée…

Power [W] 600
Puissance 100%
Ramp Time durée de chauffage 5 min (temps pour atteindre la T° voulue)
Time at Temp. 5 min (temps de digestion)

Ensuite :
Power [W] 300

Puissance 100%
Ramp Time durée de chauffage 2 min (temps pour atteindre la T° voulue)
Time at Temp. 10 min (temps de digestion)

4. Mise en solution

Le résidu sec peut être mouillé avec quelques gouttes d'eau milliQ. On ajoute 2 ml HNO_3 conc.et 2 ml d'HCl conc . Les tubes sont placés dans le micro ondes et réchauffés sous pression jusqu'à 150 °C. La solubilisation se fait endéans les 10 à 30 min. Les solutions claires sont versées après refroidissement dans un jaugé de 50 ml et mis au trait de jauge avec de l'eau milliQ.

4.2. Détermination des éléments

Il faut utiliser impérativement la solution acide adaptée à la matrice pour la préparation des standards et comme solution de rinçage pour l'ICP.

5. Calculs

Les éléments P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Zn, B Cu, Al sont dosés à la torche à plasma.
Les teneurs en éléments sur la base du poids sec, en %, sont calculées suivant :

$$\text{teneur en élément (g / 100 g)} = \frac{\text{teneur en solution (ppm)} \times \text{V (ml)}}{\text{poids sec (g)} \times 10000}, \text{ avec :}$$

V (ml) : volume du jaugé utilisé ;
poids sec (g) : poids sec à 105°C (pour les sols) ou 65°C (pour les humus).

6. Comparaison avec d'autres méthodes

- Solubilisation totale avec HNO_3/HF (méthode A3.3.1) : les résultats sont comparables
- Solubilisation totale avec $HClO_4$/HNO_3/HF (micro-ondes, méthode A3.3.5) : résultats comparables ; toutefois une sous estimation de Cr est possible en particulier pour les échantillons d'humus.

Dernière mise à jour 12 mars 2010
Q. Ponette

Annexe 7: Stocks par hectare

1.1 Éléments échangeables

âge du peuplement	Al^{3+}(kg/ha)	Ca^{2+}(kg/ha)	Fe(kg/ha)	K^{+}(kg/ha)	Mg^{2+} (kg/ha)	Mn^{2+}(kg/ha)	Na^{+}(kg/ha)
profondeur 0-25 cm							
0	262,618	59,643	26,076	39,169	18,189	1,052	9,323
1	233,383	115,712	6,261	31,844	28,440	0,779	12,078
3	231,896	82,327	4,924	25,205	19,334	0,886	12,228
3 (non-brûlé)	271,694	64,365	2,073	14,288	14,067	0,519	9,766
7	347,505	54,807	7,958	23,945	17,777	3,493	10,154
14	234,579	67,356	5,041	23,220	20,244	2,948	12,415
profondeur 25-50 cm							
0	224,485	42,458	42,124	13,762	11,541	0,000	8,597
1	171,563	59,506	8,935	12,741	16,081	0,000	11,715
3	187,163	51,184	5,320	10,022	13,289	0,000	10,643
3 (non-brûlé)	236,145	57,305	2,331	11,803	12,870	0,056	8,706
7	295,593	43,539	5,152	8,070	11,905	0,000	9,394
14	358,100	43,024	5,265	13,677	12,562	0,000	9,772

f) Éléments totaux

âge du peuplement (années)	Al (kg/ha)	Ca (kg/ha)	Fe (kg/ha)	K (kg/ha)	Mg (kg/ha)	Mn (kg/ha)	Na (kg/ha)	P (kg/ha)	S (kg/ha)
profondeur 0-25 cm									
0	38768,730	222,270	34574,609	237,567	164,316	59,482	215,371	693,948	104,816
1	29432,819	339,076	27693,423	191,277	143,847	52,789	83,392	838,597	109,576
3	36551,423	331,571	21981,809	294,150	153,076	104,819	226,143	819,893	114,781
3 non-brûlé	42381,170	214,274	25947,426	435,162	188,225	97,029	63,990	1014,635	185,759
7	39117,654	377,604	32075,861	366,848	210,083	86,606	132,485	960,833	180,180
14	36779,938	247,466	29322,535	254,403	183,278	72,393	136,769	955,294	166,756
profondeur 25-50 cm									
0	46746,546	232,444	41915,952	230,635	171,892	63,265	299,085	575,985	761,614
1	31223,293	306,852	28611,818	183,202	129,527	43,171	79,912	575,310	110,220
3	43071,754	200,156	28725,160	243,425	157,125	95,495	67,766	632,854	119,231
3 (non-brûlé)	49460,956	264,358	28991,936	513,900	190,971	71,723	112,996	772,155	180,168
7	38624,318	288,419	32164,643	224,712	157,990	55,156	95,411	684,128	115,007
14	35050,826	247,655	31270,459	207,317	165,645	53,702	77,014	769,713	122,757

g) Éléments totaux de la litière et la végétation

âge du peuplement	Ca (kg/ha)	K(kg/ha)	Mg(kg/ha)	Na(kg/ha)	P(kg/ha)	S (kg/ha)
litière						
0	6,252	2,344	1,802	0,045	1,018	1,327
1	6,979	4,216	1,600	0,039	0,862	1,221
3	30,821	9,166	7,297	0,210	3,342	6,931
7	49,010	17,635	14,415	0,368	8,996	17,331
14	146,619	48,226	48,136	1,267	34,571	67,114
végétation						
0	10,321	15,153	5,449	0,104	5,475	4,010
1	1,899	5,043	1,176	0,014	0,843	0,952
3	20,146	16,611	6,893	0,140	5,213	7,131

Annexe 8: Résultats des comparaisons des stocks en éléments totaux

âge des peuplements (années)	N (kg/ha) résultats	N (kg/ha) écart-types	Na (kg/ha) résultats	Na (kg/ha) écart-types	K (kg/ha) résultats	K (kg/ha) écart-types	Ca (kg/ha) résultats	Ca (kg/ha) écart-types	P (kg/ha) résultats	P (kg/ha) écart-types	S (kg/ha) résultats	S (kg/ha) écart-types	Mg (kg/ha) résultats	Mg (kg/ha) écart-types
Acacias auriculiformis														
2	28,656	no data	0,069	no data	49,596	no data	88,678	no data	25,806	no data	1,324	no data	13,758	no data
3	93,460	no data	0,348	no data	135,990	no data	297,037	no data	74,207	no data	4,080	no data	45,642	no data
7	560,741	no data	3,369	no data	675,322	no data	1834,597	no data	388,171	no data	23,011	no data	278,961	no data
14	1063,275	no data	8,791	no data	1138,979	no data	3543,877	no data	675,622	no data	41,964	no data	535,257	no data
profondeur 0-25 cm														
2	1883,763	164,380	124,508	31,823	306,863	174,097	294,974	43,071	891,042	221,857	136,705	31,226	161,716	28,469
3	2465,938	218,148	226,143	29,524	294,150	322,266	331,571	33,489	819,893	189,046	114,781	42,374	153,076	30,291
7	2086,997	151,497	132,485	70,775	366,848	126,303	377,604	46,546	960,833	42,243	180,180	19,318	210,083	12,112
14	2055,523	391,745	136,769	112,650	254,403	79,746	247,466	107,338	955,294	255,170	166,756	56,583	183,278	35,195
profondeur 25-50 cm														
2	1514,997	285,301	86,891	49,726	313,509	220,930	257,122	69,411	660,106	97,577	136,540	27,096	159,208	26,976
3	1918,484	268,198	67,766	69,592	243,425	405,556	200,156	63,577	632,854	142,555	119,231	42,486	157,125	33,039
7	1281,296	240,210	95,411	10,008	224,712	5,831	288,419	35,954	684,128	34,624	115,007	3,210	157,990	5,903
14	1494,293	638,962	77,014	28,092	207,317	45,552	247,655	122,372	769,713	84,421	122,757	12,693	165,645	12,438
litière														
2	46,644	9,552	0,125	0,042	6,691	1,882	18,900	4,658	2,102	0,433	4,076	0,854	4,449	1,047
3	84,717	13,500	0,210	0,073	9,166	2,045	30,821	6,953	3,342	0,591	6,931	1,336	7,297	1,666
7	225,585	82,755	0,368	0,067	17,635	3,849	49,010	10,452	8,996	3,984	17,331	7,290	14,415	0,719
14	841,382	1014,104	1,267	1,517	48,226	57,104	146,619	179,786	34,571	40,939	67,114	83,832	48,136	65,576
végétation														
2	3,338	1,251	0,077	0,022	10,827	4,254	11,022	3,717	3,028	1,101	4,042	1,127	4,034	1,278
3	2,029	0,174	0,140	0,041	16,611	7,372	20,146	6,921	5,213	1,939	7,131	2,005	6,893	2,122
stocks totaux														
2	3477,398	no data	211,670	no data	687,486	no data	670,696	no data	1582,084	no data	282,687	no data	343,165	no data
3	4564,628	no data	294,607	no data	699,342	no data	879,731	no data	1535,509	no data	252,154	no data	370,033	no data
7	4154,619	no data	231,632	no data	1284,517	no data	2549,631	no data	2042,128	no data	335,530	no data	661,450	no data
14	5454,474	no data	223,841	no data	1648,924	no data	4185,617	no data	2435,200	no data	398,592	no data	932,316	no data

Annexe 9 : Inventaire dendrométrique dans le peuplement de 14 ans d'Acacia auriculiformis

lignes	arbres	circonférence (cm)à 1,3 m	nombre de tiges
3	1	117	1
3	2	57	1
3	3	42,285222	2
3	4	29,8	1
3	5	72,2236111	3
3	6	61,51975293	2
3	7	57	1
3	8	36	1
3	9	55,5	1
3	10	106,5093893	2
3	11	47,5	1
3	12	27,8	1
3	13	38,5	1
3	14	34	1
3	15	43,9	1
3	16	29,8	1
3	17	106,8755351	3
3	18	110	1
3	19	57,9	1
3	20	44	1
3	21	37	1
3	22	44,24115731	2
3	23	78,64610607	2
3	24	65	1
3	25	42,5	1
3	26	54,8	1
3	27	28,9	1
3	28	77	1
3	29	70,6	1
3	30	36,9	1
3	31	95,7	1
6	1	29,4	1
6	2	33,4	1
6	3	47,4	1
6	4	60,5	1
6	5	30	1
6	6	60	1
6	7	44,92983419	3
6	8	29,1	1
6	9	30,7	1
6	10	55,03471632	2
6	11	23,2	1
6	12	77,83289793	5
6	13	81,6289777	2
6	14	54,26029856	2
6	15	44	1
6	16	66,5	1
6	17	88	1
6	18	49	1
6	19	64,02038738	2
6	20	47,1	1
6	21	48,8	1
6	22	45,55107024	2
6	23	66,12450378	2
6	24	31,9	1
6	25	22	1
6	26	89,47273328	2
6	27	44,79151705	2
6	28	36	1
6	29	129	1
6	30	81,57180886	2
6	31	36,69345991	2
6	32	42	1
6	33	37,4	1
6	34	50,91414342	2
6	35	80,2	1
6	36	87,3	1
6	37	54,6	1
6	38	38,6	1
6	39	43,3	1
6	40	44,8	1

lignes	arbres	circonférence (cm)à 1,3 m	nombre de tiges
9	1	54	1
9	2	32	1
9	3	39,6	1
9	4	85,24019005	2
9	5	26,4	1
9	6	40,4	1
9	7	31,5	1
9	8	62,7624888	2
9	9	38	1
9	10	74,7	1
9	11	41,9	1
9	12	74,96459164	2
9	13	64,98846051	3
9	14	50	1
9	15	30,4	1
9	16	83	1
9	17	84	1
9	18	21,9	1
9	19	53,2	1
9	20	83,76311838	4
9	21	31,8	1
9	22	130,2856093	4
9	23	42,8	1
9	24	57	1
9	25	65,93094873	2
9	26	56,92319387	2
9	27	31,3	1
9	28	92,89241088	2
9	29	119,5	1
9	30	27,6	1
9	31	49	1
9	32	85,65068593	2
12	1	35,4	1
12	2	48,9	1
12	3	62,8	1
12	4	46,4	1
12	5	41,6	1
12	6	46	1
12	7	40	1
12	8	66,8	1
12	9	139,2	1
12	10	82	1
12	11	69,39344349	2
12	12	37,4	1
12	13	29,9	1
12	14	80,54594962	2
12	15	35	1
12	16	46	1
12	17	38,91657744	2
12	18	66,7	1
12	19	75	1
12	20	42,82907891	2
12	21	49	1
12	22	50,2	1
12	23	26,4	1
12	24	58,2	1
12	25	57,2	1
12	26	50	1
12	27	43	1
12	28	27	1
12	29	32	1
12	30	60,8276253	2

Annexe 10 : résultats des stocks dans les Acacias (troncs et branches) de Sarah Gengler

Âge (années)	Masse N (Kg ha^{-1})	Masse Na (Kg ha^{-1})	Masse K (Kg ha^{-1})	Masse Ca (Kg ha^{-1})	Masse P (Kg ha^{-1})	Masse S (Kg ha^{-1})	Masse Mg (Kg ha^{-1})
	Total						
2	28,66	0,07	49,60	88,68	25,81	1,32	13,76
3	93,46	0,35	135,99	297,04	74,21	4,08	45,64
3,5	210,95	0,96	280,21	679,48	156,89	8,94	103,91
7	560,74	3,37	675,32	1834,60	388,17	23,01	278,96
14	1063,28	8,79	1138,98	3543,88	675,62	41,96	535,26