RÔLE DES ESPÈCES LIGNEUSES À CROISSANCE RAPIDE DANS LE FONCTIONNEMENT BIOGÉOCHIMIQUE DE LA JACHÈRE. EFFETS SUR LA RESTAURATION DE LA FERTILITÉ DES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX.

(BASSIN DE LA BÉNOUÉ AU NORD-CAMEROUN)

(VOLUME 1 : TEXTE)

Jean Michel HARMAND

CIRAD, Département Forêt

Illustration de couverture : *Cassia siamea* photo M. Arbonnier

IRAD

Institut de la Recherche Agronomique
pour le Développement
Minrest - Cameroun

CIRAD

Centre de coopération internationale
en recherche agronomique
pour le développement

RÔLE DES ESPÈCES LIGNEUSES À CROISSANCE RAPIDE DANS LE FONCTIONNEMENT BIOGÉOCHIMIQUE DE LA JACHÈRE. EFFETS SUR LA RESTAURATION DE LA FERTILITÉ DES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX.

(BASSIN DE LA BÉNOUÉ AU NORD-CAMEROUN)

(VOLUME 1 : TEXTE)

Jean Michel HARMAND

CIRAD, Département Forêt

Ce travail a fait l'objet d'une thèse de doctorat de l'Université de Paris VI en Biologie et Ecologie végétales tropicales, soutenue le 6 octobre 1997 devant le jury ci-dessous désigné.

Membres du jury

Mme	F. BERNHARD-REVERSAT	Directeur de recherches ORSTOM	Rapporteur
MM	C. FELLER	Directeur de recherches ORSTOM	Examinateur
	P. LAVELLE	Professeur à l'Université de Paris VI	Examinateur
	B. MALLET	Chef du Programme Agroforesterie CIRAD-Forêt	Examinateur
	R. OLIVER	Agro-chimiste CIRAD-CA	Examinateur
	H. PUIG	Professeur à l'Université de Toulouse III	Directeur
	M. RAPP	Directeur de recherches CNRS / CEFE	Rapporteur

Ce travail de recherche sur les processus de restauration de la fertilité des sols ferrugineux par la jachère ligneuse a été conduit dans la région de Garoua au Cameroun, au sein de l'Institut de la Recherche Agronomique pour le Développement (IRAD).

Cette étude constituait une des composantes des recherches entreprises par le Projet Garoua (Phases 1 et 2) sur la gestion durable de la fertilité de sols cultivés en zone de savane soudanienne. Elle s'insérait également dans le cadre des objectifs du Projet Jachère du Programme Agroforesterie du CIRAD-Forêt.

Sur le terrain, le travail a débuté en 1989, mais la majorité des recherches a été menée de 1993 à 1996. Ce travail a été financé, d'une part grâce à une contribution de l'Etat camerouais et d'autre part sur des fonds français au travers du Fonds d'Aide et de Coopération, de la Caisse Française de Développement et du CIRAD.

Tous droits de reproduction par tous procédés,
de diffusion et de cession réservés pour tous pays.

© CIRAD-Forêt 1998

A la mémoire de mon père

A Rachel,
pour sa patience et sa joie de vivre

A Brice, Wilfried, Carine et Jeasmine

SOMMAIRE

VOLUME 1 : TEXTE

PREAMBULE

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION 1

PREMIERE PARTIE : CADRE DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE

CHAPITRE I : CADRE DE L'ETUDE : DESCRIPTION DES STATIONS 9

1. LA SITUATION GEOGRAPHIQUE 9
2. LE CLIMAT 9
3. LE SOL 11
4. LE PASSE CULTURAL DES SITES D'ETUDE 13
5. LA VEGETATION DES JACHERES 13

CHAPITRE II : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODOLOGIES ANALYTIQUES 15

1. LES DIFFERENTS TRAITEMENTS DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL 15
    11. L'essai de Ngong 15
    12. L'essai de Mayo Dadi 17
    13. Remarques à propos des différents traitements du protocole expérimental 18
    14. Remarques à propos du protocole d'étude du cycle biogéochimique par traitement 19
2. ECHANTILLONNAGE ET METHODES D'ANALYSES DES SOLS 20
    21. Les prélèvements de sols 20
    22. Les principales méthodes analytiques utilisées pour les sols 21
    23. Le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols 23
3. LE CYCLE EDAPHIQUE DE L'AZOTE 24
    31. Principe et interprétation de l'étude de minéralisation de l'azote *in situ* 24
    32. Prélèvements et analyses chimiques 25
    33. Problèmes liés à la méthode 27
4. LA MACROFAUNE DU SOL 28
5. LES MESURES DE PHYTOMASSE ET MINÉRALOMASSE 29
    51. La biomasse aérienne ligneuse 29
    52. La biomasse aérienne herbacée 30
    53. La phytomasse souterraine 31
    54. Les méthodes d'analyses utilisées pour les végétaux 33
6. LES MESURES DES FLUX HYDRIQUES ET DES FLUX D'ELEMENTS MINERAUX CIRCULANT DANS LES EAUX 33
    61. Les systèmes de collecte des eaux (pluviomètres, colliers, parcelles de ruissellement, lysimètres) 33
    62. Les prélèvements et analyses des solutions 35

7. LES RETOMBEES DE LITIERE 35
71. Cas des peuplements bien développés (*Eucalyptus* et *Acacia* à Ngong) 35
72. Cas des peuplements peu développés (*Cassia* à Ngong et Mayo Dadi et *Acacia* à Mayo Dadi) 36
73. Prélèvements et analyses 37
8. LA DECOMPOSITION DES LITIERES 37
81. Le stock de litière au sol et son évolution 37
82. L'étude de la décomposition des litières *in situ* par la méthode des sacs 39
9. LA FIXATION D'AZOTE 39
10 . ETABLISSEMENT DES BILANS ECOSYSTEMIQUES 41
101. Le bilan hydrique 41
102. Les cycles et bilans écosystémiques 42
11. COMPORTEMENT DES CULTURES APRES JACHERE 43
111. Comportement des cultures à Ngong après 2 ans de jachère 43
112. Comportement des cultures à Ngong après 5 ans de jachère 43
12. TRAITEMENT DES DONNEES ET PRESENTATION DES RESULTATS 43

DEUXIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL 45

1. EVOLUTION DES DENSITES APPARENTES DU SOL 45
2. EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL 45
21. Comparaison synchrone des profils de carbone et azote totaux de juillet 1995 48
22. Analyse diachronique des teneurs en carbone et azote totaux du sol 49
23. Etude de la dynamique des différentes fractions granulométriques de la MO du sol 52
231. Comparaison synchrone des différentes fractions organiques du sol 52
232. Analyse diachronique des différentes fractions organiques du sol 59
3. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MINERALES DU SOL 61
31. Comparaison des caractéristiques minérales du sol sous les différents traitements en 1995 61
32. Analyse diachronique des caractéristiques minérales du sol 65
4. EVOLUTION DE LA MACROFAUNE DU SOL 67
5. QUELQUES RESULTATS SUR LE COMPORTEMENT DES CULTURES APRES JACHERE 75
51. Comportement des cultures à Ngong après 2 ans de jachère 75
52. Comportement des cultures à Ngong après 5 ans de jachère 79
6. CONCLUSION SUR L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL 80

CHAPITRE IV : LES PHASES DES CYCLES BIOGEOCHIMIQUES DES PEUPLEMENTS DE JACHERE 83

1. LE STOCKAGE DES BIOELEMENTS 83
11. Les stocks de carbone et d'éléments minéraux du sol 83
12. Accumulation dans la biomasse ligneuse aérienne des peuplements 87
121. Composition chimique des tissus 87
122. Les tarifs 89
123. Biomasse et minéralomasse 91
13. Fixation temporaire dans la partie aérienne de la strate herbacée 97
131. Dynamique de la strate herbacée 98

132. Biomasse et production primaire aérienne de la strate herbacée 99
133. Teneurs en éléments minéraux des plantes herbacées 102
134. Minéralomasse de la partie aérienne de la strate herbacée 105
14. Accumulation dans la phytomasse racinaire 106
141. Phytomasse des grosses racines et souches des peuplements ligneux 106
142. Phytomasse des racines fines des peuplements ligneux de Ngong 107
143. Teneurs en éléments minéraux des racines à Ngong 112
144. Minéralomasse des parties souterraines 115
15. Accumulation dans la litière au sol 115
151. Evolution du stock de litière au sol 115
152. Composition chimique et évolution des stocks de bioéléments de la litière au sol 117
16. Conclusion partielle sur le stockage des bioéléments 118
2. LES FLUX DE BIOELEMENTS 121
21. Apports au sol par la litière des arbres 121
211. Production de litière par les arbres 121
212. Teneurs en éléments minéraux des litières de feuilles 125
213. Apports annuels de bioéléments au sol par la litière des arbres 129
22. Apports au sol par la strate herbacée 129
23. Décomposition des litières et recyclage des éléments minéraux 133
231. Décomposition de la litière d'*Eucalyptus* à Ngong 133
232. Décomposition de la litière de *Cassia* à Mayo Dadi 137
233. Décomposition de la litière des jachères herbacées 138
234. Bilan et discussion sur la décomposition des litières et la libération des éléments minéraux 138
24. Les transferts d'éléments par l'eau 143
241. Les composantes du bilan hydrique 143
242. Les apports atmosphériques 145
243. Le pluviolessivage 150
244. Le ruissellement 154
245. La lixiviation 155
25. Conclusion partielle sur les flux de bioéléments 157

CHAPITRE V : LES CYCLES ET BILANS ECOSYSTEMIQUES 159

1. INTRODUCTION 159
2. LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE 161
3. LE CYCLE DE L'AZOTE 163
31. La minéralisation de l'azote du sol 163
32. Le stockage de l'azote 170
33. Les flux annuels d'azote 171
4. LES CYCLES DES ELEMENTS P, K, Ca ET Mg 176
41. Les flux annuels 176
42. Les stocks en 1995 181
43. Exploitation des peuplements et restitution des éléments minéraux 185

CONCLUSIONS GENERALES 189

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 201

VOLUME 2 : ANNEXES

PREAMBULE

Ce travail de recherche sur les processus de restauration de la fertilité des sols ferrugineux par la jachère ligneuse a été conduit dans la région de Garoua au Cameroun, au sein de l'Institut de la Recherche Agronomique pour le Développement (IRAD).

Cette étude est une des composantes des recherches entreprises par le Projet Garoua (phase 1 et 2) sur la gestion durable de la fertilité des sols cultivés en zone de savane soudanienne. Elle s'insère également dans le cadre des objectifs du Projet Jachère du Programme Agroforesterie du CIRAD-Forêt [1].

Sur le terrain, le travail a débuté en 1989, mais la majorité des recherches a été menée de 1993 à 1996. Ce travail a été financé, d'une part grâce à une contribution de l'Etat camerounais et d'autre part par l'intermédiaire de fonds français (FAC [2], CFD [3], CIRAD).

---

[1] CIRAD-Forêt : Département des Forêts du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

[2] FAC : Fonds d'Aide et de Coopération

[3] CFD : Caisse Française de Développement

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont montré un intérêt pour mon étude.

Je remercie le Professeur H. PUIG de m'avoir ouvert les portes de l'université et de son soutien et sa compréhension tout au long de cette étude. M. R. PELTIER est à l'origine du premier dispositif ayant servi de base à ce travail de recherche qu'il m'a incité à entreprendre. Je suis heureux aujourd'hui de lui faire part de ma reconnaissance. Dr O. EYOG MATIG a également souhaité que je puisse mener à bien cette thèse et je lui en suis gré.

Cette étude a pu être conduite grâce à l'appui de tous mes responsables et supérieurs hiérarchiques à l'IRAD et au CIRAD. Chacun à son niveau m'a permis d'obtenir les moyens financiers, humains et logistiques indispensables. Je pense en particulier à MM. Z. B. BOLI, S. NZIETCHUENG, L. SEINY BOUKAR, O. EYOG MATIG, R. BILLAZ et J.F. POULAIN qui ont exercé des responsabilités successives au sein du Projet Garoua ainsi qu'à MM. R. PELTIER, B. MALLET et J.C. BERGONZINI qui m'ont aidé à divers titres au sein du CIRAD-Forêt.

Je rends hommage à mon collègue Dr C.F. NJITI que j'ai beaucoup sollicité et avec le concours duquel j'ai pu conduire la plupart des expérimentations. Je remercie également les CSN D. BRUGIERE, N. JACOTOT et J.C. BOIS pour leur collaboration active dans la mise en place et le suivi des expérimentations de terrain. J'exprime ma gratitude à MM. J. MILLET, D. BERGEAL, Mlle S. GUIBON, MM. L. CADOT et E. HIEN pour leur sérieux et leur compétence dans la réalisation des travaux complémentaires à l'objet principal de ma thèse. Aussi, je rends hommage aux observateurs et techniciens fidèles et constants MM. D. BEKOUDOU, H. HAMAN, R. NJOYA, M. DAWAI, TAPSOU et J. NAI dont j'ai pu apprécier la disponibilité. J'ai également une pensée pour mon compagnon de route S. DIGUIM.

Au CIRAD-Forêt, M. L. HOUDE s'est montré ouvert et disponible et ainsi j'ai pu profité agréablement de son appui en biométrie.

J'adresse également mes remerciements à M. C. FELLER pour l'intérêt qu'il a porté à mon étude et pour l'accueil qu'il m'a réservé au laboratoire des sols cultivés de l'ORSTOM.

Je tiens à remercier M. M. RAPP d'avoir accepté de juger ce travail. De même, j'apprécie au sein du jury la présence du Professeur P. LAVELLE et de M. R. OLIVER qui a pris en charge dans son laboratoire une partie des nombreuses analyses chimiques des sols et des eaux.

Enfin, je suis particulièrement reconnaissant à Mme F. REVERSAT de son appui tout au long de cette étude, depuis l'élaboration du programme de travail jusqu'à la mise au point du manuscrit. Je tiens à la remercier pour l'attention qu'elle a bien voulu accorder à mes recherches et pour ses nombreux encouragements et ses précieux conseils.

Que ma famille, mes collègues et amis soient remerciés pour leur soutien moral tout au long de ce travail.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

En Afrique tropicale, le système traditionnel d'utilisation des sols consiste, très souvent, en une phase de culture, suivie après baisse des rendements agricoles d'une phase de jachère. Au cours de celle-ci, la végétation naturelle, herbacée et ligneuse, se régénère. Parmi les principales fonctions de la jachère, on peut citer la restauration de la fertilité par l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol et la lutte contre les adventices. La restauration de la fertilité du sol, étudiée dans le cadre de cette thèse, est due à l'action de la jachère sur le cycle des éléments minéraux et la matière organique du sol (MOS).

En absorbant le gaz carbonique de l'air, l'eau et les éléments minéraux du sol, et en les immobilisant sous une autre forme dans ses plantes, la jachère favorise un transfert minéral du sol vers la végétation. Alors qu'une partie des produits de l'immobilisation constitue la biomasse et la minéralomasse pérenne, l'autre partie retourne au sol sous forme de litière aérienne et racinaire, et accroît le taux de MOS. L'augmentation de cette MO au sens large (litière et MOS) entraîne, chaque année, à travers sa décomposition, une libération plus grande de nutriments en particulier d'azote. Ces processus d'absorption, d'immobilisation et de recyclage d'éléments minéraux par les plantes de la jachère s'accompagnent de plusieurs phénomènes pouvant favoriser une amélioration relative du bilan minéral du système sol-plante (SEBILLOTTE,1993) :

(1) Tout d'abord, la modification de la dynamique de l'eau, par augmentation de l'évapotranspiration réelle (ETR) liée au plus fort développement de la jachère par rapport à la culture, va réduire la percolation des éléments solubles. (2) L'absorption par les plantes des éléments des couches profondes va permettre leur redistribution dans les horizons de surface. Ce phénomène concerne essentiellement les plantes pérennes à système racinaire profond, en particulier les arbres et les arbustes. (3) La fixation d'azote atmosphérique, lorsqu'elle existe, procure un enrichissement du système en azote. (4) Enfin, l'accroissement du taux de MOS entraîne une augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) et une amélioration de la rétention des éléments minéraux, en particulier ceux apportés par les pluies (KELLMAN, 1980), sur le complexe absorbant, rôle essentiel en sol pauvre en argile. La MOS assure également une fonction de stockage d'éléments nutritifs et améliore la stabilité de l'agrégation et les activités microbiennes et enzymatiques (FELLER, 1995).

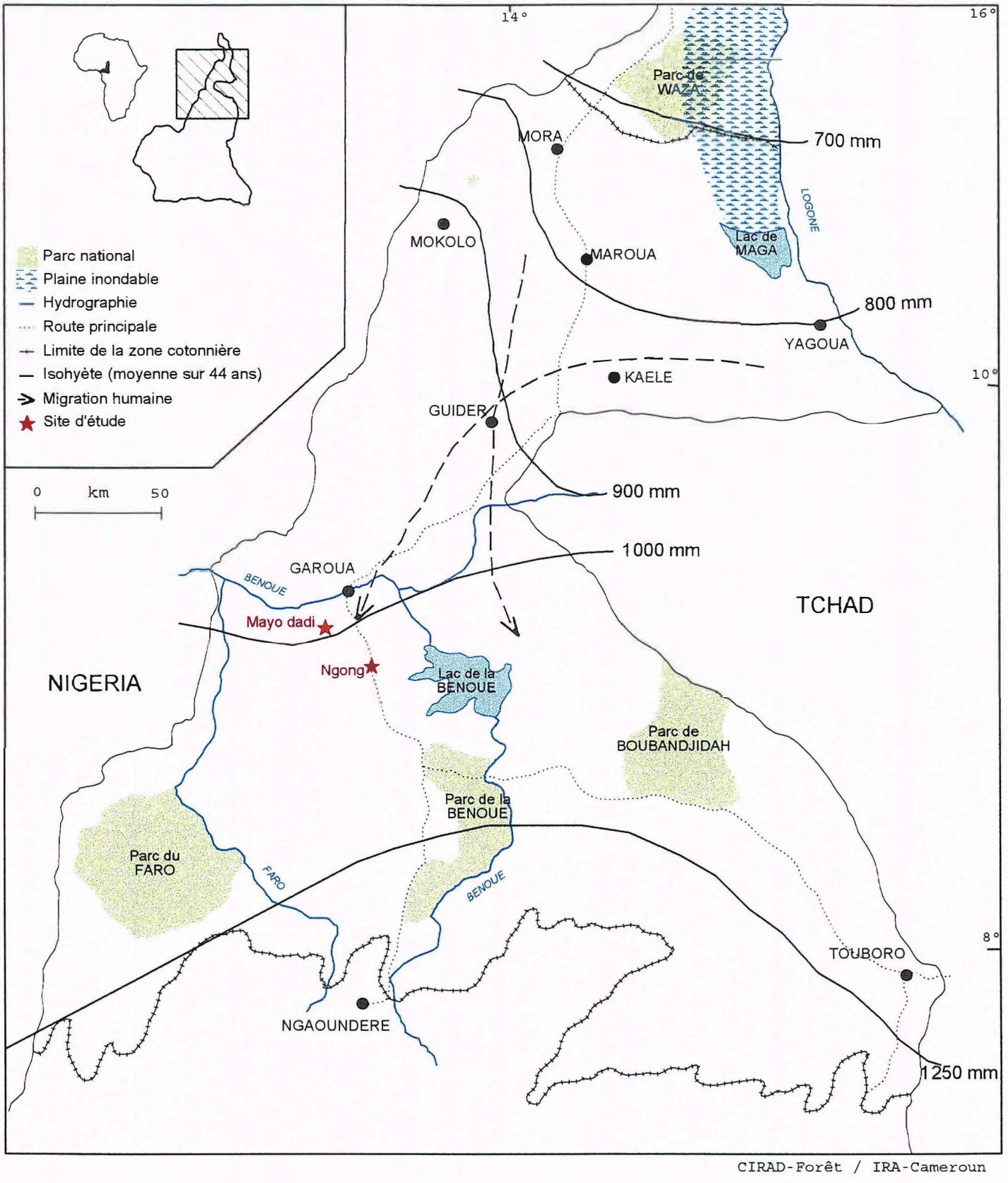


Figure 1 : Carte de la zone soudanienne du Cameroun.

Au moment de la remise en culture, les nutriments immobilisés sous forme organique dans la végétation seront restitués au sol selon différents rythmes : celui du brûlis donnant une accumulation brutale de cendres à la surface du sol ou celui de la décomposition de la MO pour ce qui concerne le stock de nécromasse aérienne et racinaire non brûlée. Le processus d'immobilisation dans la biomasse pérenne et de restitution par les cendres est fondamental pour la culture sur brûlis en zone forestière humide où l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques du sol est limitée dans la jachère (BERNHARD-REVERSAT, 1975 ; ANDRIESSE, 1977 ; LAUDELOUT, 1990 ; LEVANG, 1993 ; MOREAU, 1993). Il n'existe pratiquement pas de données sur cet aspect en zone de savane. En revanche, beaucoup d'auteurs ont décrit la baisse simultanée de MO et de fertilité des terres de savane avec leur mise en culture ainsi que l'augmentation de leur teneur en carbone et azote durant la phase de jachère naturelle (SIBAND, 1974 ; PIERI, 1985 ; GREENLAND et NYE, 1959 ; FELLER, 1977 ; FELLER et MILLEVILLE, 1977 ; FELLER et al., 1993).

Les processus d'immobilisation dans la biomasse, d'humification et de décomposition de la MO déterminent en grande partie les bilans, organique et minéral, de la jachère. Ces processus dépendent de plusieurs facteurs d'ordre climatique, pédologique et biotique, agissant en relation les uns avec les autres. Les facteurs climatiques, en particulier la pluviosité annuelle, conditionnent le niveau de production de biomasse du système et la vitesse de décomposition de la MO. Les facteurs édaphiques, comme la richesse minérale liée à la présence d'argile, influencent le développement de la végétation, la production de MO et la fixation des éléments minéraux et de l'azote atmosphérique. Les facteurs biotiques, souvent liés aux facteurs précédents, déterminent également la reconstitution des stocks de MO et d'éléments minéraux. On peut citer, parmi les principaux facteurs biotiques : la richesse minérale de la MO, la capacité de la végétation à recycler des éléments de la profondeur du sol et à fixer l'azote atmosphérique, l'activité de la faune et de la microflore du sol et enfin le mode de gestion de la jachère.

Compte tenu des processus évoqués précédemment, la jachère a joué un rôle essentiel dans le renouvellement de la fertilité des sols cultivés en Afrique tropicale, tout en assurant également une production de bois, de fourrage et de produits de cueillette. Néanmoins, depuis quelques temps déjà, sa place dans les systèmes agraires est fortement remise en question. Avec l'augmentation de la population et de la demande en terres agricoles, la jachère est exploitée plus fortement et sa durée se raccourcit, si bien que son efficacité s'en trouve réduite. A ce sujet,

FLORET et al. (1993) mentionnent que, dans la jachère naturelle, la "remontée biologique", liée à un retour à la savane arbustive ou arborée "en équilibre", est souvent contrariée par le feu et le pâturage et peut demander 30 à 40 ans. Dans le même sens, un certain nombre de travaux expérimentaux ont montré que la jachère naturelle herbacée, souvent pâturée, de courte durée (2 à 6 ans), en zone de savane soudanienne, ne permet pas le maintien d'un niveau de production en systèmes manuels peu intensifs. Cependant, si la jachère est très productive (forte quantité de biomasse produite), le rendement des cultures qui lui succède est nettement accru (PIERI, 1989).

Les solutions de remplacement de la jachère naturelle ne sont pas nombreuses et beaucoup d'auteurs suggèrent que la gestion durable des sols ferrugineux cultivés ne pourra se faire que par des apports d'engrais associés à des méthodes biologiques, en raison du rôle prépondérant joué par la MO dans la fertilité de ces sols. Avec simple apport d'engrais minéraux, on assiste toujours à une dégradation du sol par diminution des bases échangeables, acidification et toxicité aluminique. Le chaulage ne réussit qu'imparfaitement à maintenir le pH proche de la normalité (PICHOT et al., 1981 ; PIERI, 1989). Les moyens de maintenir le taux de MO dans les systèmes de culture restent limités : l'enfouissement des pailles, longtemps proposé comme technique permettant de minimiser la perte de MO, s'avère insuffisant ; les engrais verts donnent de meilleurs résultats mais seule la MO déjà transformée, comme le compost ou le fumier, peut maintenir la productivité des terres (PIERI, 1989). Or ces produits sont rarement disponibles, et à ce sujet, CESAR et COULIBALY (1990) précisent que la résolution de la baisse de fertilité en zone de savane par l'utilisation du fumier aboutit à une impasse, car l'effectif actuel en bétail et la disponibilité en paille ne peuvent pas satisfaire les besoins.

Dans le cas de la région de Garoua au Cameroun, les populations immigrantes, venant de zones sahéliennes plus peuplées (figure 1 page 2), défrichent la savane arborée et développent un système de culture à base de cotonnier et céréales. En moins d'une dizaine d'années, sur ces terrains ferrugineux sableux, des signes de "fatigue des sols" apparaissent, les rendements baissent et la terre est peu à peu abandonnée. GUYOTTE et al. (1995) observent que la dégradation de la fertilité du sol correspond à un appauvrissement du profil pédologique en bases échangeables (phénomène déjà mentionné ci-dessus). Sont en cause, la baisse de la CEC, liée à la chute du taux de MO, et la désaturation du complexe absorbant. Il s'en suit de nouveaux défrichements, tandis que la zone abandonnée est soumise au pâturage, au feu et au prélèvement de bois, facteurs peu ou pas contrôlés ralentissant la régénération de la végétation et la remontée biologique. Dans ce contexte de pression sur les ressources naturelles, DONFACK (1993) mentionne une durée de

plus de 15 ans, en zone soudano-sahélienne, sur le même type de sol, pour la constitution d'un peuplement ligneux plus ou moins stable.

Compte tenu des contraintes évoquées précédemment, la jachère arborée améliorée, à forte production de biomasse, visant à accélérer la remontée biologique des éléments minéraux et à reconstituer le stock organique du sol, tout en fournissant une production propre (bois, gomme, fourrage...) au bénéfice du paysan, apparaît être une alternative à la jachère naturelle longue. Cependant, très peu d'études ont été faites sur ce système.

Néanmoins, on peut rappeler les travaux sur les effets des arbres et bouquets d'arbres sur les sols, en savane naturelle d'Afrique, décrits par différents auteurs : BERNHARD-REVERSAT (1982) en zone sahélienne au Sénégal, BELSKY et al. (1989) en savane soudanienne au Kenya, ISICHEI et MUOGHALU (1992) en zone soudanienne au Nigéria, MORDELET et al. (1993) en savane guinéenne de Côte d'Ivoire, CAMPBELL et al. (1994) en zone semi-aride au Zimbabwe. Ces auteurs évoquent les augmentations des teneurs en carbone (C), azote (N), cations et phosphore assimilable du sol sous les houppiers des arbres, constituant des îlots de fertilité dans la savane. Même si on ne peut pas rejeter l'hypothèse d'un certain transfert latéral d'éléments nutritifs opéré par les racines des arbres, de la savane environnante vers leurs houppiers (KESSLER et BREMAN, 1991), la plupart des auteurs minimisent cet effet par rapport à l'action favorable de l'arbre sur le fonctionnement biologique du sol. Les arbres augmentent la phytomasse racinaire, visitée par la macrofaune du sol, en particulier les termites, et ces deux facteurs favorisent la minéralisation de la MO du sol (ABBADIE et LEPAGE, 1989). Le micro-climat induit par le couvert ligneux encourage l'activité de la macrofaune, ce qui entraîne une augmentation de la porosité du sol. Les conditions microclimatiques liées à l'ombrage et l'aération du sol stimulent l'activité microbienne et donc les processus de minéralisation rendant le système plus productif. Les restitutions organiques, plus importantes sous les arbres, entraînent progressivement une plus forte accumulation de C et N dans le sol et une meilleure fixation des cations. Ces processus sont encore amplifiés sous les espèces légumineuses fixatrices d'azote en rapport avec la meilleure qualité de la MO (C/N plus faible). Cependant, ces études ne prennent pas en compte le facteur temps nécessaire au développement de ces processus sous les arbres.

En plus des travaux sur les jachères forestières mentionnés plus haut, on peut citer ceux d'AWETO (1981, 1985) et de JAIEYEOBA (1988), en zone forestière au NIGERIA, présentant les effets bénéfiques progressifs de la jachère naturelle sur le statut organo-minéral du sol.

En revanche, relativement peu de travaux sont décrits sur les effets de jeunes jachères arborées améliorées de type plantation forestière. On peut citer, en zone forestière, au Centre Côte d'Ivoire, l'étude des modifications de fertilité induites en cinq ans par quatre légumineuses (OLIVER et GANRY, 1994 ; PELTIER et al., 1996) et au Sud-Ouest du Nigéria l'effet d'une jachère à *Gliricidia sepium* de 8 ans sur le statut organo-minéral du sol (ADEJUWON et ADESINA, 1990). Au Congo, BERNHARD-REVERSAT (1991, 1993 et 1996 a) décrit les effets du reboisement des savanes à l'aide d'*Eucalyptus* et d'*Acacia* australiens. En zone soudanienne, au Centre Togo, DRECHSEL et al. (1991) présentent les modifications des caractéristiques du sol induites en cinq ans de plantation par quatre essences ligneuses. En zone sahélienne au Soudan, HUSSEIN (1990) décrit l'action très favorable de la jachère à *Acacia senegal*, sur la MO du sol, après 12 à 15 ans de mise en place. En zone semi-aride d'Inde, GILL et al. (1987), TOKY et SINGH (1993) comparent les effets de jeunes plantations de légumineuses et d'*Eucalyptus* spp. sur le cycle des éléments minéraux et les caractéristiques du sol. Aux Philippines, OHTA (1990) décrit les effets dépressifs de jeunes plantations d'*Acacia auriculiformis* et de *Pinus kesyia* sur les propriétés chimiques du sol.

En fait, les études évoquées précédemment n'apportent souvent que des réponses partielles aux questions suivantes posées par le fonctionnement de la jachère arborée améliorée. L'introduction d'arbres à croissance rapide dans la jachère peut-elle accélérer les processus de restauration de la fertilité des sols et comment ? Quelles sont les aptitudes des différentes espèces d'arbres à régénérer les sols ? La simple protection de la terre contre le feu et le pâturage n'est-elle pas une composante aussi efficace que la plantation d'arbres (KESSLER et WIERSUM, 1995) ? L'exploitation de la jachère pour le bois ne peut-elle pas limiter la restauration de la fertilité ? Quelles sont les possibilités d'insertion de la jachère arborée dans les pratiques paysannes ? Cette dernière question sera tout juste abordée dans cette étude.

En conséquence, il a été décidé dans le cadre du Projet de recherche Garoua (IRA/IRZV/CIRAD) d'installer deux dispositifs expérimentaux d'étude de la jachère arborée dans la région de Garoua. L'itinéraire technique choisi a consisté à planter des arbres à croissance initiale rapide dans les cultures, deux ans avant d'arrêter celles-ci, puis ensuite de protéger la jachère contre le feu. Ainsi, les herbacées de la jachère n'étouffent pas les jeunes arbres qui ont déjà deux ans, et qui, en se développant, deviennent moins vulnérables au feu. Cette technique avait été expérimentée auparavant avec succès par l'Institut de la Recherche Agronomique, Centre

de Maroua (PELTIER et EYOG MATIG, 1988).

En s'appuyant sur ces dispositifs, l'objectif du présent travail est de caractériser et de comparer le fonctionnement biogéochimique de jachères très différentes par la nature de leur végétation : une plantation d'*Acacia polyacantha,* une plantation de *Cassia siamea,* une plantation d'*Eucalyptus camaldulensis,* une jachère naturelle protégée contre le feu et le pâturage et une jachère naturelle pâturée et parfois brûlée.

De cette analyse comparative, nous déduirons l'effet de l'introduction d'espèces à croissance rapide sur la dynamique du carbone et des éléments minéraux dans la jachère, ceci afin de mieux comprendre les aptitudes des différentes espèces à améliorer les caractéristiques physiques, organiques, minérales et biologiques du sol.

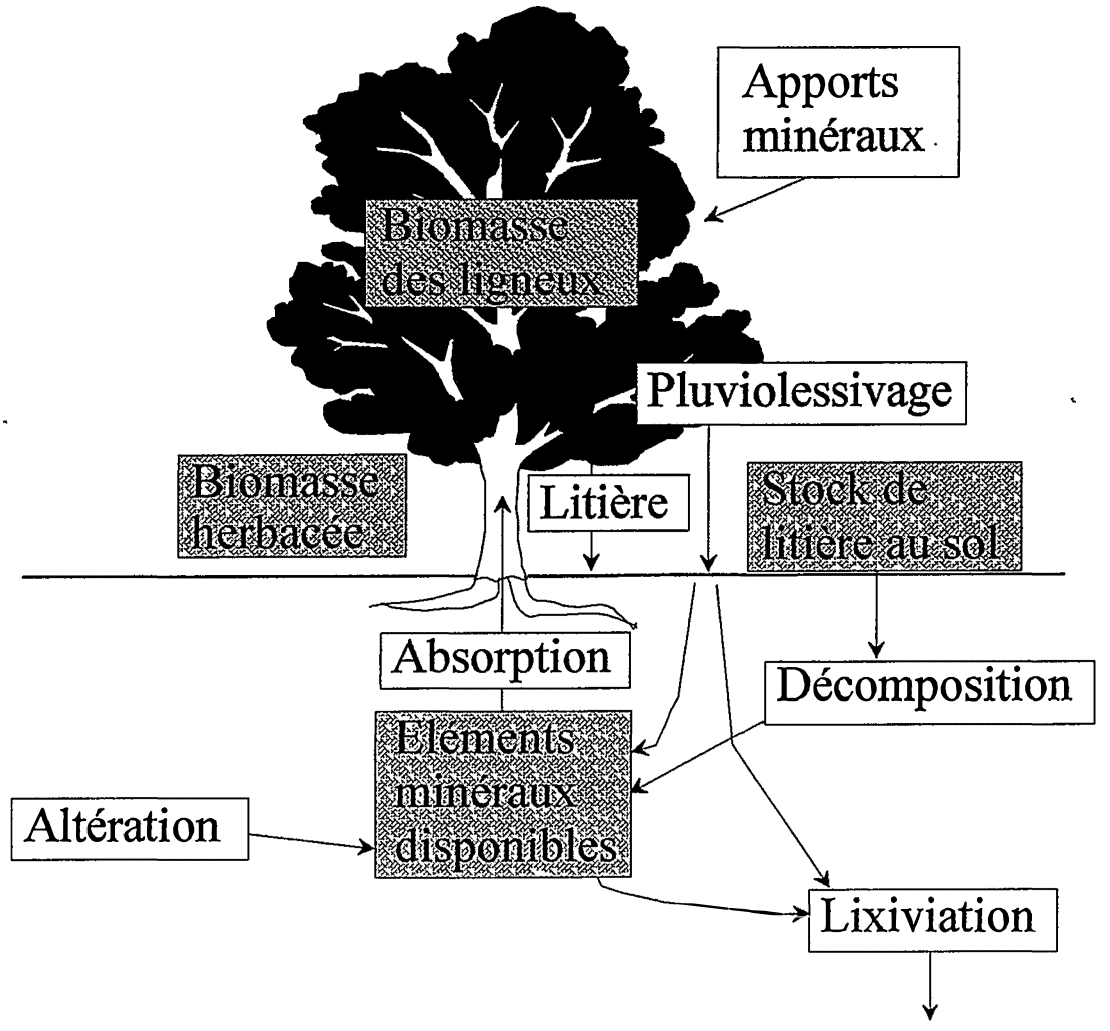


Figure 2 : Schéma simplifié de la dynamique de la MO et du cycle des éléments minéraux dans l'écosystème.

L'étude de la dynamique de la matière organique et des cycles des éléments minéraux repose sur une approche écosystémique à l'échelle de la parcelle. Cette approche utilise un modèle quantitatif qui consiste à stratifier l'écosystème en compartiments (végétation et sol) connectés entre eux par des flux (figure 2). Le cycle plante-sol appelé "cycle biologique" possède de nombreuses connexions avec l'extérieur, soit sous forme d'apports d'éléments par l'atmosphère ou par l'altération de la roche mère, soit sous forme de pertes, c'est pourquoi on parle de cycle biogéochimique. Dans le cas des jachères en zone de savane, il est possible de distinguer deux parties dans l'écosystème : un ensemble strate ligneuse-sol et un ensemble strate herbacée-sol et de les étudier séparément. Un bon nombre de compartiments et de flux sont accessibles à la mesure directe. Les flux non mesurables comme le prélèvement par les arbres ou la décomposition des litières peuvent être calculés à partir de ce modèle par la méthode des bilans de masse. Néanmoins, dans le cadre de cette étude, il n'a pas été possible de quantifier les sorties de l'écosystème, dues à la lixiviation, dans la mesure où les flux de solutions circulant dans le sol n'ont pas pu être évalués correctement.

Le plan général de ce travail sera le suivant :

- la première partie précisera le cadre de l'étude (1), les dispositifs expérimentaux et les méthodes utilisés (2) ;
- la deuxième partie fera état de l'évolution des caractéristiques physiques, organiques, minérales et biologiques des sols en fonction du mode de gestion du sol et du type de végétation en place ;
- dans la troisième partie, nous décrirons les phases des cycles biogéochimiques des peuplements de jachère en caractérisant et en comparant les différents compartiments des systèmes sol-plante et les flux entre ces compartiments ;
- dans la quatrième partie, nous établirons les cycles et les bilans écosystémiques du carbone et des éléments majeurs permettant de caractériser les types de jachère et de préciser les effets sur les sols.

PREMIERE PARTIE

CADRE DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE

CHAPITRE I

CADRE DE L'ETUDE : DESCRIPTION DES STATIONS

CADRE DE L'ETUDE : DESCRIPTION DES STATIONS

1. LA SITUATION GEOGRAPHIQUE

La région Nord-Cameroun s'étend du 7e au 13e degré de latitude nord (figure 1). L'étude a été menée dans le Bassin de la Bénoué. Les deux sites expérimentaux se trouvent à Ngong et Mayo Dadi, villages situés respectivement à 40 km et 25 km au sud de Garoua, à la latitude 9°. L'altitude des sites est environ de 300 m et la pente, faible, est de l'ordre de 2%.

2. LE CLIMAT

La région de Garoua est marquée par un climat de type soudanien franc, sous-type déficitaire (SUCHEL, 1972). Ce climat est caractérisé par deux saisons fortement contrastées : une saison sèche et une saison humide (figure 3). La saison sèche correspond au flux continental sec et chaud provoqué par l'alizé de Nord-Est (harmattan). Elle s'étale sur 6 à 7 mois de mi-octobre à avril (un mois sec correspondant à P < 2 T). La saison humide dure 5 à 6 mois entre mai et octobre et correspond au flux marin provoqué par l'alizé du Sud-Ouest (mousson).

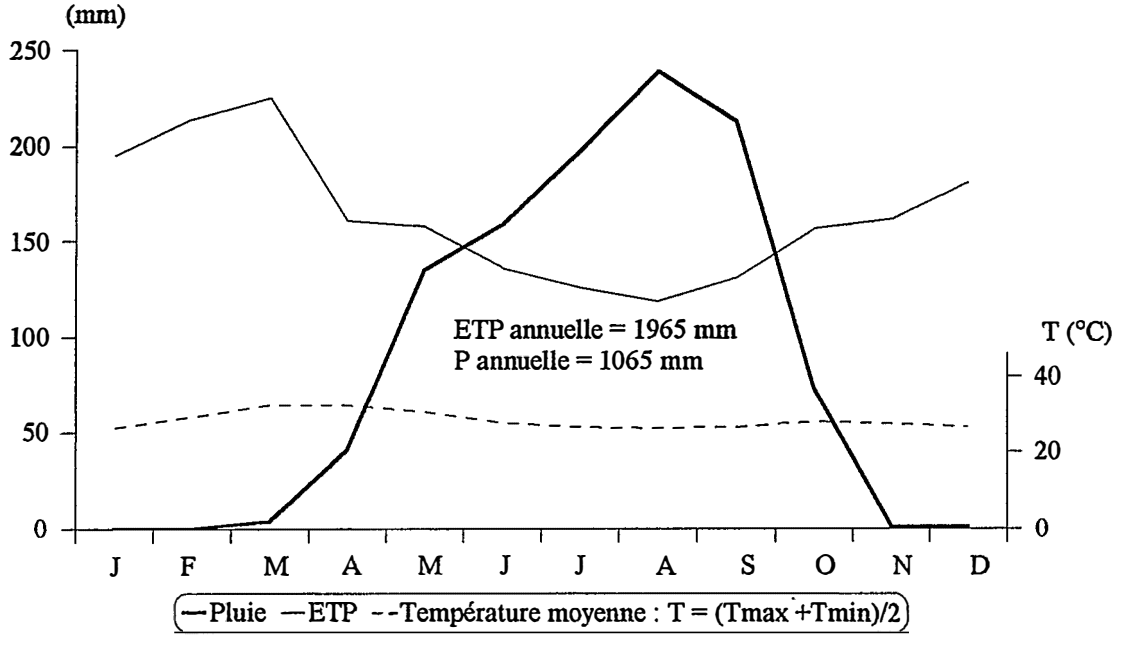
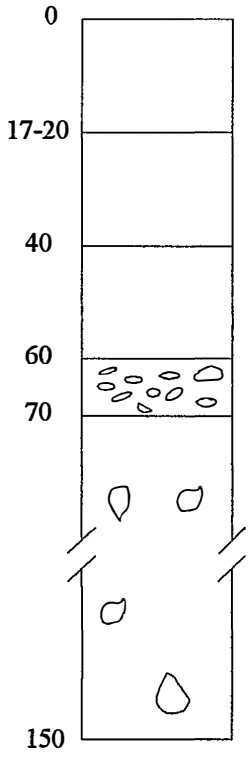


Figure 3 : Diagramme ombrothermique de Garoua (d'après les données de SUCHEL, 1972).

Profil pédologique de Ngong



Horizon Ap : couleur : brun sombre ; texture : sableuse, légèrement limoneuse ; structure : polyédrique sub-angulaire fine à moyenne ; densité : bonne porosité ; éléments grossiers : racines fines ; limite inférieure : bien nette (compaction).

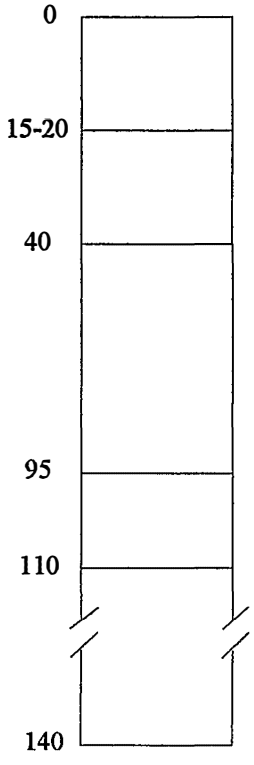
Horizon A2 : couleur : brun foncé ; texture : sableuse, légèrement argileuse ; structure : polyédrique sub-angulaire moyenne ; densité : porosité moyenne ; éléments grossiers : racines moyennes ; limite inférieure : diffuse.

Horizon B1 : couleur : rouge jaunâtre ; texture : argileuse, légèrement sableuse ; structure : massive ; densité : porosité moyenne ; éléments grossiers : quelques racines moyennes ; limite inférieure : ondulée.

Horizon caillouteux.

Horizon B2 : couleur : rouge ; texture : argilo-sableuse ; structure : massive ; densité : porosité moyenne ; éléments grossiers : abondants blocs de roche altérée.

Profil pédologique de Mayo Dadi (sol ferrugineux rouge du bloc 3)



Horizon Ap : couleur : brun pâle ; texture : sableuse, légèrement limoneuse ; structure : polyédrique sub-angulaire moyenne ; densité : bonne porosité ; éléments grossiers : racines fines ; limite inférieure : bien nette (compaction).

Horizon A2 : couleur : jaune rouge ; texture : sableuse, légèrement argileuse ; structure : polyédrique sub-angulaire moyenne et grossière ; densité : porosité moyenne ; éléments grossiers : racines moyennes ; limite inférieure : diffuse.

Horizon B1 : couleur : rouge jaunâtre ; texture : argilo-sableuse ; structure : massive ; densité : porosité faible ; éléments grossiers : quelques racines moyennes et fines ; limite inférieure : nette.

Horizon B2 : couleur : rouge jaune (abondantes taches rouges) ; texture : argilo-sableuse ; structure : massive ; densité : porosité faible ; éléments grossiers : racines fines et moyennes.

Horizon B3 : couleur : rouge jaune (abondantes taches rouges) ; texture : sablo-argileuse ; structure : polyédrique sub-angulaire moyenne ; densité : porosité faible ; éléments grossiers : racines fines et moyennes.

Figure 4 : Profils pédologiques des sites d'étude.

La pluviosité moyenne annuelle, calculée sur les 44 dernières années, s'élève à 1012 mm. Elle est distribuée sur 80 jours, répartis sur 6 mois. La variabilité interannuelle est grande avec des maximums supérieurs à 1300 mm et des minimums inférieurs à 600 mm.

Sur nos stations, on enregistre une variabilité spatiale des précipitations : de 1993 à 1995, la moyenne est de 1122 mm/an à Ngong et de 1003 mm/an à Mayo Dadi avec une différence entre les stations allant de 33 mm à 265 mm selon les années.

Les températures sont très élevées (figure 3), avec deux oscillations annuelles dues l'une au régime des masses d'air (minimum d'août), l'autre au mouvement apparent du soleil (minimum de décembre).

L'insolation, très importante (2960 h/an), est un peu plus élevée en saison sèche (273 h/mois) qu'en saison humide (210 h/mois) en raison de la plus forte nébulosité de la période pluvieuse.

3. LE SOL

Le sol, de type ferrugineux rouge, est formé sur des grès du Crétacé Moyen. Le paysage de la région comprend des hautes buttes à sommet tabulaire et leur piémont colluvial, des terres maigres sur les lignes de crêtes et enfin des collines basses à long versant à faible pente (BRABANT et GAVAUD, 1985). Les sites expérimentaux se trouvent dans cette dernière unité morphopédologique, la plus importante, considérée comme la plus apte à l'agriculture.

Les profils pédologiques des stations, décrits par MAINAM (1993), sont illustrés sur la figure 4. Dans les deux stations, le sol est profond, perméable au moins jusqu'à 260 cm de profondeur. La CEC, utilisée comme indicateur de fertilité chimique du sol, permet de différencier les sols des 2 sites, en situation de culture continue depuis une quinzaine d'années (figure 5). Jusqu'à 50 cm de profondeur, il n'y a pas de différence de texture et de fertilité chimique entre les deux sites, et la CEC ne varie pas avec la profondeur. Entre 50 cm et 90 cm de profondeur, la teneur en éléments fins et la CEC augmentent plus fortement à Ngong qu'à Mayo Dadi. En dessous de 90 cm de profondeur, la teneur en éléments fins et la CEC augmentent significativement à Mayo Dadi, mais restent inférieures aux valeurs de Ngong.

Pour conclure, les horizons de surface du sol des deux sites sont chimiquement pauvres en rapport avec la texture sableuse et un faible taux de MO (teneur en carbone inférieure à 3‰) ; en dessous de 50 cm de profondeur, il existe un gradient positif de fertilité minérale lié à un

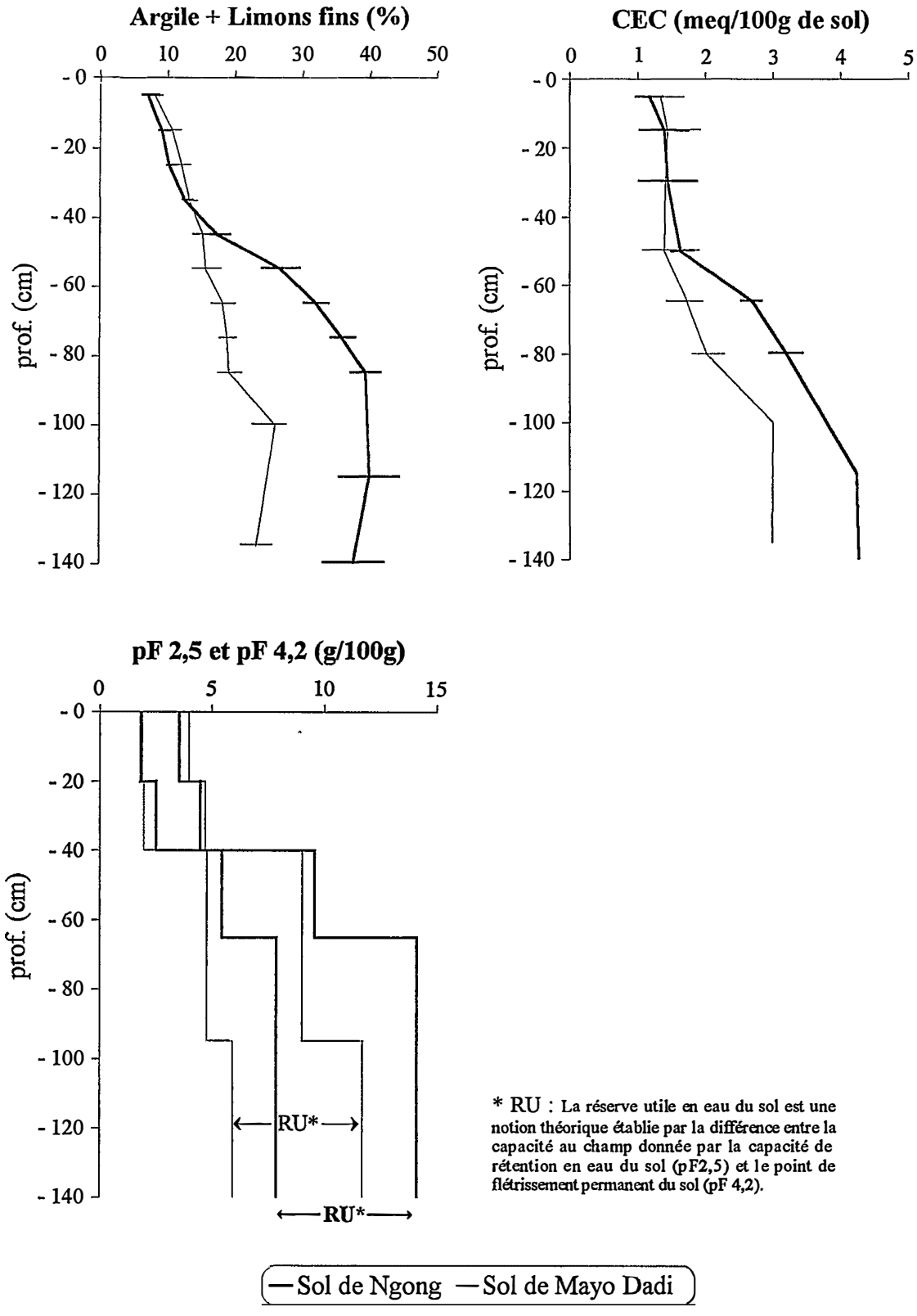


Figure 5 : Quelques caractéristiques analytiques des profils des sols de Ngong et Mayo Dadi en situation de culture continue (1994). Les intervalles de confiance sont calculés au seuil d'erreur de 5%.

gradient textural qui débute plus tôt à Ngong qu'à Mayo Dadi et de façon plus marquée. On peut en déduire, pour le site de Ngong, une meilleure capacité de rétention en eau (figure 5) et une plus grande réserve en éléments nutritifs du sol pouvant induire un meilleur développement de la végétation.

4. LE PASSE CULTURAL DES SITES D'ETUDE

Une enquête sommaire réalisée auprès des exploitants agricoles et de la SODECOTON (Société de Développement du Coton) a permis de connaître assez précisément le passé cultural des parcelles. A Ngong, la mise en culture du site a eu lieu en 1977-78, après défrichement de la savane arborée. Le système de culture cotonnier - arachide, en rotation biennale, avec fertilisation de base N-P-K sur le cotonnier, a été pratiqué par le paysan pendant une dizaine d'année. En 1988, le paysan a remis la parcelle à l'Institut de la Recherche Agronomique en invoquant une mauvaise réponse du cotonnier à la fertilisation minérale.

Le village de Mayo Dadi est de création assez récente : les nouveaux arrivants se sont installés en 1972-73 dans une clairière où subsistaient quelques ruines d'habitation. Le site d'étude a été défriché et mis en culture en 1974-75. Le système de culture cotonnier-céréale (maïs ou sorgho), en rotation biennale, avec fertilisation de base sur le cotonnier, a été pratiqué pendant 12 à 15 ans. Le travail du sol, effectué au départ manuellement, puis en traction attelée, a été réalisé, à partir de 1980 à l'aide de petits tracteurs équipés de charrues à socs ou de "tillers" à dents. Sur ce site, les paysans estiment que des signes importants de “fatigue des sols” sont apparus vers 1983-84, moins de 10 années après la mise en culture.

5. LA VEGETATION DES JACHERES

Ces terres portent naturellement une savane arborée à *Burkea africana, Daniellia oliveri, Terminalia spp., Combretum spp., Butyrospermum parkii* avec une strate herbacée à *Hyparhenia* (LETOUZEY, 1968 ; BRABANT et GAVAUD, 1985). La mise en culture de ces terres et leur pâturage intensif après abandon de la culture conduisent à des facies "dégradés" de jachère avec une strate ligneuse à *Combretum collinum, Combretum glutinosum, Annona senegalensis* et une strate herbacée à *Spermacoce stachydea, Schizachirium exile, Andropogon pseudapricus.*

Les espèces ligneuses à croissance rapide que nous avons installées dans la jachère sont bien adaptées au milieu. *Acacia polyacantha,* espèce locale fixatrice d’azote, a la particularité de

produire une gomme arabique "dure" pouvant faire l'objet d'une exploitation commerciale. *Cassia siamea* et *Eucalyptus camaldulensis*, sont des espèces exotiques sempervirentes et acclimatées. Dans la région de Garoua, elles sont fréquemment plantées par les paysans pour produire du bois de service. La figure 6 indique que les espèces *A. polyacantha* et *C. siamea* croissent mieux à Ngong qu'à Mayo Dadi en rapport avec la meilleure fertilité du site de Ngong décrite au paragraphe 3 de ce chapitre. *C. siamea* montre une forte baisse de croissance à partir de la 3ème année, alors que les autres espèces poursuivent leur développement au delà de cette date.

Dans la suite de l'énoncé, les trois espèces *A. polyacantha, C. siamea* et *E. camaldulensis*, seront le plus souvent nommées par leur nom de genre pour ne pas alourdir le texte.

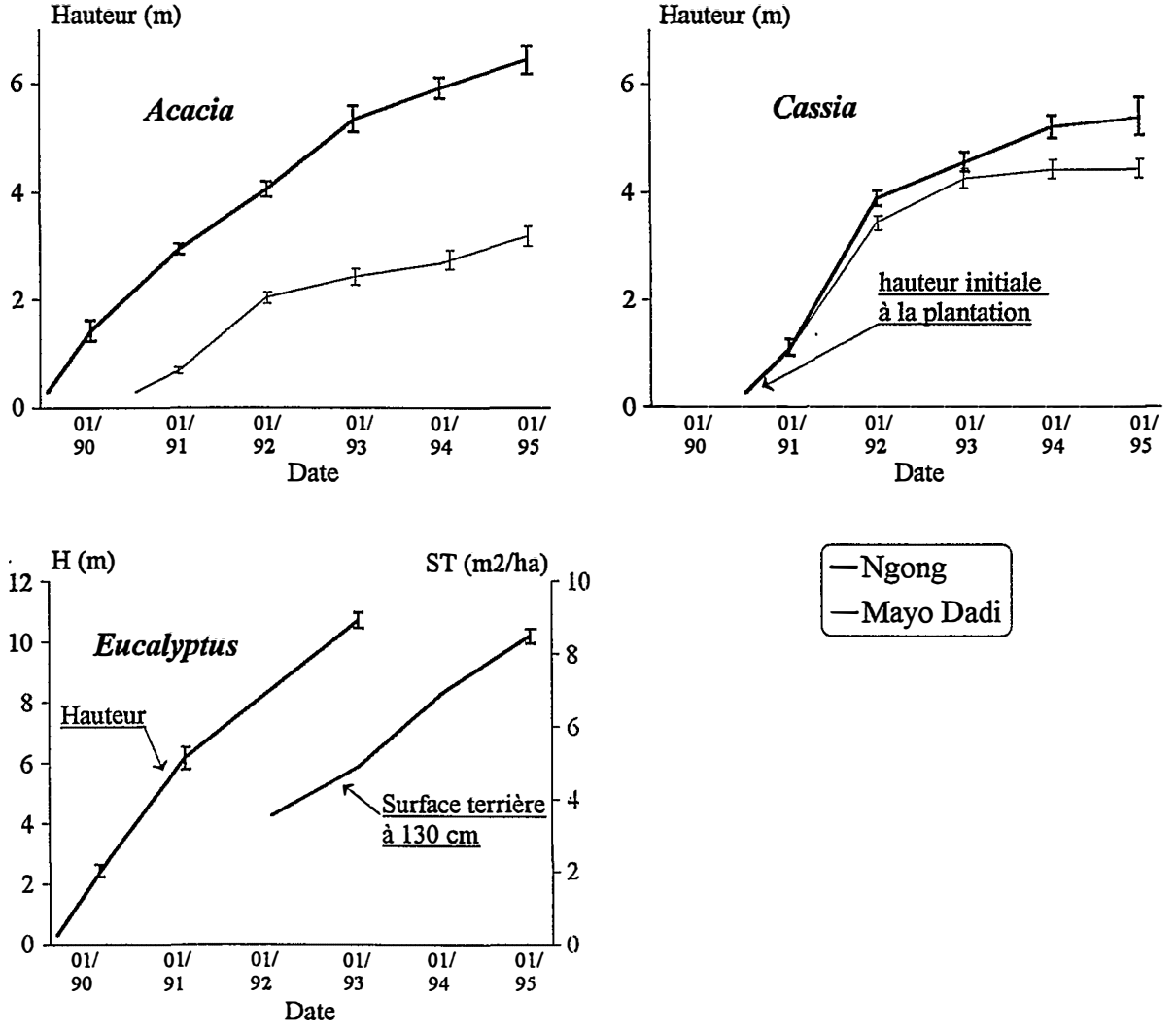


Figure 6 : Croissance des espèces ligneuses des jachères. Les intervalles de confiance sont calculés au seuil d'erreur de 5%.

CHAPITRE II

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODOLOGIES

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODOLOGIES ANALYTIQUES

1. LES DIFFERENTS TRAITEMENTS DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

La présente étude s'appuie sur deux dispositifs expérimentaux mis en place à Ngong et Mayo Dadi respectivement en 1989 et 1990.

11. L'essai de Ngong (voir figure 7)

Les traitements étudiés sont les suivants :

- culture continue (arachide, coton, maïs, coton, maïs,...) : CULT ;
- jachère herbacée spontanée protégée contre le feu et le pâturage (restaurée) : JHP ;
- jachère plantée avec *Eucalyptus camaldulensis* : EUC ;
- jachère plantée avec *Acacia polyacantha* : ACP ;
- jachère plantée avec *Cassia siamea* : CAS (hors dispositif) [1] ;
- jachère herbacée spontanée pâturée et brûlée (dégradée) : JHD (hors dispositif) [1].

Sur le dispositif, les arbres ont été plantés en 1989 ; les parcelles ont été cultivées en arachide en 1989 puis en coton en 1990 et ont reçu les doses d'engrais préconisées par la Sodécoton ; la mise en jachère a eu lieu en 1991.

Dans la parcelle CAS située hors du dispositif, la plantation des arbres et la mise en jachère ont eu lieu respectivement en 1990 et 1992.

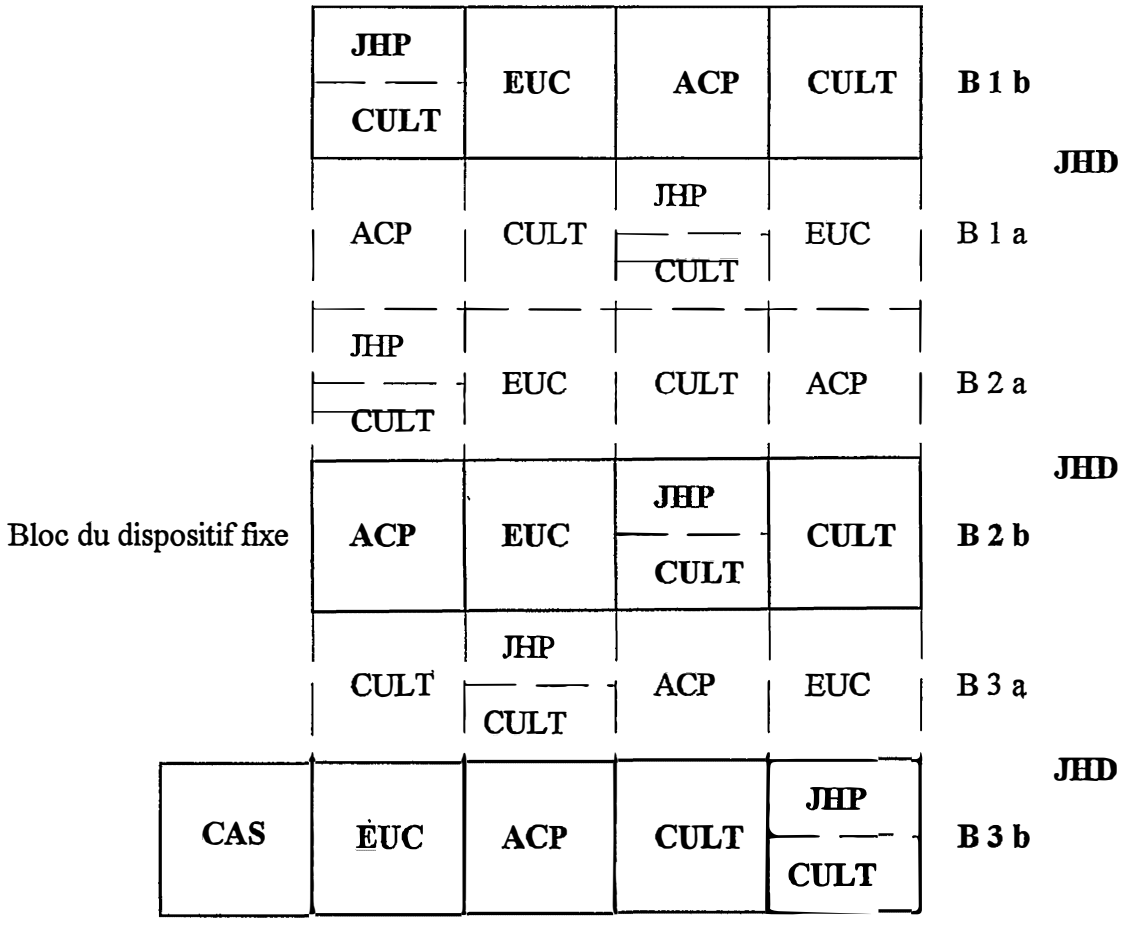
Les dimensions des parcelles unitaires sont de 28 m x 28 m et celles des parcelles utiles (hors bordures) de 20 m x 20 m. Les plantations d'arbres ont été effectuées à écartement de 4 m x 4 m, soit une densité de 625 pieds/ha, ce qui représente 49 arbres par parcelle.

Le dispositif est un split-plot à 2 niveaux et 3 répétitions :

Le premier facteur est la durée de jachère présentant deux niveaux :

---

[1] Les explications sur cette situation sont données au paragraphe 13 de ce chapitre.



Dispositif : split-plot

1er niveau : Durée de la jachère

- **a** : durée de 2 ans (1991-1993)
- **b** : durée de 5 ans (1991-1996)

2e niveau : Type de jachère

- **CULT** : culture continue (arachide, coton, maïs, coton, maïs,...)
- **JHP** : jachère herbacée spontanée protégée contre le feu et le pâturage
- **EUC** : jachère plantée avec *Eucalyptus camaldulensis*
- **ACP** : jachère plantée avec *Acacia polyacantha*

Hors dispositif :

- **CAS** : jachère plantée avec *Cassia siamea*
- **JHD** : jachère herbacée spontanée dégradée (pâturée et parfois brûlée)

Figure 7 : Essai de NGONG.

- a : durée de jachère de 2 ans, de 1991 à 1993, puis remise en culture ;
- b : durée de jachère de 5 ans, de 1991 à 1996, puis remise en culture.

Le deuxième facteur est le type de jachère énoncé ci-dessus.

12. L'essai de Mayo Dadi (voir figure 8)

L'essai a été installé en 1990.

Les traitements étudiés sont les suivants :

- culture continue (arachide, coton, maïs, coton,...) : CULT ;
- jachère plantée avec *Cassia siamea* : CAS ;
- jachère plantée avec *Acacia polyacantha ssp.campylacantha* : ACP ;
- jachère herbacée spontanée protégée contre le feu et le pâturage : JHP (hors dispositif) [1].

Sur le dispositif, les arbres ont été plantés en 1990 ; les parcelles ont été cultivées en arachide en 1990 puis en coton en 1991 et ont reçu les doses d'engrais préconisées par la Sodécoton ; la mise en jachère a eu lieu en 1992. Dans la parcelle JHP située hors du dispositif, la mise en jachère a eu lieu en 1990.

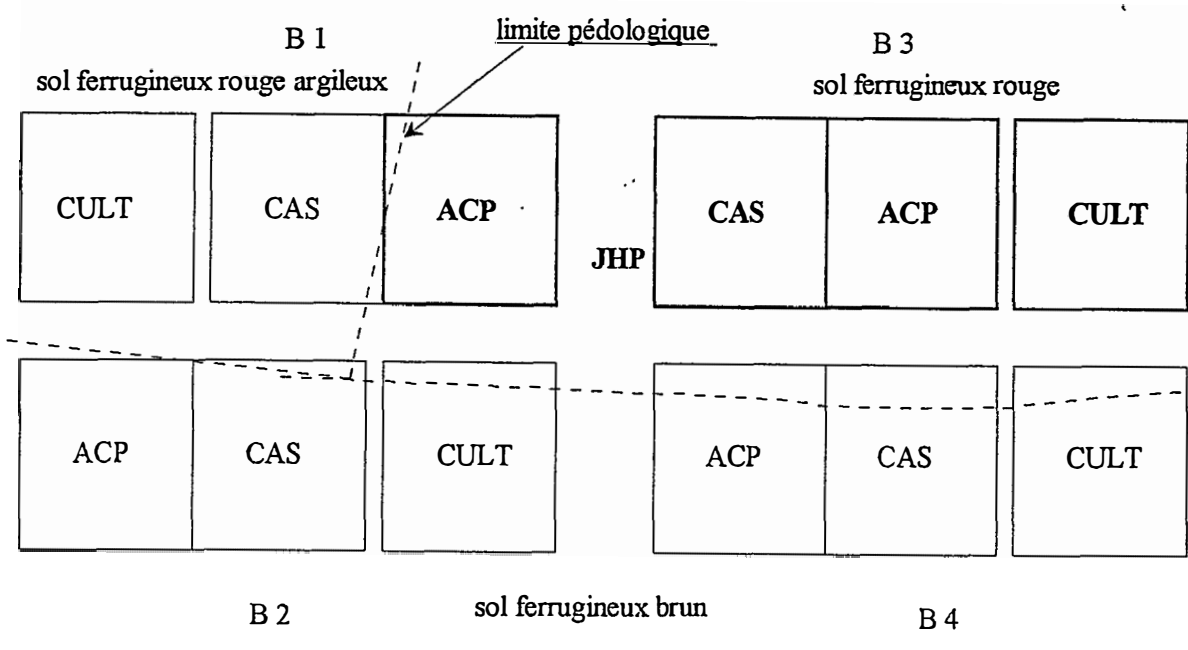


Figure 8 : Dispositif de MAYO DADI.

Les parcelles unitaires ont des dimensions de 40 m x 40 m et la taille des parcelles utiles est de 32 m x 32 m. Les plantations d'arbres ont été effectuées à écartement de 4 m x 4 m, soit une densité de 625 pieds/ha ce qui représente 100 arbres par parcelle. Le dispositif est en blocs complets à quatre répétitions. Cependant, pour des raisons d'homogénéité de sol, l'étude a porté sur les parcelles, au contour foncé dans la figure 8, correspondant approximativement au bloc 3 et au sol ferrugineux rouge décrit sur les figures 4 et 5.

13. Remarques à propos des différents traitements du protocole expérimental

Les parcelles en culture continue permettent d'évaluer l'effet agronomique de la jachère. Les jachères herbacées spontanées permettent, dans le cas d'un éventuel effet de la jachère ligneuse, de distinguer la part due à l'arrêt des cultures de la part due spécifiquement aux arbres.

Pour compléter les dispositifs initiaux créés en 1989 et 1990, des situations supplémentaires de référence ont été recherchées et les choix suivants ont été effectués :

- à Mayo Dadi, une surface laissée libre entre les blocs, au centre de l'essai, où se reconstitue depuis 1991 **une jachère herbacée protégée contre le feu,** a été mise à profit comme témoin (figure 8) ;
- à Ngong, **une plantation de *Cassia*,** installée en 1990 sur une zone contiguë au bloc 3b et ayant le même passé cultural, a pu servir de référence supplémentaire de comparaison entre les deux sites et entre les traitements à Ngong (figure 7) ;
- toujours à Ngong, **une jachère pâturée et brûlée**, située le long du dispositif, en milieu paysan, a été utilisée pour apprécier le rôle du surpâturage et du feu courant dans le développement de la jachère et son effet sur le sol ;
- une parcelle de **savane naturelle boisée** de structure végétale proche du milieu naturel d'origine a été introduite comme situation supplémentaire d'étude de la macrofaune du sol à Ngong.

En conclusion les traitements étudiés sont les suivants :

	Abréviation	Stations	
- culture continue	CULT	NG	MD
- jachère herbacée spontanée protégée	JHP	NG	MD
- jachère herbacée pâturée et brûlée	JHD	NG	

- savane naturelle boisée	SAV	NG	
- peuplement d'*Acacia*	ACP	NG	MD [2]
- peuplement d'*Eucalyptus*	EUC	NG	
- peuplement de *Cassia*	CAS	NG [2]	MD

Les situations savane naturelle et jachères herbacées diffèrent sensiblement les unes des autres et leurs caractéristiques figurent sur le tableau 1. La jachère herbacée à Mayo Dadi (JHP md) est une situation intermédiaire entre les traitements JHD et JHP à Ngong, dans la mesure où il y a eu pâturage au cours des dernières années.

Tableau 1 : Caractéristiques des situations savane naturelle et jachères herbacées.

Traitement	SAV	JHP ng	JHP md	JHD ng
Définition	Savane naturelle boisée	Jachère herbacée restaurée	Jachère herbacée restaurée	Jachère herbacée dégradée
Lieu	Ngong	Ngong	Mayo Dadi	Ngong
Mode d'exploitation	Pâturage, feu et prélèvements de bois	Protection contre le feu et le pâturage	Protection contre le feu, Pâturage en 90, 92 et début 94	Surpâturage et feu
Age de la jachère en 1994	longue durée	3 ans	4 ans	6 - 8 ans
Végétation dominante	couvert arboré assez dense et graminées pérennes	Graminées pérennes et annuelles	Graminées pérennes et annuelles	Dicotylédones et graminées annuellees

14. Remarques à propos du protocole d'étude du cycle biogéochimique par traitement

Pour réduire les effets de bordure, une tranchée de 1m de profondeur a été creusée en plusieurs temps autour de la parcelle de *Cassia* à Ngong. Ailleurs, deux passages annuels de sous-soleuse à 80 cm de profondeur, en début et en fin de saison des pluies, ont permis de limiter le développement racinaire latéral.

Concernant les mesures des compartiments et des flux de MO et de bioéléments, deux

[2] Ces parcelles supportent un dispositif partiel comprenant des collecteurs de litière, des relevés floristiques, des mesures de biomasse herbacée et des prélèvements de sol.

problèmes se sont posés : la relative exiguïté des parcelles et l'hétérogénéité liée aux arbres.

Le problème de l'exiguïté des parcelles à Ngong, a été minimisé en utilisant l'ensemble des répétitions, dont une pour le dispositif fixe (collecteurs d'eaux et de litières) et l'ensemble des parcelles pour les prélèvements répétitifs plus ou moins destructeurs (biomasse herbacée, litière au sol, biomasse racinaire). Ont été pris comme critères de choix des parcelles pour le dispositif fixe, un développement des arbres et de la strate herbacée proche de la moyenne et le moins possible d'hétérogénéité au sein des parcelles. Pour chaque peuplement choisi, dit de "référence", un histogramme des hauteurs ou des circonférences des arbres a été établi et quatre classes de dimensions ont été définies.

L'hétérogénéité liée aux arbres lorsqu'elle a été constatée, a été minimisée par la forme ou la répartition des collecteurs : soit ils correspondent à une fraction représentative de la maille créée par quatre arbres, soit ils sont disposés en fonction de cette représentativité. Le choix des arbres échantillonnés tient également compte de la fréquence des classes de dimensions du peuplement "de référence".

2. ECHANTILLONNAGE ET METHODES D'ANALYSES DES SOLS

21. Les prélèvements de sols

Avant la mise en place des jachères, l'estimation des teneurs des sols en différents éléments a été faite (juin 1989 à Ngong et juin 1990 à Mayo Dadi) sur des échantillons composites de quatre prélèvements par parcelle et aux profondeurs 0-20 cm et 20-40 cm.

Différents auteurs (BERNHARD-REVERSAT, 1991 ; KESSLER et BREMAN, 1991) ont montré que les processus d'humification-décomposition ont lieu préférentiellement dans les horizons supérieurs du sol avec l'incorporation de la litière et le renouvellement racinaire. Ainsi, dans le cas de la mise en place d'une végétation pérenne sur un sol nu, les changements attendus du statut organique du sol et des caractéristiques qui y sont liées sont plutôt en surface avec probablement un gradient vers la profondeur. Par conséquent, il a semblé judicieux de découper le profil pédologique selon les horizons décrits par MAINAM (1993) mais en subdivisant l'horizon de surface. Les horizons analysés sont alors : 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-70 cm, 70-90 cm et un prélèvement de l'horizon 0-5 cm complète l'analyse.

En 1995, à Ngong, des prélèvements ont eu lieu dans tout le dispositif, à raison de 6

échantillons par traitement jusqu'à 60 cm de profondeur, soit 2 échantillons composites de 8 prélèvements par parcelle. En deçà de 60 cm, un échantillon par parcelle a été réalisé. A Mayo Dadi, 6 échantillons ont été réalisés dans chaque parcelle de la zone étudiée. Le sol a été séché à l'air puis tamisé à 2 mm avant d'être envoyé pour analyse. Cela revient à éliminer les fragments végétaux assez gros pour être considérés comme litière ou racines et les graviers de taille supérieure à 2 mm dont on détermine la proportion.

La densité apparente a été déterminée en 1995, pour chaque horizon, avec la technique du cylindre. 6 répétitions ont été faites dans 2 fosses pédologiques sur chaque parcelle et chaque horizon.

22. Les principales méthodes analytiques utilisées pour les sols

Les analyses de terre fine (taille des particules < 2 mm) ont été réalisées au laboratoire du CIRAD-GERDAT à Montpellier, selon les méthodes énoncées ci-dessous.

- Granulométrie :

Elle est mesurée par un granulomètre automatique GRANULOSTAT selon le principe de la méthode internationale (norme AFNOR 31-107).

- Le pH (eau, KCl *N*) :

Il est mesuré sur chaîne automatique de pH après calibration à l'aide d'étalons certifiés. Le rapport sol/solution est de 1 / 2,5.

- Matière organique totale et azote total :

Le carbone total est déterminé sur analyseur automatique LECO CHN 600, et l'azote total sur analyseur LECO PF 408.

- Phosphore assimilable :

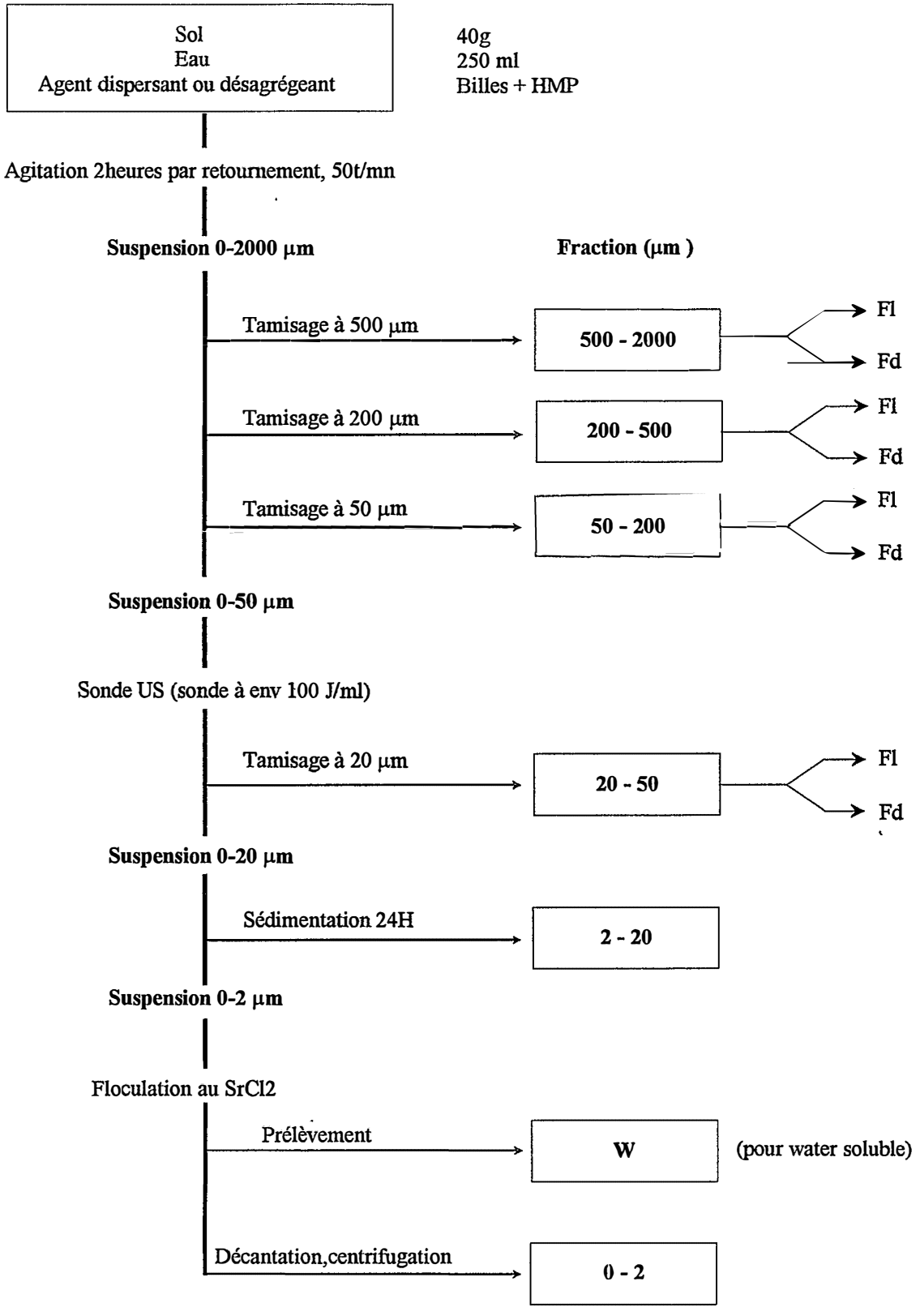


Figure 9 : Schéma général du fractionnement granulométrique de la MO du sol (d'après FELLER, 1995)

Il est déterminé par la méthode OLSEN modifiée DABIN (1967) : on pratique l'extraction par une solution de bicarbonate de sodium 0,5*N* et de fluore d'ammonium 0,5*N* à pH 8,5 dans un rapport 1/50. Le phosphore est dosé ensuite par colorimétrie automatique au bleu de molybdène.

- Caractérisation du complexe d'échange :

Pour cette analyse, on pratique l'extraction au chlorure de cobaltihexammine $(CoNH_3)_6Cl_3$. L'utilisation de ce réactif neutre ne créé pas de charges variables dans les sols acides et permet d'obtenir une bonne estimation de la CEC effective (CEC au pH du sol). Les cations échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, Al^{3+}, Mn^{2+}) sont dosés par spectrophotométrie d'émission à plasma : ICP. La somme des cations "basiques" s'écrit : S (meq/100g) = $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$.
L'acidité d'échange (AE) se compose des espèces acides échangeables dans le sol dont les plus importantes sont les protons (H^+) et l'aluminium (Al^{3+} et famille). Le taux de protons est calculé d'après le pH de la solution après échange.

La CEC est obtenue par dosage par ICP du cobalt restant en solution après échange. Elle correspond normalement à la somme des cations échangeables y compris les bases échangeables et l'acidité d'échange : CEC (meq/100g) = T = $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} + H^+ + Mn^{2+} + Fe^{2+}$.
Le taux de saturation est donné par : S/T.

- Analyses chimiques totales :

Elles ont été effectuées par la méthode de minéralisation par voie humide à l'aide d'un mélange HNO_3/ HF/ $HClO_4$. Après reprise en milieu acide (HCl), P total est dosé par colorimétrie automatique et Ca, K, Mg par ICP.

23. Le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols

Le fractionnement granulométrique, qui consiste à séparer les MO à caractère végétal figuré de celles liées aux colloïdes minéraux et analyser leur contenu, permet de mieux comprendre les processus d'évolution de la MO du sol. La méthode utilisée, dans le cadre de cette étude, est celle recommandée par FELLER (1995) pour les sols sableux à faible stabilité structurale. Cette technique assure, la dispersion des agrégats le mieux possible et avec le minimum d'altération :

- la destruction des agrégats de taille supérieure à 50 µm est obtenue par simple agitation du sol dans l'eau en présence de billes et d'hexamétaphosphate de sodium (HMP), le temps d'agitation est de 2 heures ;
- après tamisage à 50 µm, une dispersion des particules de taille inférieure à 50 µm peut être atteinte par l'application d'ultrasons sur la suspension 0-50 µm.

L'ensemble des opérations de fractionnement est présenté sommairement sur la figure 9. En résumé, on obtient :
- par tamisage, les fractions débris végétaux 500-2000[3], 200-500, 50-200 et 20-50 µm ;
- par sédimentation et centrifugation, la fraction organo-limoneuse 2-20 µm et la fraction organo-argileuse 0-2 µm ;
- par solubilisation, au cours du fractionnement, la fraction W (MO hydrosoluble).

Pour chaque fraction de taille supérieure à 20 µm, on a séparé une fraction légère (Fl) d'une fraction dense (Fd) par agitation, décantation et entraînement par l'eau des MO légères (technique de la "battée" : FELLER, 1979 et BALESDENT et al., 1991). Pour les sols sableux pauvres en MO, l'intérêt de cette séparation densimétrique, est d'améliorer grandement la précision des résultats d'analyse chimique en dosant des substrats concentrés comme les fractions légères.

Toutes les fractions solides sont séchées à 50°C, pesées et broyées. Les résultats pondéraux sont exprimés en pour cent du sol sec à l'air.

3. LE CYCLE EDAPHIQUE DE L'AZOTE

31. Principe et interprétation de l'étude de minéralisation de l'azote *in situ*

L'étude de la minéralisation de l'azote du sol, *in situ*, renseigne sur le fonctionnement biologique du sol, la dynamique de la MO, le cycle de l'azote dans l'écosystème et le niveau de disponibilité en azote pour les plantes. La méthode consiste à replacer dans l'horizon où il a été prélevé un échantillon de sol, dans des conditions telles qu'il n'y ait ni consommation d'azote

---

(3) Pour séparer la litière de feuilles d'*Acacia*, il est nécessaire de faire un tamisage à 500 µm, ce qui n'est pas prévu dans la méthode habituelle.

minéral par les plantes, ni perte de nitrates par lessivage.

A Ngong, la minéralisation de l'azote a été mesurée en 1994 et 1995 sur l'horizon 0-20 cm dans toutes les parcelles du bloc 3b afin de prendre en compte tous les traitements et en particulier la plantation de *Cassia siamea*. On a utilisé des tubes PVC de diamètre 70 mm et de longueur 30 cm, enfoncés de 20 cm dans le sol. Ces tubes sont fermés à la base par un grillage inox de maille 100 µm empêchant le passage des racines, et bouchés à l'extrémité supérieure par un couvercle empêchant la pénétration de la pluie. Quelques trous latéraux, sous le couvercle, permettent la circulation de l'air. On a procédé comme suit (figure 10) :

- au début de chaque période, un échantillon composite issu de huit prélèvements a été débarrassé de ses racines et un sous échantillon a été constitué pour analyse des teneurs en azote total et azote minéral (B_i) ;
- le reste de l'échantillon a été réparti dans six tubes mis en incubation sur le terrain durant une période de 4 semaines ;
- à l'issue de la période d'incubation, le contenu des tubes a été analysé (C_{i+1}) et un nouveau prélèvement a été effectué puis replacé dans les tubes sur le terrain.

L'accumulation d'azote minéral dans les tubes est considérée comme la minéralisation nette (différence entre la minéralisation brute et la réorganisation) : $M = C_{i+1} - B_i$. La sommation des résultats obtenus permet de calculer le taux de minéralisation annuel.

Si on fait les hypothèses d'une lixiviation négligeable de l'azote nitrique, compensée par les apports par la pluie et d'une dénitrification équivalente dans les tubes et dans le sol, le prélèvement par la plante s'écrit alors : $P = C_i - B_i$.

32. Prélèvements et analyses chimiques

En première année (1994), les mesures n'ont commencé qu'au milieu de la saison des pluies et les analyses d'azote minéral $N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3$ ont porté sur des solutions obtenues par extraction au chlorure de potassium (KCl *N*) sur sol séché à l'air. En deuxième année (1995), les mesures ont eu lieu durant toute la saison des pluies et les analyses ont porté sur des solutions obtenues sur le terrain par extraction au chlorure de potassium (KCl *N*) sur terre humide.

Les analyses ont été réalisées au laboratoire du CIRAD-CA à Montpellier selon les méthodes suivantes :

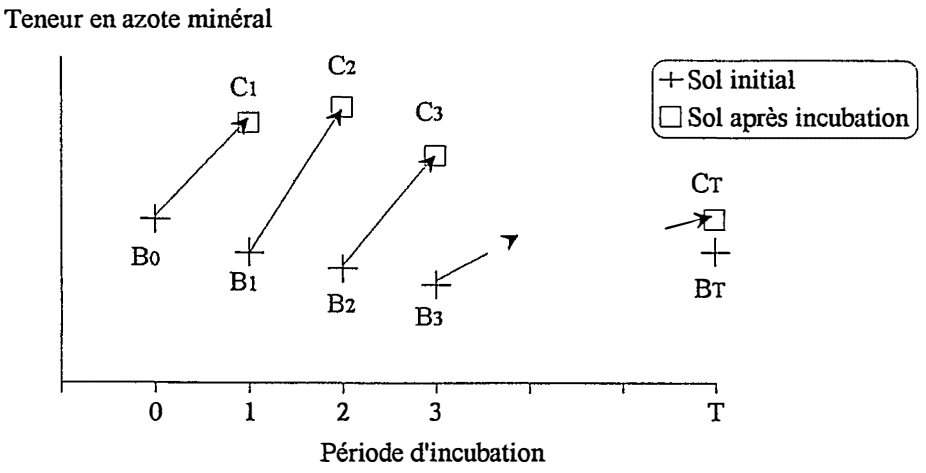


Figure 10 : Schéma des prélèvements successifs effectués pour l'étude de la minéralisation de l'azote *in situ* (d'après ADAMS et ATTIWILL, 1986). Bi est la teneur en azote minéral du sol à l'instant i. Ci est la teneur en azote minéral du sol dans les tubes après une période d'incubation.

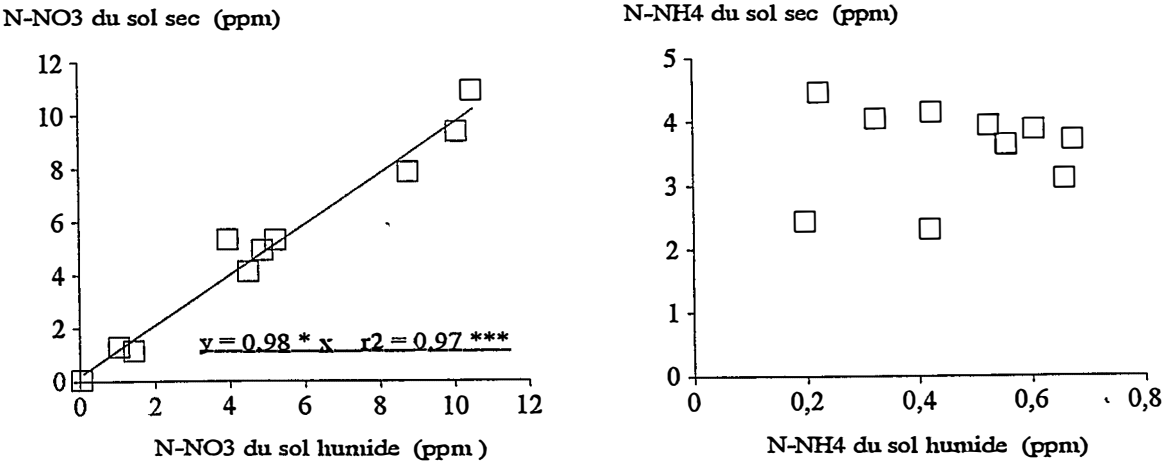


Figure 11 : Comparaison des dosages d'azote minéral (N-NO3 et N-NH4) obtenus d'après extraits sur sol humide et d'après extraits sur sol sec.

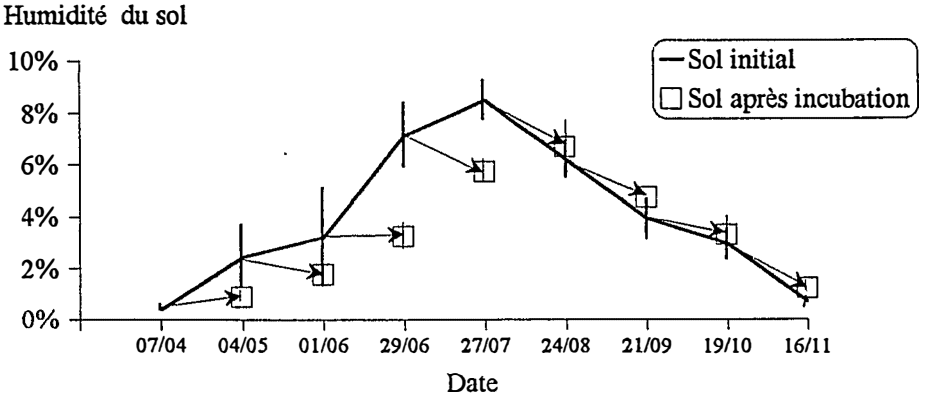


Figure 12 : Evolution au cours de la saison 1995 de l'humidité du terrain (horizon 0-20cm) et du même sol après quatre semaines d'incubation dans les tubes. Les intervalles de confiance sont calculés au seuil d'erreur de 5%

- Azote minéral :

$N\text{-}NH_4$ est dosé par colorimétrie selon la méthode de BERTHELOT modifiée. $N\text{-}NO_3$ est dosé par colorimétrie selon la méthode de GRIESS.

- Azote total :

L'azote total a été mesuré par la méthode Kjeldahl suivie d'une distillation de l'ammoniac par entraînement à la vapeur et dosage volumétrique de l'ammonium piégé en milieu acide (BO_3H_3).

La comparaison des deux approches : analyse d'extraits effectués sur sol sec et analyse d'extraits effectués sur terre humide sur le terrain, a été faite en août 1995, à partir de dix prélèvements réalisés sur les cinq traitements du protocole expérimental. La figure 11 montre une bonne correspondance (relation très hautement significative) entre les nitrates dosés à partir de sol séché à l'air et les nitrates dosés sur terre humide. En revanche il n'existe pas de relation entre les niveaux d'ammonium dosés dans chacune des deux situations. En fait, l'analyse sur terre humide donne des résultats très faibles en ammonium (<0,7 ppm) alors que l'analyse sur sol sec indique une teneur en ammonium de l'ordre de 3,5 ppm. Tout se passe comme si le séchage rapide du sol entraînait une ammonification sans nitrification. Cette présence supplémentaire et relativement importante d'ammonium peut être considérée comme un artefact dans la mesure où elle n'existe pas en condition réelle. En conclusion, on considérera que le rapprochement entre les données de 94 et celles de 95 est possible pour l'ion NO_3^-.

33. Problèmes liés à la méthode

Les conditions d'expérimentation modifient la situation réelle pouvant influencer le taux de minéralisation de l'azote dans le sens d'une surestimation ou d'une sous-estimation. Le remaniement de l'échantillon peut activer, par aération, le processus de minéralisation de l'azote (SCHERER et al., 1992). L'humidité du sol contenu dans les tubes de minéralisation ne suit pas forcément celle du terrain et nous avons eu à le vérifier en 1995 : la figure 12 indique que l'humidité dans les tubes reste constante ou diminue jusqu'au 27/07, alors que l'humidité du terrain ne cesse d'augmenter ; à partir du 27/07, on constate un assèchement dans les tubes comparable à celui du terrain. Il apparaît que la remontée de l'eau par capillarité ne se fait pas à travers le grillage alors que l'évaporation est effective. L'absence de trous dans la paroi enterrée des tubes ne permet pas au contenu de suivre la même évolution d'humidité que le sol sauf quand celle-ci

diminue en fin de campagne. Ces fluctuations différentes d'humidité ont pu avoir des conséquences sur les taux de minéralisation de l'azote.

ADAMS et al. (1989) ont constaté, dans des peuplements d'*Eucalyptus*, une diminution de la minéralisation observée lorsque l'on passe d'une période d'incubation de 2 semaines à une période de 4 semaines. Ils en déduisent que les périodes d'incubation longues isolent le sol de nouvelles sources d'azote minéralisable apportées par la litière aérienne et le renouvellement racinaire et qu'une bonne estimation des bilans est obtenue avec des incubations de 2 semaines, voire moins. Néanmoins, ils considèrent qu'une durée de 4 semaines reste adéquate pour comparer l'aptitude des milieux à minéraliser l'azote. Ce délai assez long, couramment utilisé selon BONNEAU (1995), présente l'intérêt d'améliorer la faisabilité de l'opération en limitant le nombre de prélèvements et d'analyses, ce qui était aussi notre préoccupation.

Enfin, la présente étude ne prend en compte que l'horizon 0-20 cm alors que la libération d'azote minéral et son absorption par la plante a pu se produire aussi dans les horizons plus profonds.

4. LA MACROFAUNE DU SOL

Cette étude, ayant fait l'objet d'un travail de stage (BERGEAL et GUIBON, 1994), avait pour but de comparer la diversité, la densité et la biomasse de la macrofaune de divers systèmes d'aménagement du milieu (différents types de jachère, culture continue, savane naturelle). Il s'agissait d'apprécier la dynamique d'évolution des différentes populations d'invertébrés du sol, après abandon cultural et installation d'une jachère arborée. La méthode d'échantillonnage préconisée par le programme "Tropical Soil Biology and Fertility" (LAVELLE, 1988 ; ANDERSON et INGRAM, 1993) a été utilisée. Le principe de cette méthode est de prélever dans chaque site et chaque traitement, 10 échantillons de sols de 25 cm x 25 cm x 30 cm, à intervalle régulier de 5 m, le long d'une ligne dont l'origine et la direction ont été choisies au hasard. L'existence de dispositifs expérimentaux sur les deux sites nous a conduit à répartir les prélèvements dans les différents blocs des essais. Le monolithe de sol a été séparé en 4 couches successives (litière, 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm). Chaque couche a été déposée dans une bassine et triée à la main. Les invertébrés visibles à l'oeil nu ont été prélevés et conservés soit dans de l'alcool à 75°C (Arthropodes), soit dans du formol à 4% (Vers de terre). Les comptages et les pesées ont été effectués par groupe taxonomique au laboratoire aussitôt après avoir retiré les invertébrés des solutions de conservation.

5. LES MESURES DE PHYTOMASSE ET MINÉRALOMASSE

L'étude du stockage du carbone et des éléments minéraux dans la matière végétale suppose une mise au point sur la définition des compartiments. Suivant les auteurs, le terme biomasse peut représenter strictement la matière vivante ou bien peuvent s'y ajouter toute ou partie de la nécromasse dressée et la nécromasse au sol (CORNET, 1981 ; MITJA et PUIG, 1990).

Dans notre étude, la **biomasse aérienne** est constituée de la biomasse ligneuse et de la biomasse herbacée. Elle comprend la matière vivante, la matière morte encore fixée sur un individu vivant et la matière morte dressée (arbre mort, plante herbacée morte dans l'année). Les biomasses ligneuses et herbacées sont mesurées séparément.

La **litière** ou **nécromasse au sol** est la partie des végétaux posée sur le sol, souvent en cours de décomposition. Elle comprend la matière morte tombée au sol pendant l'année et la matière morte plus ancienne. Dans les jachères herbacées à graminées pérennes, on a inclus dans ce compartiment la partie de la matière morte érigée apparemment issue des végétaux de l'année antérieure.

La **phytomasse épigée** est la somme des deux compartiments précédents : biomasse aérienne et litière.

La **phytomasse hypogée** est la somme des parties souterraines vivantes ou mortes des végétaux présents herbacés ou ligneux.

51. La biomasse aérienne ligneuse

La méthodologie utilisée est adaptée au double objectif d'évaluation de la biomasse et de la minéralomasse, elle a déjà été décrite dans de nombreuses publications (RAPP, 1971 ; NYS et al., 1983 ; BOUCHON et al., 1985, RANGER et al. 1988). Elle consiste à établir une relation mathématique entre un paramètre dendrométrique facile à mesurer et les biomasse et minéralomasse individuelles d'arbres abattus.

L'inventaire a été réalisé en décembre 1995 sur les deux sites. L'échantillonnage a porté sur 17 à 46 arbres selon les espèces en fonction des critères suivants :

- tout le spectre des circonférences des arbres (C) est couvert ;
- l'intensité d'échantillonnage est fonction du nombre de tiges dans chaque classe.

Les "tarifs" à une entrée sont construits suivant un modèle allométrique avec

transformation logarithmique des données. Leur forme est la suivante :
Log [matière sèche (MS) ou minéralomasse] = a + b Log(C).

Les tarifs ne peuvent être utilisés que dans le domaine strict des dimensions d'arbres pour lesquelles ils ont été établis. La méthodologie employée a présenté des variantes selon les espèces ligneuses en raison de leur architecture spécifique. Pour l'*Acacia* et le *Cassia*, espèces à port multicaule, la grandeur de référence est la circonférence à 10 cm de hauteur (C_{10}) et les domaines respectifs des dimensions prises en compte sont pour chacune des espèces : 40 cm < C_{10} < 90 cm et 36 cm < C_{10} < 74 cm. Pour l'*Eucalyptus*, la grandeur de référence est la circonférence à 130 cm de hauteur (21 cm < C_{130} < 59 cm).

L'évaluation de la biomasse et de la minéralomasse des peuplements est obtenue par application des tarifs à l'inventaire. L'organigramme résumant les principales étapes de l'élaboration des tarifs et du calcul des biomasses et minéralomasses est donné en annexe 1.

Dans le cas de l'*Eucalyptus* les tarifs de biomasse et minéralomasse sont construits en cascade pour le houppier : le tarif d'une branche = f (circonférence à 10 cm de l'insertion de la branche = b_{10}) est créé puis appliqué à l'inventaire des branches sur l'arbre ; on créé ensuite le tarif des branches totales = f(C_{130}). Le tarif de minéralomasse repose sur une analyse individuelle pour le bois de tronc de diamètre inférieur à 3 cm (15 arbres échantillon analysés) et sur une analyse des compartiments par catégorie de dimension pour l'écorce, les branches et les feuilles.

Dans les cas du *Cassia* et de l'*Acacia* les tarifs de minéralomasse reposent sur une analyse des compartiments par catégories de dimension pour le bois et l'écorce (3 à 4 échantillons composites analysés par catégorie de diamètre).

- Analyses chimiques :

Après séchage à l'étuve à 85°C, les échantillons ont été broyés et homogénéisés. Les méthodes d'analyses utilisées pour les végétaux sont mentionnées au paragraphe 54 de ce chapitre.

52. La biomasse aérienne herbacée

De 1993 à 1995, dans les jachères boisées, au moment du développement annuel maximum de la strate herbacée, c'est à dire en pleine fructification, des prélèvements d'herbe ont

été effectués sur 10 surfaces triangulaires de 2 m² représentatives de la maille créée par quatre arbres. Cette maille est elle même représentative de la surface totale du peuplement. A Ngong, deux prélèvements ont été faits dans la parcelle du dispositif fixe et les autres dans les deux autres parcelles. Les échantillons ont été séchés à 85°C jusqu'à masse constante, pesés et analysés séparément selon les méthodes mentionnées au paragraphe 54. Afin de ne pas trop perturber le milieu, on s'est efforcé de restituer l'herbe sur le sol après mesure et constitution d'échantillons pour analyse. Très souvent, l'effectif des prélèvements de biomasse a été augmenté, afin de parvenir de proche en proche à une précision de la moyenne inférieure à 15 %.

En ce qui concerne les parcelles en jachère spontanée, on a réalisé des surfaces de prélèvement de 2 m² là où dominaient les graminées annuelles, et de 4 m² là où *Andropogon gayanus*, graminée pérenne à larges touffes, occupait l'espace.

53. La phytomasse souterraine

Les phytomasses des racines fines de diamètre inférieur à 2 mm et celles des grosses racines ont été mesurées par des méthodes différentes en raison de leur distribution distincte. Les grosses racines présentent un système fasciculé à partir des souches alors que les petites racines prospectent de façon assez homogène le sol des parcelles.

Au moment de l'exploitation des peuplements ligneux, les grosses racines ont été prélevées jusqu'à 60 cm de profondeur au niveau d'un arbre moyen par espèce et par site. La surface de prélèvement de 4 m² était délimitée par un gabarit en fer de forme carrée (2 m x 2 m). Le coin du gabarit était placé sur la souche de façon que la surface fût représentative de la maille formée par 4 arbres. Les racines ont été prélevées, séchées, découpées en classe de diamètre (7-10 cm, 3-7 cm, 1-3 cm et 0,2-1 cm) et pesées. Leur composition chimique a été analysée à partir d'échantillons de chaque catégorie de dimension.

A la fin des saisons des pluies 1993 et 1995, au moment où le stock de racines fines était considéré comme maximal, des prélèvements ont eu lieu à l'aide d'une tarière racinaire par horizon de 10 cm d'épaisseur. Dans les parcelles boisées, le nombre de prélèvements a été de 20 par traitement soit 2 sondages par placette de récolte de la biomasse herbacée situés à 1 m et 2 m du tronc. Dans les jachères herbacées, 15 prélèvements par traitement ont été effectués.

Les racines ont été lavées soigneusement à l'eau sur un tamis de maille 1 mm et séparées

Tableau 2a : Appareillage utilisé pour les différents flux du dispositif fixe.

Flux (type d'appareil)	Sites et traitements (nombre d'appareils)									
	Ngong						Mayo Dadi			
	ACP	EUC	CAS	JHP	JHD	CULT	ACP	CAS	JHP	CULT
Hors couvert (pluviomètre)	2						2			
Sous couvert : Pluviolessivats										
- Egouttement (pluviomètre)	10	10	-	-	-	-	-	12	-	-
- Ecoulement (collier)	3	3	-	-	-	-	-	3	-	-
Ruissellement (cadre métallique de 1 m^2)	1	1	-	1	-	1	-	2	2	2
Lixiviation (plaque lysimétrique)	2	2	-	2	-	2	-	2	2	2
Chute de litière (collecteur)	10	10	10	-	-	-	10	10	-	-

Tableau 2b : Prélèvements destructeurs réalisés annuellement de 1993 à 1995.

Compartiment	Sites et traitements (nombre de prélèvements)									
	Ngong						Mayo Dadi			
	ACP	EUC	CAS	JHP	JHD	CULT	ACP	CAS	JHP	CULT
Biomasse herbacée	≥10	≥10	≥10	≥10	≥10	-	≥10	≥10	≥10	-
Litière au sol	≥10 *	≥10	≥10 *	≥10	≥10	-	-	≥10	≥10	-

* la récolte n'a eu lieu qu'en 1995.

en classes de diamètre (0-2 mm, > 2 mm). Les racines d'*Eucalyptus* rougeâtres et les racines de *Cassia* noirâtres et couvertes d'une écorce ont pu être séparées des racines fines d'herbacées, essentiellement des graminées, de teinte blanchâtre. Par contre, dans les jachères à *Acacia*, il n'a pas été possible d'isoler les racines de l'arbre du total de la biomasse racinaire.

Après séchage à l'étuve à 85°C, les racines fines (0-2 mm) ont été pesées. Le poids ainsi obtenu est surestimé en raison des particules minérales persistant dans les racines. Après calcination de l'échantillon à 500°C, le poids de ces particules a été déterminé sur la base du poids total de cendres diminué d'une valeur égale à 10% de la MS totale des racines fines qui, selon AKRIMI et al. (1989), correspond sensiblement au poids de la matière minérale des racines.

Pour chaque traitement, 3 échantillons par profondeur ont été constitués pour analyse et détermination du poids de cendres.

54. Les méthodes d'analyses utilisées pour les végétaux

Tous les échantillons de végétaux (biomasses ligneuse, herbacée, racinaire et litière) ont été analysés au laboratoire du CIRAD-GERDAT.

Le carbone est déterminé sur analyseur automatique LECO CHN 600, et l'azote total sur analyseur LECO PF 408. La minéralisation par voie sèche, avec double calcination à 450-550°C, en milieu acide, permet l'extraction de P, K, Ca, Mg dosés ensuite par spectrophotométrie d'émission à plasma (ICP), à l'aide d'un spectromètre JOBIN YVON 50.

6. LES MESURES DES FLUX HYDRIQUES ET DES FLUX D'ELEMENTS MINERAUX CIRCULANT DANS LES EAUX

61. Les systèmes de collecte des eaux (pluviomètres, colliers, parcelles de ruissellement, lysimètres)

Les dispositifs de collecte des eaux ont été mis en place en mars-avril 1993. Le tableau 2a résume les principaux flux mesurés ainsi que le nombre d'appareils utilisés. Nous donnons, ci-dessous, pour chaque compartiment une description sommaire du mode d'installation et du fonctionnement des appareils utilisés.

a) Apports extérieurs (hors couvert)

Dans chaque site, deux pluviomètres classiques à lecture directe, ont été placés hors couvert pour recueillir la pluie incidente. Après chaque pluie, on relève la quantité d'eau et le quart du contenu de chaque pluviomètre est filtré puis versé dans un bidon d'eau.

b) Pluviolessivage (égouttement + écoulement le long des troncs)

Egouttement : Sous *Eucalyptus* et *Acacia* à Ngong, dix pluviomètres à lecture directe faisant office de gouttières, ont été placés, selon 5 positions par rapport à l'arbre le plus proche et en choisissant ceux-ci selon leur représentativité dans les 4 classes de dimensions du peuplement. Les relevés sont faits après chaque pluie et un prélèvement d'eau, proportionnel à la quantité totale recueillie sur la parcelle est effectué, filtré puis versé dans un bidon de 25 litres.

Sous *Cassia siamea* à Mayo Dadi, 12 pluviomètres ont été placés selon 4 positions par rapport à l'arbre en tenant compte de la représentativité de ces positions dans le peuplement et de la surface approximative occupée par les houppiers des arbres. Les relevés et les prélèvements sont effectués de la même manière qu'à Ngong.

Ecoulement le long des troncs : Des colliers fabriqués à partir de tuyau d'arrosage ouvert, ont été disposés en hélice autour des arbres et acheminent l'eau qui s'écoule le long du tronc dans un bidon de 50 l placé au pied de l'arbre. Dans chacun des peuplements mentionnés ci-dessus, trois arbres ont été choisis de façon à couvrir la gamme des dimensions du peuplement. Les relevés et les prélèvements sont effectués de la même manière que pour les eaux d'égouttement.

c) Ruissellement

Au niveau de chaque traitement, une mini-parcelle de ruissellement de 1 m^2 a été installée. Cette parcelle est constituée d'un cadre métallique de 1 m de côté enfoncé dans le sol sur une profondeur de 15 cm. Le côté orienté vers la pente est percé de trous connectés à une gouttière et à un bidon d'une capacité de 50 l. Les relevés à chaque pluie et les prélèvements sont effectués de la même manière que pour le pluviolessivage.

d) Drainage

Au niveau de chaque traitement, deux lysimètres ont été installés. Ceux-ci sont des tôles en fer galvanisé placées dans la paroi de fosses. A Ngong, des plaques de 60 cm x 60 cm ont été

disposées entre 60 et 80 cm de profondeur au dessus d'un horizon caillouteux. A Mayo Dadi, des plaques de 80 cm x 80 cm ont été disposées à 1 m de profondeur. Les eaux de drainage sont recueillies dans un bidon placé dans la fosse.

62. Les prélèvements et analyses des solutions

Les prélèvements d'eaux ont été regroupés par quinzaine avant d'être analysés. Leur conservation a été assurée par un biocide, le thymol sous forme de cristaux mis dans les bidons et dans les flacons pour bloquer l'activité microbienne.

Au laboratoire du CIRAD-GERDAT à Montpellier ont été dosés :

- P, Ca^{2+}, K^{+}et Mg^{2+} par spectrophotométrie d'émission ICP ;

Au laboratoire du CIRAD-CA à Montpellier ont été dosés :

- N-NH_4 par colorimétrie selon la méthode de BERTHELOT modifiée ;
- N-NO_3 par colorimétrie selon la méthode de GRIESS ;
- N total par la méthode Kjeldahl suivie d'une distillation de l'ammoniac par entraînement à la vapeur et dosage colorimétrique de l'ammonium piégé en milieu acide (H_2SO_4 0,5 *N*). L'azote organique des solutions est obtenue par soustraction de l'azote minéral à l'azote total.

7. LES RETOMBEES DE LITIERE

Pour le choix du dispositif de mesures, on a été amené à distinguer les peuplements ligneux bien développés, dont la couverture totale des houppiers était susceptible de fournir un dépôt de litière spatialement homogène, et les peuplements peu développés dont le dépôt de litière était hétérogène.

71. Cas des peuplements bien développés (*Eucalyptus* et *Acacia* à Ngong)

A titre d'étude préalable, en octobre 1992, 10 collecteurs de litière ont été installés dans une parcelle à *Acacia*. Ces collecteurs étaient des cadres de 50 cm de côté munis d'un grillage à maille de 1 mm ("tissu moustiquaire"). Chaque collecteur a été placé à une distance particulière de l'arbre le plus proche, celui-ci étant choisi au hasard dans la parcelle. La récolte a eu lieu tous les mois. Au cours de la période de récolte (octobre 92 à janvier 93), il n'est pas apparu de relation entre la quantité de litière déposée et la distance du collecteur à l'arbre (r = 0,014),

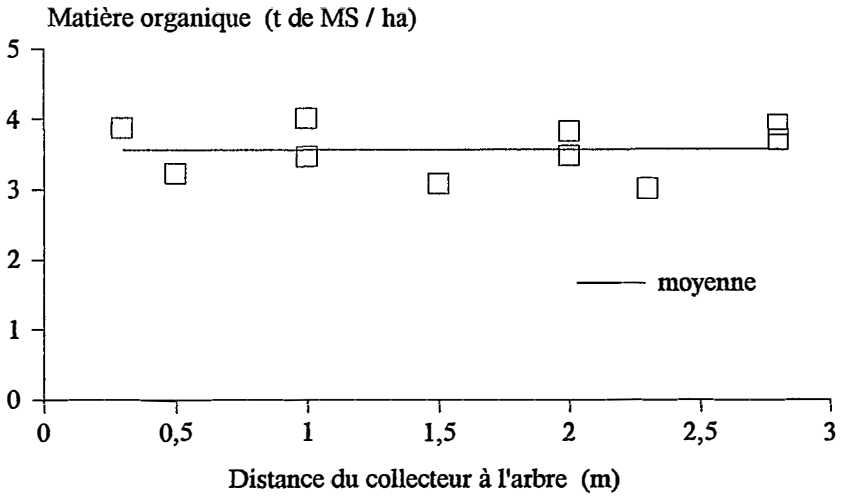


Figure 13 : Chutes de litière sous *Acacia* du 07/10/92 au 12/01/93 dans chacun des 10 collecteurs de 0,25 m².

comme le montre la figure 13. La dispersion des résultats est faible (CV = 10%, soit une précision de la moyenne de 3,2%), ce qui signifie que le dépôt est relativement homogène dans l'espace. Par conséquent, la taille et le nombre de ces collecteurs conviennent pour la mesure de la retombée de litière à l'échelle de la parcelle d'*Acacia*.

En mai 1993, sur les deux parcelles plantées en *Acacia* et *Eucalyptus* choisies pour le dispositif fixe d'étude des cycles, ont été placés dix collecteurs constitués par des bassines percées de diamètre 63 cm (0.31 m²) installées sur des supports métalliques à 50 cm du sol et munies d'un grillage à maille de 1 mm ("tissu moustiquaire"). Les collecteurs ont été installés selon 5 positions par rapport à l'arbre le plus proche et en choisissant celui-ci selon sa représentativité dans les 4 classes de dimensions du peuplement.

En raison du caractère aléatoire des chutes de branches mortes, une mesure a été introduite pour estimer la production de bois mort. Sur le bloc B1b, dans chaque traitement, une corde de 20 m de long est posée sur le sol. Sur un placeau de 40 m² le long de cette corde, les branches mortes sont périodiquement récoltées et pesées.

72. Cas des peuplements peu développés (*Cassia* à Ngong et Mayo Dadi et *Acacia* à Mayo Dadi)

Les arbres étaient moins développés que dans le cas précédent, les houppiers ne couvraient

pas le sol dans sa totalité et les branches étaient basses, si bien que le dépôt de litière se faisait préférentiellement sous l'arbre et très peu dans les "vides".

10 collecteurs de litière formés d'un cadre de 2 m x 2 m munis d'un tissu moustiquaire à maille de 1 mm ont été placés au pied des arbres, dans trois parcelles de *Cassia siamea* en choisissant les arbres selon leur représentativité dans les 4 classes de hauteur du peuplement "de référence". L'intérêt de ces grands collecteurs de 4 m^2 est de couvrir une surface représentative de la maille formée par 4 arbres, englobant l'hétérogénéité du dépôt de litière.

73. Prélèvements et analyses

En saison des pluies, la litière est récoltée toutes les semaines pour éviter son lessivage, et tous les quinze jours en saison sèche. A la fin de chaque mois, la litière est triée en feuilles, fleurs et fruits, écorces, bois et divers (produits ne provenant pas de l'arbre de la parcelle), puis chaque fraction est séchée à 85°C et pesée. Après regroupement de tous les collecteurs par fraction, un échantillon de chaque fraction est préparé chaque mois pour analyse.

8. LA DECOMPOSITION DES LITIERES

81. Le stock de litière au sol et son évolution

On a mesuré le stock de litière au sol au moment où celui-ci est proche de sa valeur minimale en fin de saison des pluies (septembre ou octobre selon les traitements). Cette mesure correspond à la fin de la période active de décomposition et au début de la retombée de litière. Les prélèvements ont été effectués sur les 10 placeaux, ayant servi à la récolte de la biomasse herbacée. Les échantillons ont été séparés en feuilles, bois, écorces, herbes et matériel organique restant, constitué essentiellement de débris végétaux relativement fractionnés. Les échantillons ont été séchés à 85°C jusqu'à massé constante puis pesés. Un échantillon de chaque fraction dans chaque prélèvement est préparé pour analyse. La contamination par le sol entraînant une surestimation pondérale, une fraction de chaque échantillon a été calcinée à 500°C et le poids de cendres, représentant le matériel minéral inerte, a été défalqué du poids initial de l'échantillon. Le résultat final représente donc uniquement du matériel organique. La comparaison avec la chute de litière a été effectuée en retirant à cette dernière le poids des éléments minéraux majeurs. La teneur du matériel végétal en cendres supplémentaires comme la silice est négligeable. Afin de ne

pas trop perturber le milieu, on s'est efforcé de restituer la litière au sol après tri et mesure. En plus du poids de cendres, les analyses effectuées au laboratoire du CIRAD-GERDAT sont les mêmes que celles faites pour la biomasse ligneuse.

Le suivi du stock de litière au sol a été réalisé chaque année dans les parcelles d'*Eucalyptus* à Ngong et de *Cassia* à Mayo Dadi et dans les jachères herbacées des 2 sites. L'exiguïté de la parcelle unique de *Cassia* à Ngong a autorisé un seul prélèvement avant exploitation. Dans le cas de l'*Acacia*, la litière très incorporée au sol en raison de sa finesse n'a pas pu être récoltée de la même manière que dans les autres traitements. En fait, un seul prélèvement a eu lieu avant exploitation en octobre 96 et le sol superficiel a été raclé sur 10 placeaux de 50 cm x 50 cm. La séparation des parties organiques et du sol a été effectuée par flottation et décantation des fractions minérales dans l'eau.

La décomposition de la litière et les variations concomitantes de bioéléments ont été étudiées sur la base d'une comparaison du stock de litière au sol à un an d'intervalle et de la retombée de litière au cours de la même période. La quantité de litière décomposée est donnée par la relation : $Xd = L_1 + A - L_2$

avec : L_1 : stock de litière au sol au temps t_1

L_2 : stock de litière au sol au temps t_2

A : apport de litière entre le temps t_1 et le temps t_2 correspondant à une durée d'un an.

Le taux de décomposition réelle de la litière est donné par la relation suivante utilisée par RAPP et LEONARDI (1988) :

$$kr = \frac{L_1 + A - L_2}{L_1 + A}$$

JENNY et al. (1949) ont proposé, en cas de dépôt saisonnier, un taux de décomposition plus général :

$$k = \frac{A}{L + A}$$

Ce coefficient correspond au taux de décomposition réelle lorsque $L_1 = L_2$. Dans les peuplements en croissance, en général L_2 est supérieur à L_1 (HARMAND et al., 1993), si bien que k calculé de cette manière, surestime le taux de décomposition réelle de la litière. Néanmoins, afin de comparer toutes les situations, y compris celles ayant fait l'objet d'un seul prélèvement de litière au sol en fin de saison des pluies 1995 (*Acacia* et *Cassia* à Ngong), cette dernière

expression a été utilisée en considérant L comme le stock minimal de litière dans le cycle annuel (TRIPATHI et SINGH, 1994).

82. L'étude de la décomposition des litières *in situ* par la méthode des sacs

La méthode recommandée par le programme TSBF (ANDERSON et INGRAM, 1989) a été employée. Elle a consisté à placer sur le terrain des sacs de dimensions 20 cm x 15 cm et contenant 10 g de litière de feuilles correspondant approximativement aux apports annuels. L'expérimentation a débuté en novembre 1994, en pleine saison sèche. 2 types de sacs ont été utilisés : d'une part, des sacs à large maille de 7 mm permettant le passage de la macrofaune et de la mésofaune ; d'autre part, des sacs à maille de 1 mm empêchant le passage de la macrofaune. En fait, pour des raisons de taille minimale des feuilles pouvant être contenues dans les sacs, on a utilisé, pour les différentes espèces ligneuses, les mailles suivantes :

- *Eucalyptus* : mailles de 1 mm et 7 mm ;
- *Cassia* : mailles de 1 mm .

Les feuilles sèches d'*Acacia* traversant les mailles les plus fines, il n'a pas été possible de conduire l'expérimentation avec cette espèce.

Pour chaque traitement (espèce) et chaque type de maille, 4 séries de 20 sacs ont été disposées sur le sol et les sacs ont été prélevés à intervalle régulier : tous les 2 mois en saison sèche et tous les mois en saison des pluies.

Au laboratoire, on retire du contenu des sacs le matériel contaminant (racines, faune, sol) en brossant et rinçant l'échantillon à l'eau distillée. Le poids sec des litières et leurs teneurs en N, P, Ca, K, Mg et lignine ont été déterminés initialement. A chaque prélèvement, le poids sec a été déterminé et après une année, une nouvelle analyse chimique a été faite.

9. LA FIXATION D'AZOTE

Le renouvellement naturel de l'azote dans les écosystèmes est assuré par les apports atmosphériques mais aussi par la fixation atmosphérique de type symbiotique dans le cas des légumineuses, et de type non symbiotique dans le cas des savanes à graminées (BALANDREAU, 1976 ; ABBADIE et al., 1992) et des arbres non légumineuses (O'CONNEL et al., 1979).

Afin d'estimer le potentiel fixateur d'azote d'*Acacia* sur les sites de Ngong et Mayo Dadi, le pourcentage d'azote dérivé du N_2 atmosphérique (Ndfa%) contenus dans les feuilles a été

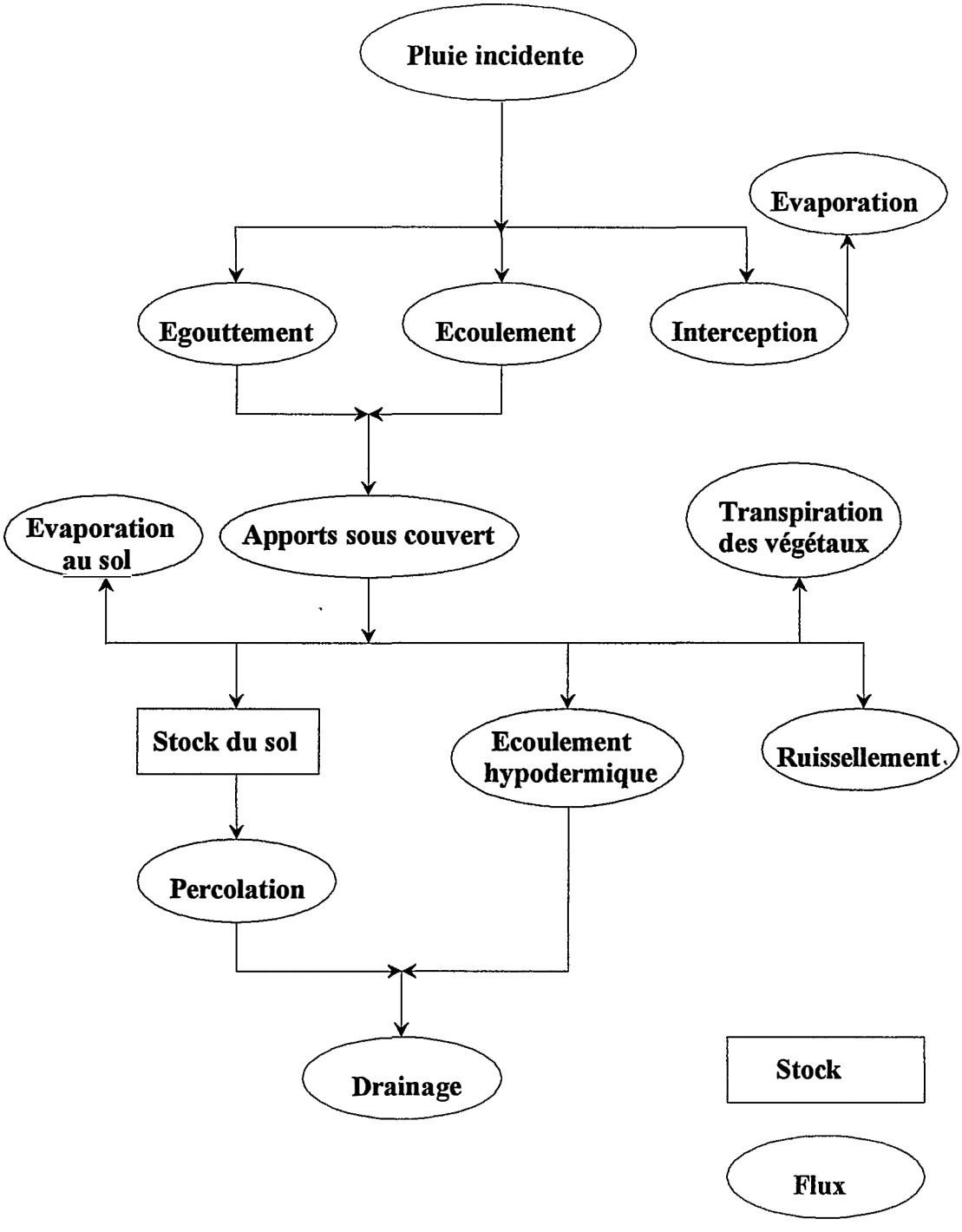


Figure 14 : Représentation du cycle de l'eau dans la parcelle (d'après HANCHI, 1994, modifié).

calculé selon l'équation suivante (AMARGER et al., 1977 ; BARDIN et al., 1977) :

$$Ndfa\% = \frac{\delta^{15}N_{nf} - \delta^{15}N_f}{\delta^{15}N_{nf} - \varepsilon_{fix}} X\ 100$$

où $\delta^{15}N_{nf}$ est l'abondance isotopique en N^{15} des feuilles de l'arbre de référence non fixateur d'azote ; $\delta^{15}N_f$ l'abondance isotopique des feuilles de l'arbre fixateur d'azote ; ε_{fix} le $\delta^{15}N$ de l'arbre fixateur d'azote cultivé sur un milieu minéral dépourvu d'azote.

Dans chaque essai, le *Cassia* a été choisi comme espèce de référence non fixatrice d'azote. Les valeurs de $\delta^{15}N$ ont été déterminées sur des échantillons représentatifs de feuilles récoltés sur quelques arbres à une seule période de l'année, en septembre 1994 et septembre 1995. Le pourcentage d'azote total a été mesuré par la méthode Kjeldahl (BREMNER et MULVANEY, 1982).

Le coefficient d'enrichissement isotopique ε_{fix} de l'*Acacia polyacantha* n'a pas été mesuré. Chez l'*Acacia mangium*, il est de -0,31‰ (GALIANA et al., 1996). Chez *Sesbania spp.* et *Aeschynomene spp.*, les coefficients respectifs sont -0,7‰ et -1‰ (YONEYAMA, 1990). Chez le *Prosopis glandulosa* il est de -2‰ (SHEARER et KOHL, 1989). Pour le calcul du potentiel fixateur d'azote de l'*A. polyacantha*, on considérera que le ε_{fix} est compris entre 0 et -2‰ (DOMENACH, communication personnelle).

D'autre part, après estimation du contenu en azote des différents compartiments des écosystèmes de jachères à Ngong, la fixation d'azote par l'*Acacia* a été estimée par la méthode des bilans (GANRY et DOMMERGUES, 1995 ; BERNHARD-REVERSAT, 1996a). La différence entre le stock d'azote fixé par le système sol-*Acacia* durant un temps donné et les stocks des systèmes avec espèces non fixatrices peut être mise sur le compte de la fixation symbiotique.

10 . ETABLISSEMENT DES BILANS ECOSYSTEMIQUES

101. Le bilan hydrique

Etant donné que le transport d'une partie des éléments minéraux arrivant au sol et de la quasi totalité des éléments circulant dans le sol est assurée par l'eau, il a semblé important d'évaluer autant que possible les flux hydriques dans les peuplements de jachère. Les différentes

composantes du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle schématisées sur la figure 14 sont liées par les relations suivantes (d'après AUSSENAC, 1975 et HANCHI, 1994) :

$$Pi = Eg + Ec + I$$
$$Pi = R + ETR + \Delta S + D$$
$$ETR = I + Es + T$$

Pi = Pluie incidente
Eg = Egouttement à travers le feuillage des arbres
Ec = Ecoulement le long des troncs
I = Interception par le feuillage et évaporation

R = Ruissellement
ETR = Evapotranspiration réelle
ΔS = Variation de stock d'eau dans le sol
D = Drainage

Es = Evaporation à partir du sol
T = transpiration par les arbres

Au cours de la saison 1994, le stock d'eau du sol a été évalué 4 fois par la méthode gravimétrique : des prélèvements de sol ont été effectués tous les 10 cm jusqu'à 250 cm de profondeur, puis mis à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant afin de calculer l'humidité pondérale (Hp en %) puis l'humidité volumique (Hv en %). Ce travail a été réalisé par MILLET (1994) dans le cadre de son stage de DEA que nous avons encadré sur le terrain.

Les résultats sur les composantes du bilan hydrique sont présentés et commentés en annexe 2.

102. Les cycles et bilans écosystémiques

L'étude séparée des différents compartiments de phytomasse et de minéralomasse permettra d'établir un bilan de la fixation du carbone et du stockage des éléments minéraux à l'échelle de chaque écosystème.

Les restitutions au sol par les plantes comprenant les litières et le pluviolessivage, et l'accumulation dans la phytomasse pérenne sont les phases des cycles des éléments minéraux qui correspondent au prélèvement par les plantes. La prise en compte de ces flux, de la décomposition des litières et des flux géochimiques tels que les apports par la pluie et la fixation d'azote atmosphérique permettra d'établir un bilan au niveau du pédon visant à expliquer l'évolution des

caractéristiques chimiques du sol. Ne seront pas intégrés dans les bilans écosystémiques, les flux géochimiques qui n'ont pas été mesurés comme les pertes par lixiviation et les apports d'éléments échangeables au sol par altération de la roche mère.

11. COMPORTEMENT DES CULTURES APRES JACHERE

111. Comportement des cultures à Ngong après 2 ans de jachère

En mai 1993, c'est à dire en fin de 2e année de jachère à Ngong, correspondant à 4 ans d'âge pour les peuplements ligneux, les parcelles de la répétition "a" du dispositif (figure 7) ont été exploitées et remises en culture de cotonnier. Après exportation du bois de diamètre supérieur à 3 cm, les résidus d'exploitation ont été étalés sur la parcelle, puis brûlés. Le labour en traction animale, a été effectué dans de bonnes conditions malgré les racines des arbres. Trente pour cent des souches ont rejeté, mais les rejets ne se sont développés qu'en fin de saison des pluies sans gêner la culture de cotonnier pratiquée selon l'itinéraire technique préconisé par la Sodécoton incluant un apport d'engrais minéral à savoir 200 kg/ha d'engrais complet N, P, K, S, B (formule 15-20-15) et 100 kg/ha d'urée. En 2e année de remise en culture (1994), le sorgho a été installé sur les mêmes parcelles en semis direct sans labour ni engrais.

112. Comportement des cultures à Ngong après 5 ans de jachère

De la même manière que précédemment, les parcelles des blocs 2b et 3b (figure 7) exploitées en décembre 1995 et janvier 1996 ont été remises en culture en juillet 1996. Après exportation du bois de diamètre supérieur à 3 cm, les résidus d'exploitation ont été étalés sur le sol, puis brûlés. Le labour en traction animale a été effectué avant le semis du maïs.

Des prélèvements de sol sur les horizons 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm, ont eu lieu avant la mise culture. 4 échantillons par traitement ont été réalisés, soit 2 échantillons composites de 8 prélèvements par parcelle. Les caractéristiques minérales des sols après brûlis seront comparées aux analyses de 1995.

12. TRAITEMENT DES DONNEES ET PRESENTATION DES RESULTATS

Les analyses statistiques (analyse de variance, comparaison de 2 moyennes, régression

linéaire) ont été effectuées à l'aide des logiciels STATITCF et SAS. Les études comparatives des différents traitements ont fait l'objet d'analyses de variance. Lorsque le niveau de signification P est supérieur à 5 %, on considère que l'essai n'est pas significatif pour ce traitement "ns". Pour les niveaux inférieurs aux seuils suivants : 5%, 1% et 1‰, l'effet du traitement est considéré respectivement comme significatif "*", hautement significatif "**" et très hautement significatif "***". Dans certains cas, on mentionne le niveau P lorsqu'il est supérieur à 5% mais peu éloigné de cette valeur.

Si le test "F" a montré que l'essai est significatif, on utilise le test de NEWMAN-KEULS pour faire des groupements ; les moyennes ne différant pas significativement entre elles sont regroupées par des lettres identiques.

Dans le cas de la comparaison de deux moyennes d'échantillons indépendants, on a également utilisé le test t de STUDENT qui porte sur la différence des moyennes.

De façon facultative, les intervalles de confiance des moyennes de n valeurs ont été calculés sur la base des points critiques de la distribution de student t(0,975 ; n-1) et de l'erreur standard de la moyenne er = $\sigma/\sqrt{n}$. La longueur de cet intervalle est égal à 2 * t(0,975 ; n-1) * $\sigma/\sqrt{n}$.

Les études visant à expliquer une variable par une ou plusieurs autres variables ont fait l'objet de régressions linéaires. Le coefficient de détermination de la régression r^2 présente un niveau de signification P renseignant sur la liaison entre les variables. Cette probabilité est donnée par le tableau d'analyse de variance du modèle. Les coefficients de régression sont donnés également avec leur niveau de signification.

DEUXIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III

EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL

EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL

1. EVOLUTION DES DENSITES APPARENTES DU SOL

La densité apparente est inversement liée à la porosité du sol. Dans notre étude, les variations significatives de densité apparente entre les différents modes de gestion du sol sont limitées à la profondeur 5 cm. Les plus faibles densités obtenues sous *Acacia*, jachère herbacée protégée et *Cassia* indiquent une plus forte porosité du sol que sous *Eucalyptus* où celle-ci est tout de même améliorée par rapport à la culture continue (tableau 3). Une différence de 0,1 U de

Tableau 3 : Densités apparentes de l'horizon 0-5 cm des sols des différentes situations à Ngoṇg en 1995.

Traitements								
ACP		(CAS)	EUC		JHP		CULT	
1,32	c	(1,32)	1,37	b	1,33	c	1,44	a

Deux valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil de 5 %

densité apparente entre la culture et certaines jachères peut correspondre à une différence importante de porosité structurale. Contrairement aux observations faites par OHTA (1990) sur de jeunes plantations d'*Acacia auriculiformis* et de *Pinus kesyia* aux Philippines, on ne constate pas d'effet améliorateur des plantations d'arbres par rapport à la jachère herbacée.

Il existe une corrélation significative ($r = -0,65$; $P < 0,001$) entre la densité apparente et le taux de MOS signifiant que la porosité du sol augmente avec l'incorporation de MO au sol. Cette situation peut être due à la minéralisation des débris végétaux inclus dans le sol créant des pores, ainsi qu'à l'activité de la faune du sol favorisant la formation de micro galeries souterraines.

2. EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL

L'étude de l'évolution de la MO du sol repose, d'une part sur une comparaison synchrone des profils de carbone et azote totaux réalisés sur jachères et culture continue en juillet 1995,

Tableau 4 : Carbone et azote totaux du sol en juin 1995, après 4 années de jachère à Ngong et 3 années de jachère à Mayo Dadi. L'analyse de variance a été faite indépendamment pour chaque lieu et chaque horizon.

Carbone en mg/g de sol

	Ngong									Mayo Dadi								
Profondeur	*Acacia*		Jachère herbacée protégée		*Eucalyptus*		Culture continue		Seuil de signification	*Acacia*		Jachère herbacée protégée		*Cassia*		Culture continue		Seuil de signification
0-5 cm	5,3	a	4,9	ab	4,0	b	3,0	c	0,0002	4,8	a	3,6	b	3,1	b	2,2	c	0,0001
0-10 cm	4,1	a	3,4	b	3,1	bc	2,6	c	0,0003	3,1	a	2,8	ab	2,5	bc	2,1	c	0,0028
10-20 cm	3,0	a	2,6	ab	2,3	b	2,4	b	0,04	2,8	a	2,6	ab	3,0	a	2,2	b	0,066
20-40 cm	2,5	a	2,1	ab	1,9	ab	1,8	b	0,1	2,1	a	2,0	a	1,8	a	1,7	a	0,11
40-60 cm	1,9		2,2		2,0		1,6			1,5								
60-70 cm	2,0		2,0		1,8		1,7											
70-90 cm	1,8		2,2		1,9		1,6											

Azote total en mg/g de sol

	Ngong									Mayo Dadi								
Profondeur	*Acacia*		Jachère herbacée protégée		*Eucalyptus*		Culture continue		Seuil de signification	*Acacia*		Jachère herbacée protégée		*Cassia*		Culture continue		Seuil de signification
0-5 cm	0,46	a	0,42	ab	0,35	bc	0,30	c	0,0014	0,41	a	0,32	b	0,30	bc	0,23	c	0,00
0-10 cm	0,38	a	0,34	a	0,34	a	0,27	b	0,0004	0,30	a	0,28	ab	0,28	ab	0,23	b	0,05
10-20 cm	0,30	a	0,27	a	0,25	a	0,25	a	0,24	0,31	a	0,29	ab	0,29	ab	0,25	b	0,10
20-40 cm	0,29	a	0,24	b	0,23	b	0,24	b	0,0165	0,26		0,25		0,25		0,23		0,20
40-60 cm	0,27		0,30		0,28		0,23			0,22								

C/N

	Ngong									Mayo Dadi								
Profondeur	*Acacia*		Jachère herbacée protégée		*Eucalyptus*		Culture continue		Seuil de signification	*Acacia*		Jachère herbacée protégée		*Cassia*		Culture continue		Seuil de signification
0-5 cm	11,5	a	11,6	a	11,2	a	10,0	b	0,0073	11,7	a	11,1	a	10,6	a	9,6	b	0,0016
0-10 cm	10,9	a	10,2	ab	9,9	ab	9,1	b	0,0003	10,2		10,0		9,2		8,8		0,38
10-20 cm	10,2		10,0		9,5		9,5		0,6	9,1		9,2		10,5		8,9		0,15
20-40 cm	8,5		8,6		8,3		7,7		0,44	8,1		8,2		7,3		7,4		0,4

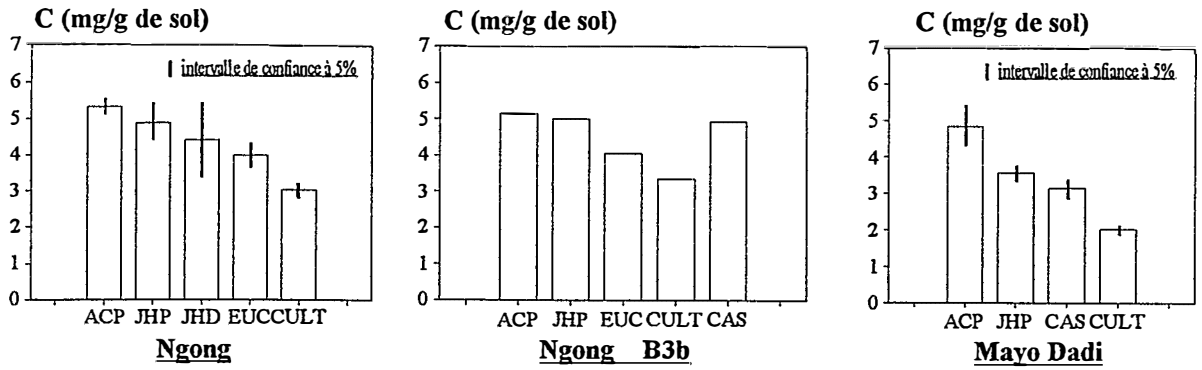


Figure 15 : Teneurs en C de l'horizon 0-5 cm des différentes situations à Ngong et Mayo Dadi en 1995.

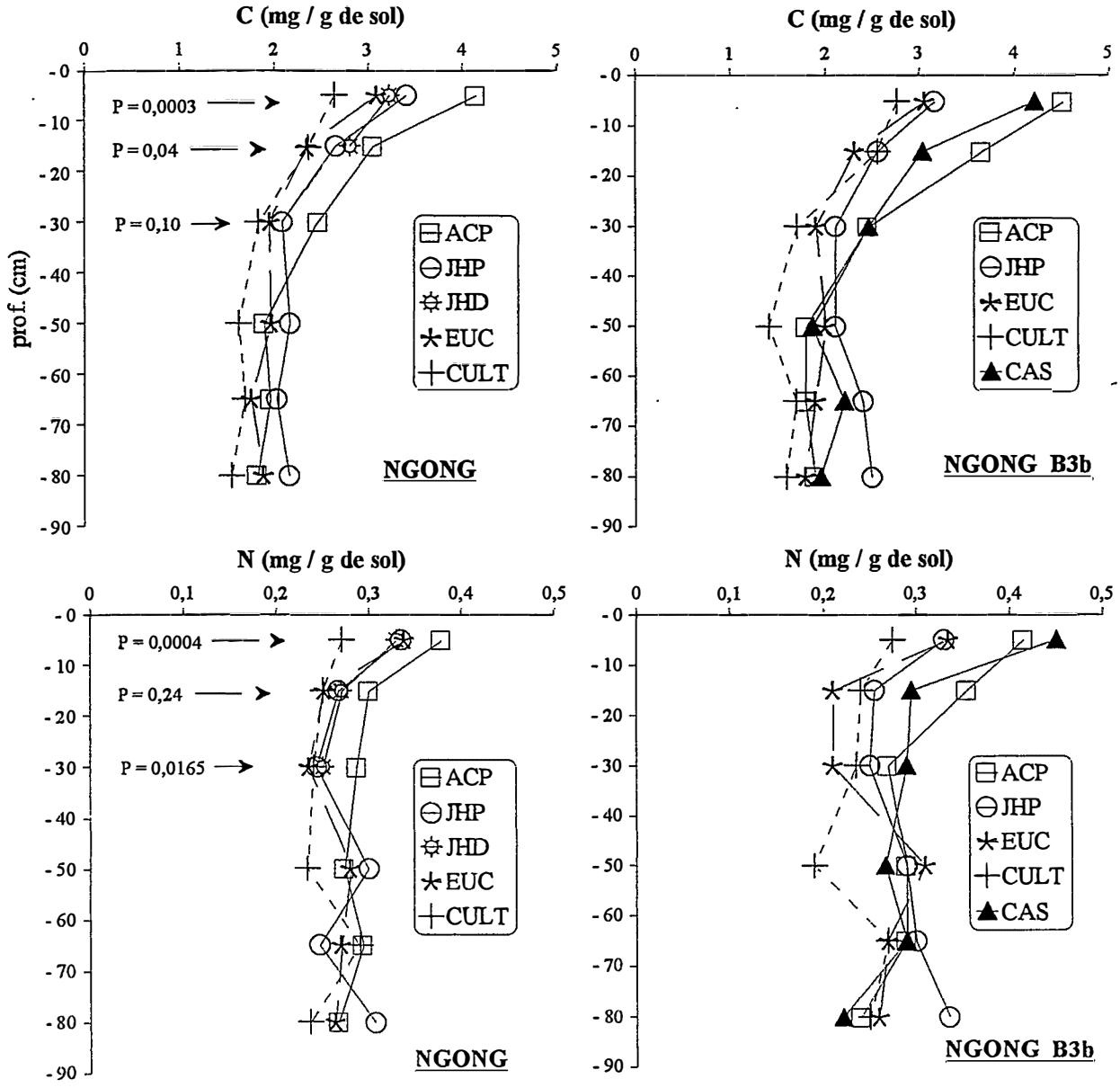


Figure 16 : Profils de carbone et d'azote totaux du sol des différentes situations à Ngong en 1995. A gauche, les profils moyens (P : Niveau de signification de l'ANOVA), à droite les résultats du bloc 3b.

et d'autre part sur une analyse diachronique des teneurs en carbone du sol de 1989 à 1995. L'étude porte sur des échantillons de terre fine et ne prend pas en compte les débris végétaux de taille supérieure à 2 mm. Cette fraction, qui d'après nos observations est essentiellement comprise dans la biomasse de racines fines, sera étudiée ultérieurement (chapitre IV).

21. Comparaison synchrone des profils de carbone et azote totaux de juillet 1995

La date de juillet 1995 correspond à une durée de jachère de 4 ans à Ngong et de 3 ans à Mayo Dadi. Le tableau 4 donne, pour chaque site et chaque horizon, les taux de carbone et d'azote, les rapports C/N et les résultats de l'ANOVA pour les différents traitements. Certains traitements n'y sont pas représentés, en particulier la jachère de *Cassia* à Ngong, installée sur une seule parcelle, en marge du dispositif (figure 7). Cette parcelle n'a pu être comparée qu'avec les parcelles du bloc 3b, dont les résultats sont schématisés sur les figures 15 et 16 en parallèle des profils moyens obtenus pour tout le site.

Le tableau 4 et la figure 16 indiquent une diminution des teneurs en carbone et azote de la surface jusqu'à 40 cm de profondeur et pas de variation bien nette au delà. D'une façon générale, on constate un effet positif de la jachère par rapport à la culture continue. L'absence de corrélation positive entre le carbone et les éléments fins du sol (argile + limons fins), jusqu'à 40 cm de profondeur à Ngong (hors *Cassia*) ($-0,02 < r < 0,07$) et 10 cm de profondeur à Mayo Dadi ($r = -0,18$) montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de la texture sur les variations du taux de C fortement liées au mode de gestion du sol.

On observe des variations en fonction du site et du type de végétation. Le test F indique globalement un effet du traitement sur une plus grande profondeur à Ngong (40 cm) qu'à Mayo Dadi (20 cm). Selon le tableau 4, les traitements se classent par rapport à leur action sur la MO du sol selon l'ordre décroissant suivant :

Acacia ≥ *Cassia* = jachère spontanée herbacée = *Eucalyptus* > culture continue.

La jachère pâturée et parfois brûlée (JHD) présente un statut organique comparable à la jachère herbacée protégée (JHP) malgré ses 4 à 5 années d'existence supplémentaire (figures 15 et 16). Cela peut s'expliquer par les plus faibles restitutions de matière organique dans le système

JHD dues au prélèvement par le bétail, au passage du feu et au moindre développement de la strate herbacée.

La variation positive significative du rapport C/N (tableau 4) dans la jachère par rapport à la culture continue sera discutée au chapitre suivant et lors de l'étude des fractions granulométriques de la MOS.

22. Analyse diachronique des teneurs en carbone et azote totaux du sol

Durant la phase de culture, on considère généralement que la perte de carbone organique au cours du temps est proportionnelle à la quantité de carbone préexistante et correspond à l'équation $dC/dt = - k\,C$, k étant la constante de perte apparente de l'humus du sol (JENNY, 1950). Selon la formule précédente, la teneur en carbone va chuter en n années selon un rythme annuel k, donné par la relation :

$$k\ (\%) = \frac{LnC_0 - LnC_n}{n} \times 100$$

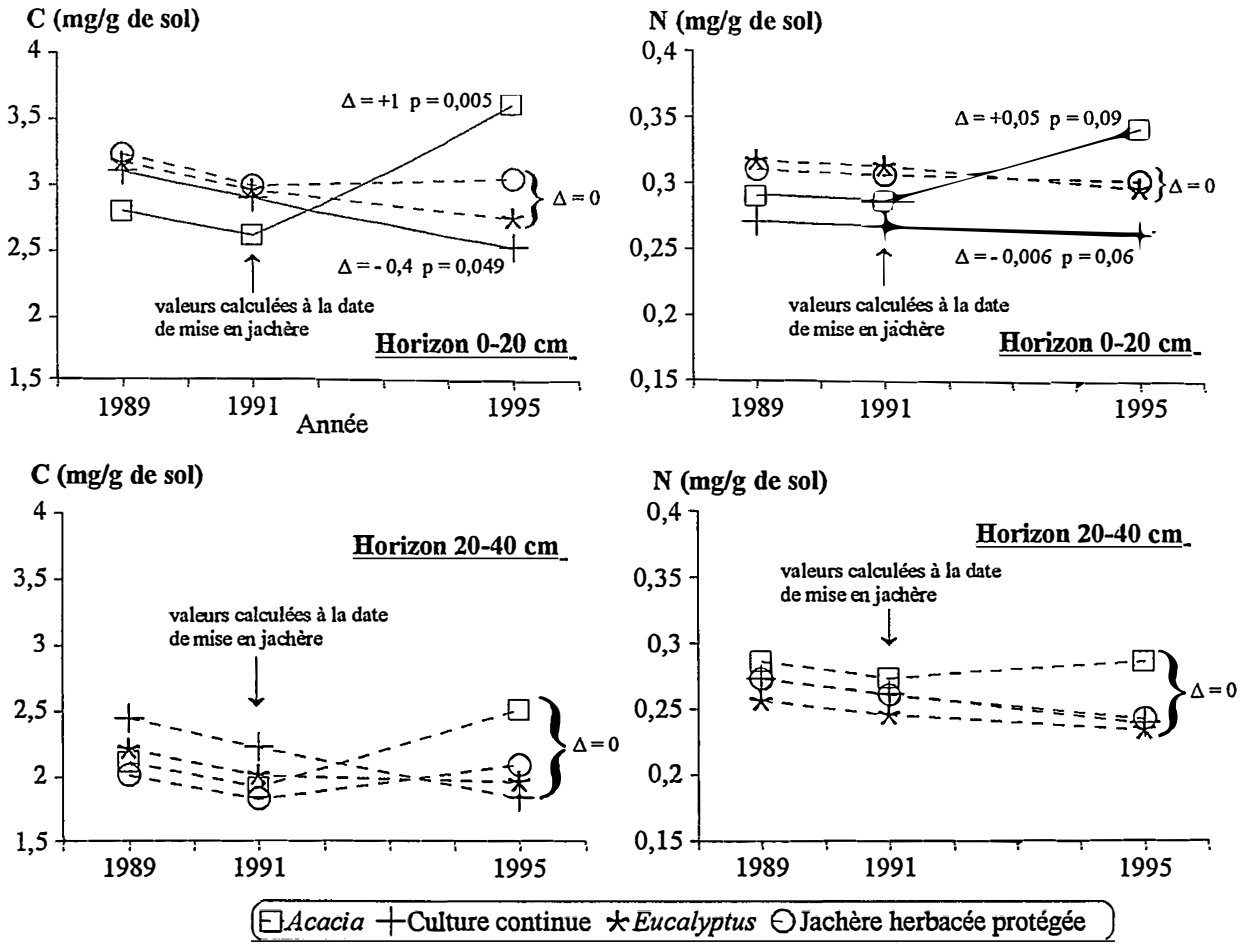
avec C_0, carbone organique initial[4], et C_n, après n années.

Les teneurs initiales en carbone et azote du sol de chaque parcelle, déterminées à partir d'un échantillon composite au moment de la plantation des arbres, sont comparées aux analyses de 1995 faites sur les mêmes parcelles, soit par traitement : 3 parcelles à Ngong et 1 à Mayo Dadi. A Ngong, les 3 valeurs de 95 ont été obtenues en faisant la moyenne des résultats d'analyse des 2 échantillons composites de chaque parcelle. Les variations des teneurs en C (ΔC) et N (ΔN) du sol de chaque parcelle ont été calculées et la moyenne des 3 différences a été comparée à la valeur 0 selon le test t. A Mayo Dadi, dans chaque parcelle, la moyenne de 6 valeurs de 95 a été comparée à la valeur unique initiale.

La figure 17 indique, pour l'horizon 0-20 cm à Ngong, une baisse significative du taux de C en culture continue de 0,6 mg/g de sol en 6 ans, soit un taux k de dégradation de la MO de 3,6 % par an. Ce chiffre est à rapprocher de ceux donnés par PIERI (1989) : 2 % en moyenne dans des essais agronomiques de longue durée en zone soudanienne, avec des taux compris entre

---

(4) Dans cette étude, le C organique, représentant 93% à 96% du C total, a été confondu avec le C total.



Δ # 0 correspond à une variation significative de C ou de N de 1991 à 1995.

Figure 17 : Evolution des teneurs en carbone et azote totaux du sol des différentes situations de Ngong.

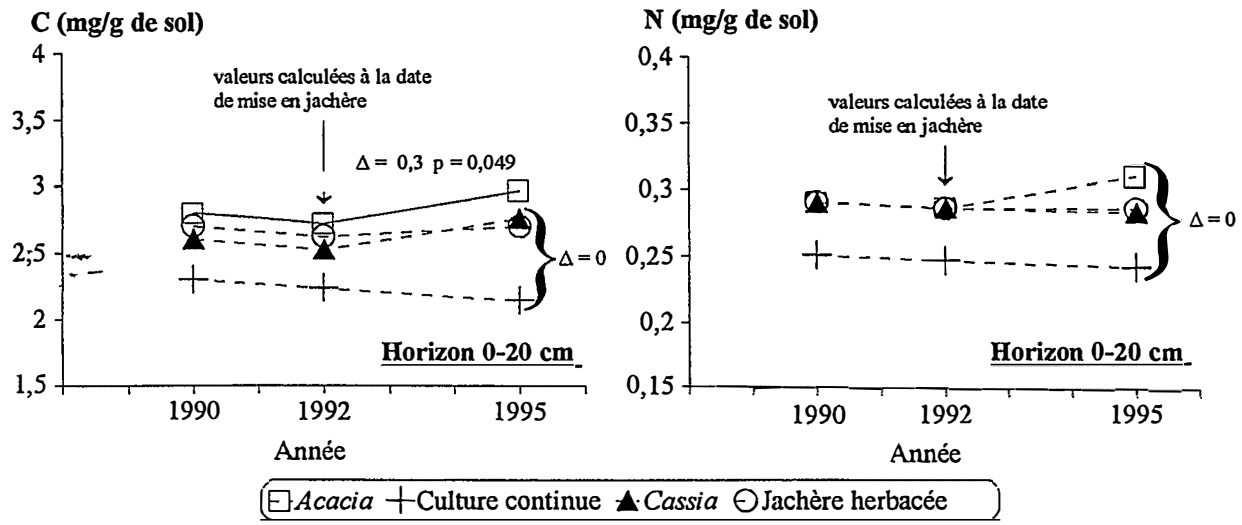


Figure 18 : Evolution des teneurs en carbone et azote totaux du sol des différentes situations de Mayo Dadi.

3 % et 7% pour des situations dégradées. Si on applique ce taux aux autres traitements pour la période 1989-1991, on en déduit les teneurs en C du sol des différentes parcelles en 1991 avant la mise en jachère. A partir de cette date, le taux de C augmente de façon hautement significative sous *Acacia* à raison de 1 mg/g de sol en 4 ans soit un taux de reconstitution du carbone du sol de 8 % par an. Il faut préciser que l'augmentation de C de 1989 à 1995 est également significative ($\Delta C = 0,8$ mg/g de sol et $P = 0,008$). Cette amélioration, apparemment faible, est tout à fait appréciable si on se réfère aux valeurs données par différents auteurs. FELLER (1995) trouve, pour les sols sableux de zone sèche (Sénégal), des différences entre parcelles sous culture et parcelles sous jachère de longue durée toujours faibles (1 à 1,5 mg C/g sol dans l'horizon 0-20 cm). GUYOTTE et al. (1995), pour les sols ferrugineux sur grès autour de Garoua, et BOLI (1996), pour les sols ferrugineux sur substrat granito-gneissique d'une région voisine, indiquent des variations des taux de carbone de 1,5 mg/g sol entre jeune défriche d'un an et culture de longue durée.

Aucune évolution significative n'est perceptible sous *Eucalyptus* et jachère herbacée. Il semblerait alors que ces traitements aient stabilisé le statut organique de l'horizon 0-20 cm. Même si l'effet de ces traitements a pu être masqué par le manque de précision de l'analyse chimique liée à la faiblesse des teneurs en carbone voisines du seuil minimal de détection de l'appareil, cette approche confirme l'effet superficiel de la jachère naturelle et de la plantation d'*Eucalyptus* sur le statut organique du sol et la supériorité du traitement *Acacia*.

L'azote a montré des variations analogues à celles du carbone mais proportionnellement moins élevées et à peine significatives dans le cas de la culture et de l'*Acacia*. Il s'en suit une baisse significative du rapport C/N sous culture continue (Δ C/N = -1,8 ; $P = 0,02$) et une tendance à l'augmentation sous *Acacia* (Δ C/N = +0,8). Sous culture, il n'y a pratiquement pas d'apport de litière et la baisse de C/N peut être attribuée à l'effet conjugué de deux facteurs, d'une part la dégradation préférentielle des composés organiques figurés plus pauvres en azote et moins stables que les composés organiques humifiés, d'autre part l'immobilisation de N liée à la libération plus rapide du C dans le processus de minéralisation de la MO. A l'inverse, l'augmentation de C/N sous *Acacia* est causée par l'incorporation au sol de matériel végétal peu décomposé et plus pauvre en azote ($18 < C/N < 23$) que la MOS initiale (C/N = 10).

Dans l'horizon 20-40cm, les variations des taux de carbone et d'azote présentent les mêmes tendances que dans l'horizon 0-20 cm sans différence significative toutefois (figure 17).

A Mayo Dadi, les teneurs initiales en C de l'horizon 0-20 cm sont significativement plus faibles qu'à Ngong (P = 0,01) et la baisse du taux de carbone, de l'ordre de 0,2 mg/g de sol en 5 ans, correspond à un taux annuel k de dégradation de 1,6 % également plus faible qu'à Ngong (figure 18). Sous les différentes jachères, la seule variation significative est l'augmentation du taux de C sous *Acacia* correspondant à un taux annuel de reconstitution de 3%. Ce taux significativement plus faible qu'à Ngong (P = 0,01) confirme l'effet superficiel de la jachère de 3 ans, encore peu développée, sur le statut organique du sol à Mayo Dadi. Il semble alors que la reconstitution du taux de carbone du sol soit liée à la fertilité du milieu influençant directement le développement de la végétation et le niveau des restitutions organiques. L'écart apparemment important obtenu en 1995 entre les jachères et la culture continue à Mayo Dadi s'explique par la plus mauvaise situation de départ de celle-ci.

23. Etude de la dynamique des différentes fractions granulométriques de la MO du sol

231. Comparaison synchrone des différentes fractions organiques du sol

Seuls les horizons de surface 0-10 cm et 10-20 cm du site de Ngong, ayant montré des

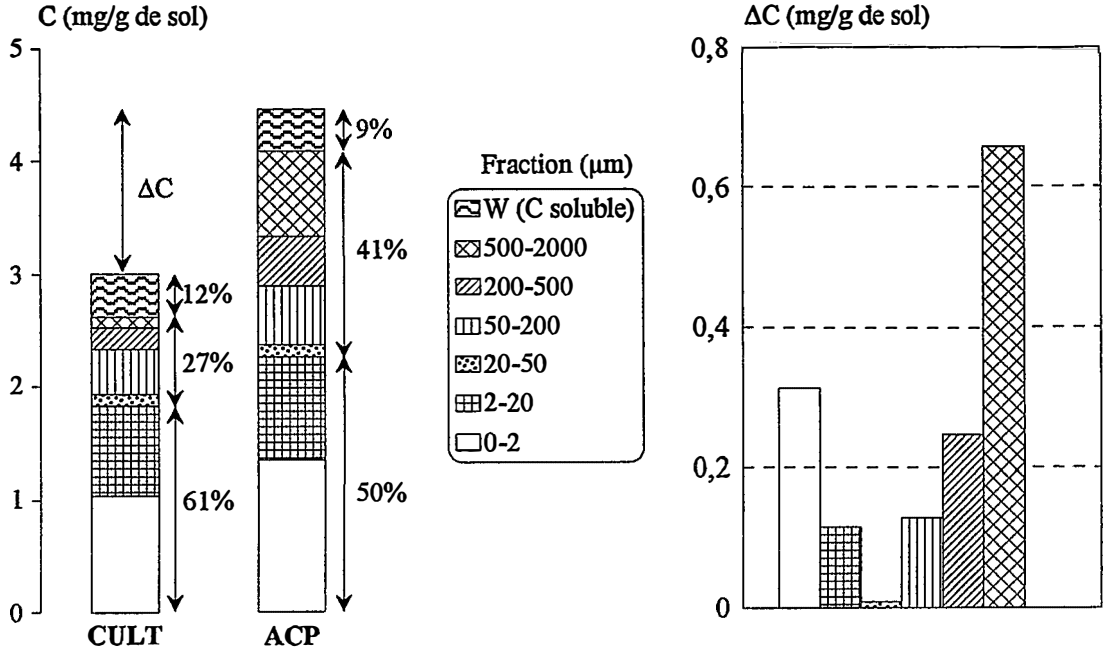


Figure 19 : Contribution des différentes fractions granulométriques au carbone de l'horizon 0-10 cm (C) dans les situations *Acacia* (ACP) et culture continue (CULT) en 1995 à Ngong, et à la différence (ΔC) entre ces situations.

variations significatives des taux de carbone entre les différentes situations, ont été pris en compte dans cette étude. Le choix s'est porté sur les parcelles du bloc 3b où tous les traitements sont présents, en particulier la plantation de *Cassia*.

Le plus souvent, le fractionnement a été effectué sur 1 seul échantillon par parcelle, composite des 2 échantillons utilisés pour l'analyse de C et N totaux. Afin de s'assurer de la qualité du fractionnement, 2 répétitions par échantillon ont été faites et l'étude porte sur la moyenne des deux. La similitude des contenus en C et N totaux de l'horizon 0-10 cm des situations *Acacia* et *Cassia* (figure 16) nous a conduit à augmenter le nombre d'échantillons par parcelle, afin de différencier ces traitements. Au total, 3 échantillons pour l'*Acacia* et 4 pour le *Cassia* ont été utilisés. Les données détaillées des fractionnements figurent en annexe 3.

- Participation des différentes fractions granulométriques au C total en fonction du mode de gestion du sol

Une première approche a consisté à appliquer le protocole de fractionnement granulométrique complet, décrit au paragraphe 23 du chapitre II, à deux échantillons de l'horizon 0-10 cm des parcelles *Acacia* et culture continue, représentant les situations extrêmes après quatre ans de jachère. Il s'agissait d'identifier les fractions responsables des variations du taux de C causées par le changement de mode de gestion du sol, et de limiter l'étude des autres traitements à ces fractions.

La participation des fractions au C du sol est schématisée sur la figure 19. Sur celle-ci, on distingue, à gauche les contributions de chaque fraction et de leur somme au C du sol et, à droite, les variations ΔC (en mg C/g de sol) de chaque fraction entre les situations CULT et ACP. Le compartiment regroupant les différentes fractions grossières (> 50 µm) et les composés hydrosolubles représentent 72% de la variation globale (ΔC), dont 45% rien que pour la fraction 500-2000 µm. L'importance des fractions grossières dans ΔC confirme le rôle majeur joué par les "débris végétaux" dans la dynamique à court terme des MO de ces sols pauvres en argile (FELLER et al., 1993). Ce premier résultat nous a conduit à limiter les fractionnements suivants à l'étude globale du compartiment organo-minéral (< 20 µm) et à l'analyse détaillée du compartiment organique "figuré "(> 50 µm) en séparant les fractions 50-200, 200-500 et 500-2000 µm. La fraction intermédiaire 20-50 µm ne représentant qu'une infime partie du C total (2 à 3,5%) a été étudiée séparément.

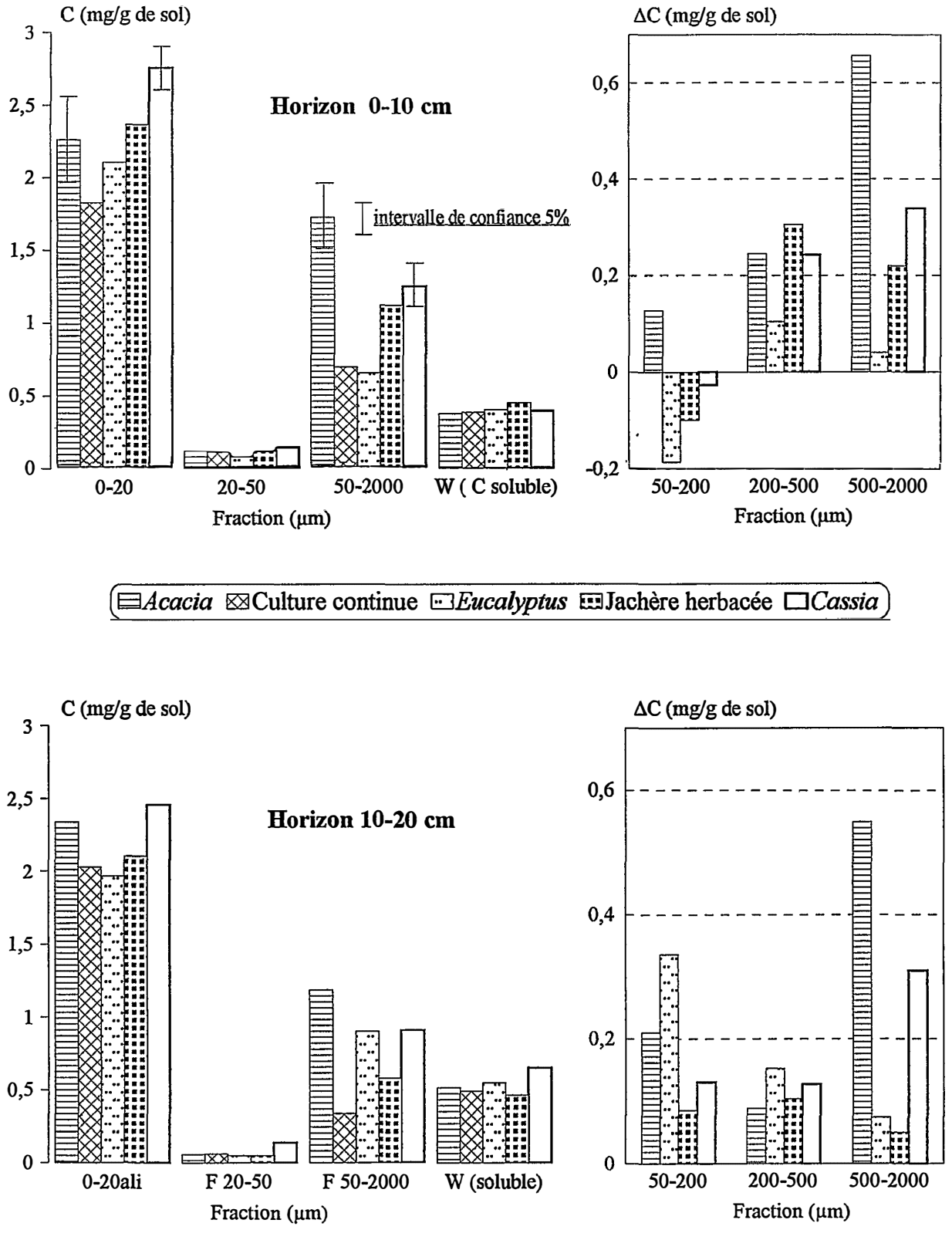


Figure 20 : Contribution des différentes fractions, au carbone des horizons 0-10 cm et 10-20 cm (C) dans les diverses situations de Ngong en 1995 et contribution des factions grossières (> 50µm) à la différence (ΔC) entre la culture et les jachères.

La figure 20 donne la contribution des compartiments granulométriques au C total des horizons 0-10 cm et 10-20 cm dans les différents traitements en 1995. Si on exclut la situation particulière du *Cassia*, il ressort, pour l'horizon 0-10 cm, que la fraction 50-2000 µm montre l'écart maximal entre les traitements. Ainsi, la plus forte teneur en C total du sol de l'*Acacia* par rapport à la jachère herbacée et à l'*Eucalyptus* (tableau 4) correspond à une plus forte teneur en fractions organiques grossières. Toujours en conformité avec les résultats mentionnés au tableau 4, l'*Eucalyptus* ne se montre apparemment pas supérieur à la culture dans l'apport de MO figurée au sol et la jachère herbacée présente une position intermédiaire entre la culture et l'*Acacia*.

La similitude des contenus en C total de l'horizon 0-10 cm des traitements *Acacia* et *Cassia* (figure 16) masque des différences significatives dans la taille des compartiments 0-20 µm et 50-2000 µm (figure 20). Sous le *Cassia*, installé hors du dispositif, la plus grande quantité de matière organique liée à la fraction fine malgré la plus faible teneur en C de cette fraction (31 g/kg de fraction au lieu de 35 sous *Acacia*) est due à la plus grande richesse du sol en éléments fins (9% au lieu de 6,5% sous *Acacia* d'après les fractionnements). D'autre part, la plus faible contribution du compartiment 50-2000 µm au C du sol sous *Cassia* indique une moindre incorporation de matériel végétal figuré à la MOS. Ces résultats confirment que l'effet du *Cassia* sur le statut organique du sol est plus proche de celui de la jachère herbacée que de l'*Acacia*.

La partie droite de la figure 20 montre, pour l'horizon 0-10 cm, que la contribution des fractions grossières à la variation du taux de C entre culture et *Acacia* croit avec la taille des fractions. La fraction 500-2000 µm sous *Acacia*, contient des folioles entières, ce qui peut expliquer son abondance. La forte masse de racines fines des horizons supérieurs des espèces *Acacia* et *Cassia* (voir paragraphe 142, chapitre IV) contribue aussi à faire augmenter la taille de cette fraction. Sous *Eucalyptus* la fraction 500-2000 µm est particulièrement faible en raison du fractionnement lent de la litière qui se décompose de façon importante par perte d'hydrosolubles et minéralisation du C (BERNHARD-REVERSAT, 1987a).

Les fractions de l'horizon 10-20 cm (figure 20) participent sensiblement de la même façon au C total du sol que celles de l'horizon 0-10 cm. Sous jachère herbacée, les fractions les plus grossières sont beaucoup moins abondantes que dans l'horizon 0-10 cm, suggérant un effet superficiel de ce traitement sur la MO du sol.

Les teneurs en carbone et azote de la fraction fine des horizons 0-10 cm et 10-20 cm sont les plus élevées sous *Acacia* et les plus faibles sous *Eucalyptus*. Ces tendances seront discutées lors de l'étude diachronique de l'évolution des compartiments organiques du sol.

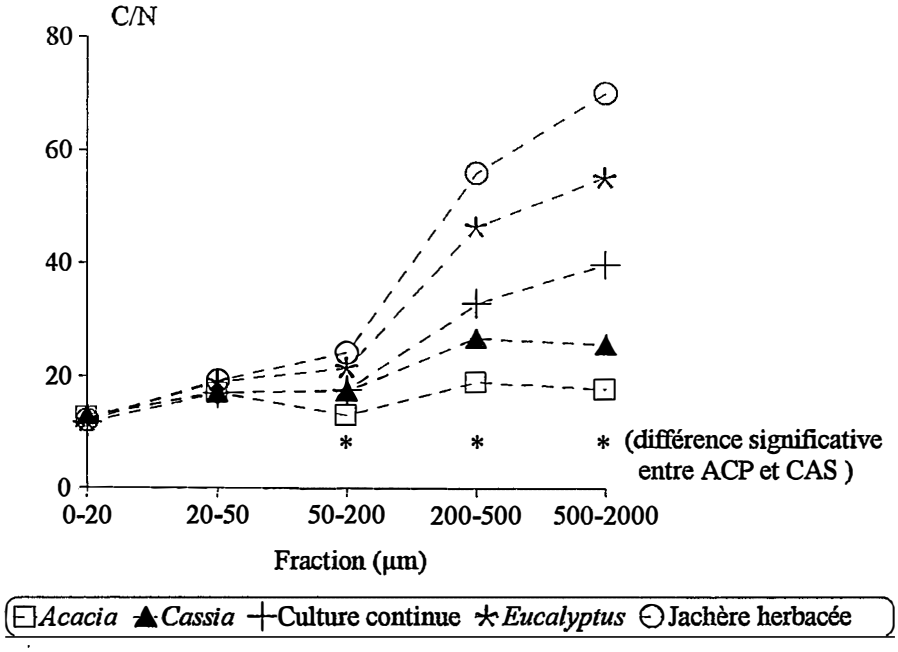


Figure 21 : C/N des fractions organiques de l'horizon 0-10 cm à Ngong en 1995.

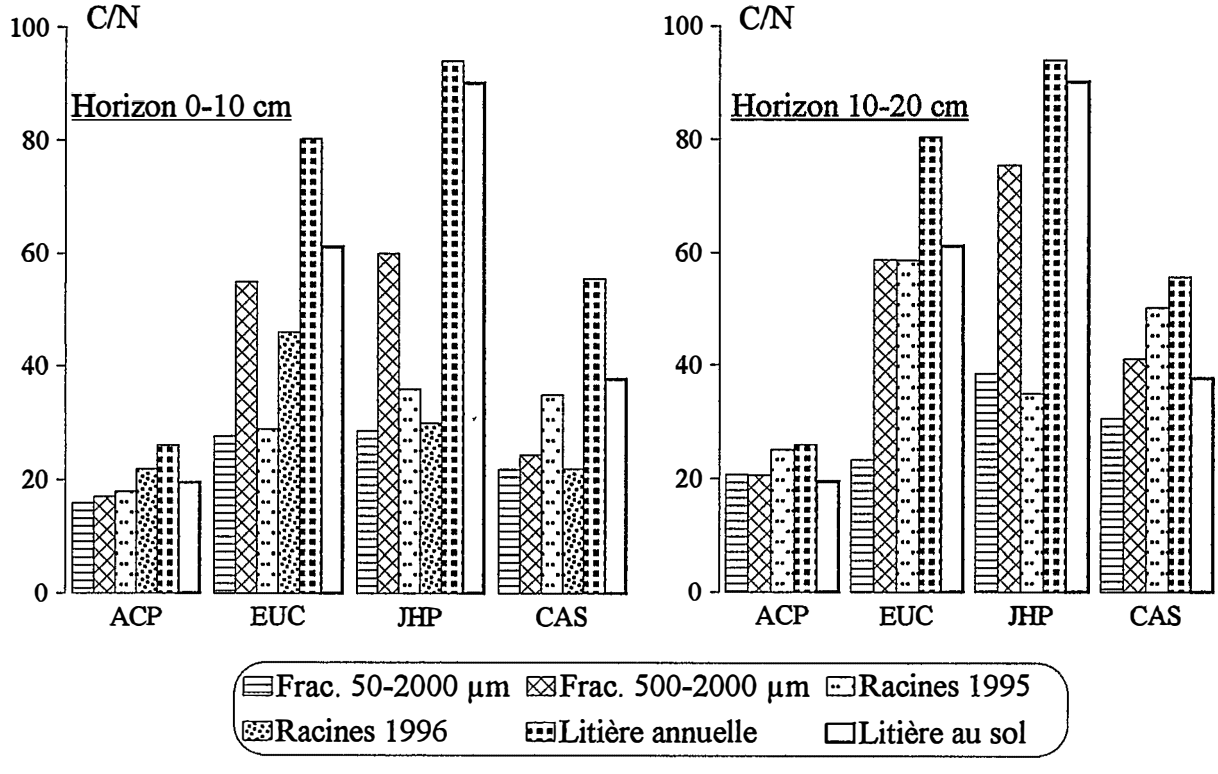


Figure 22 : Comparaison des C/N des fractions grossières du sol de Ngong aux C/N des apports organiques au sol.

- Etude de la nature des fractions organiques du sol par analyse de leur C/N

Sous réserve d'avoir atteint un bon état de dispersion du sol au cours du fractionnement, le rapport C/N apparaît comme un bon indicateur de la nature des fractions (FELLER, 1995). La figure 21 montre que le C/N diminue avec la taille des fractions quelle que soit la situation, indiquant un état de décomposition et d'humification croissant des débris végétaux. La baisse du C/N est d'autant plus rapide que celui-ci est élevé et correspond à la perte de C facilement minéralisable.

Les C/N des fractions fines ne diffèrent pas entre les traitements. Les C/N du compartiment organique figuré (50-2000 µm) des sols de jachère se classent dans l'ordre décroissant suivant : *Acacia* < *Cassia* < *Eucalyptus* < Jachère herbacée. Ils peuvent être mis en parallèle avec les C/N des apports organiques au sol (figure 22). Pour les deux horizons 0-10 et 10-20 cm, les C/N de la fraction la plus grossière (500-2000 µm) et du compartiment figuré entier (50-2000 µm) sont corrélés significativement avec les C/N des apports annuels de litière au sol, les coefficients respectifs étant r = 0,94 (P = 0,0002) et r = 0,79 (P = 0,01). Par conséquent, la composition des fractions organiques du sol est directement influencée par la qualité des apports organiques en particulier leur teneur en azote. Les plantes herbacées de la jachère naturelle, les plus pauvres en azote, fournissent la MOS à plus fort C/N. Les espèces ligneuses légumineuses comme *Acacia* présentent la MOS à plus faible C/N, la plus facilement minéralisable. Les arbres non fixateurs d'azote procurent un C/N intermédiaire des situations précédentes.

Le C/N des fractions n'est pas corrélé significativement avec le C/N des racines même si celui-ci est plus faible que le C/N des litières et donc plus proche de celui de la MOS. Comme le suggèrent les résultats des deux prélèvements de 1995 et 1996 (figure 22), le C/N des racines varie au cours des phases successives du cycle végétatif et en fonction de l'importance relative des racines mortes ou vivantes. Aussi, ces deux prélèvements ne sont pas forcément représentatifs de la MOS prélevée en juillet 95.

Concernant la participation relative des racines et des litières aériennes au renouvellement des fractions organiques grossières du sol, on doit considérer, comme nous l'avons vu plus haut, que le C/N diminue rapidement au cours de la phase de décomposition. La figure 22 suggère que sous jachère herbacée la fraction 500-2000 µm contient plutôt des débris de litière, ce qui expliquerait sa relative abondance dans l'horizon supérieur (figure 20). Sous *Eucalyptus*, dans l'horizon 0-10 cm, on peut penser également que la fraction la plus grossière est alimentée par la litière alors que dans l'horizon 10-20 cm, le C/N de la fraction est confondu avec celui des racines.

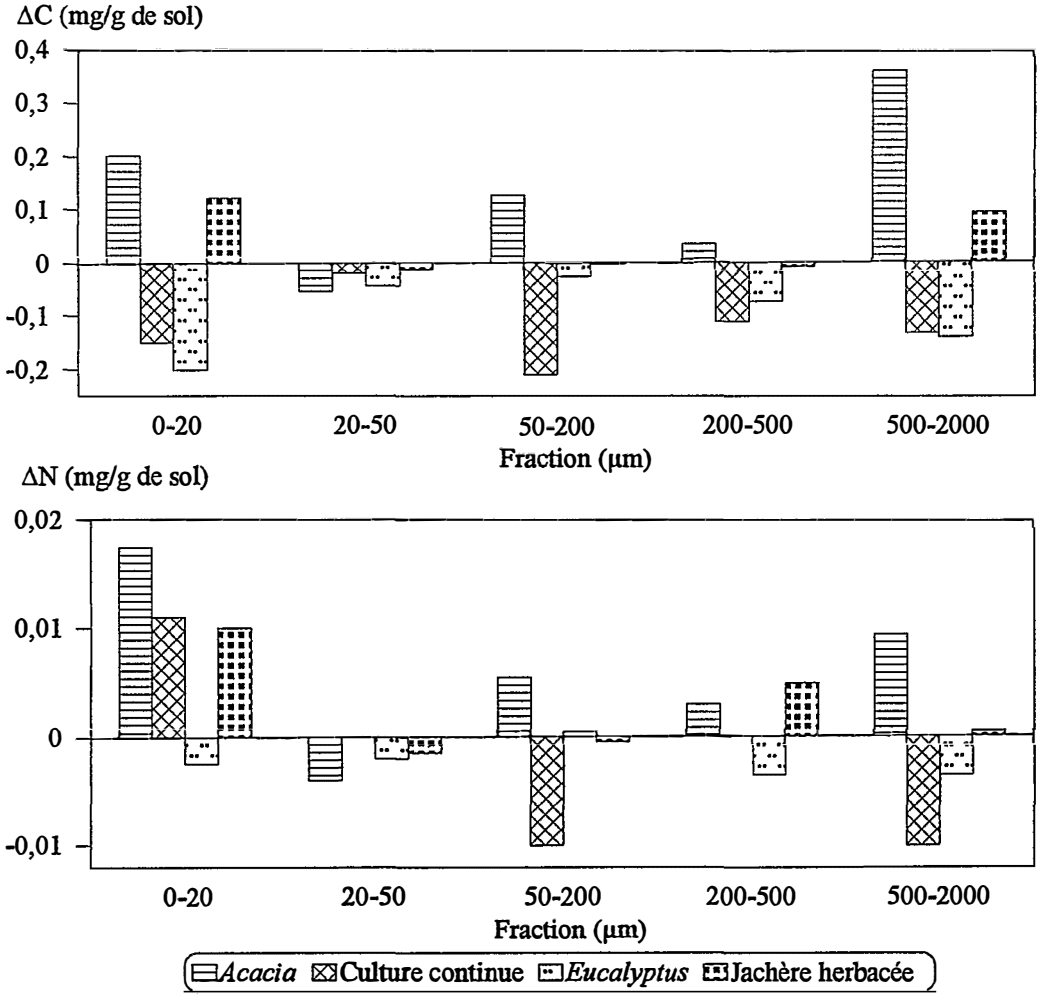


Figure 23 : Variations des contenus en carbone total (ΔC) et azote total (ΔN) (mg/g de sol) des différentes fractions granulométriques de l'horizon 0-20cm à Ngong entre 1989 et 1995.

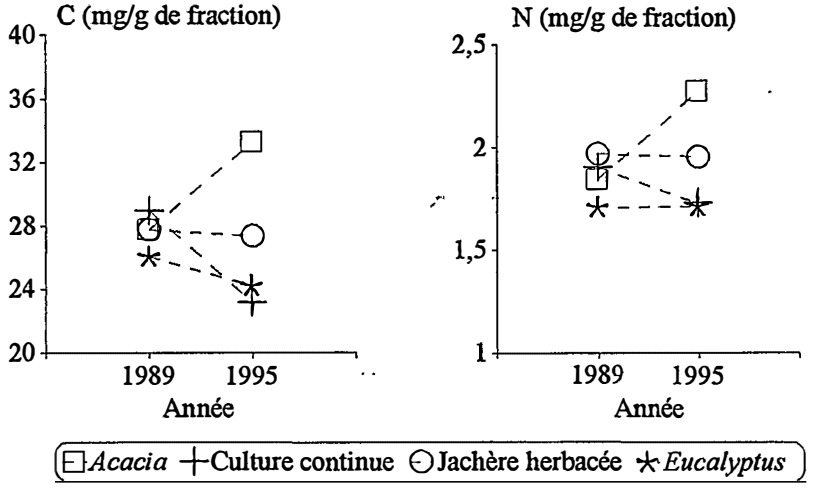


Figure 24 : Evolution des teneurs en C et N de la fraction organominérale (0-20 µm) de l'horizon 0-20 cm à Ngong entre 1989 et 1995.

Dans les autres situations, il n'est pas possible de se prononcer dans la mesure où le C/N des fractions est toujours inférieur au C/N des différentes sources organiques.

232. Analyse diachronique des différentes fractions organiques du sol

Dans chaque parcelle du bloc 3b de Ngong, hormis le cas du *Cassia* dont la situation de départ n'a pas été caractérisée, l'échantillon de sol de l'horizon 0-20 cm de 1989, utilisé pour l'analyse de C et N totaux (paragraphe 22 de ce chapitre) a été comparé à un échantillon du même horizon composite de 8 prélèvements effectués en juillet 1995. Le nombre d'échantillons utilisés ne permet pas de mettre en évidence des variations significatives des caractéristiques des fractions organiques, mais les tendances observées peuvent expliquer les évolutions mentionnées au paragraphe 22 de ce chapitre.

Entre l'échantillon de 1989 et celui de 1995, la masse totale (argile + limons + MO) de la fraction fine (0-20 µm) est en légère baisse sous *Eucalyptus* (-2%), diminue plus fortement sous *Acacia* (-10%) et augmente sous culture (+17%) et jachère herbacée (+7%) en liaison avec le niveau d'échantillonnage trop faible pour éliminer la variabilité de la texture du sol à l'échelle de la parcelle. Par conséquent, les teneurs en C et N de la fraction 0-20 µm seront utilisées comme indicateurs d'évolution de la fixation de la MO par la fraction fine plutôt que la participation de la fraction au carbone et à l'azote du sol.

La figure 23 montre que dans les situations *Acacia* et culture continue, les participations respectives des fractions fines (0-20 µm) et des fractions grossières (50-2000 µm), aux variations du C total du sol, sont approximativement de l'ordre de 30% et 70%. Cela confirme le rôle majeur joué par les débris végétaux dans la dynamique à court terme de la MOS.

Sous culture continue, toutes les fractions contribuent à la baisse du taux de carbone total du sol. La minéralisation des fractions fines est confirmée par la baisse générale de leur teneurs en C et N observée sur la figure 24.

Sous *Acacia*, la forte augmentation de la fraction grossière (500-2000 µm) confirme l'incorporation de la litière à la MOS sous forme de débris végétaux. De plus, l'accroissement des teneurs en C et N de la fraction fine suggère une augmentation des formes de MO humifiées. On sait que la fraction fine comporte des débris végétaux très décomposés mais aussi des produits de l'activité bactérienne et fongique et des exsudats racinaires (FELLER, 1995). Par conséquent, cette situation traduit l'importance des processus biologiques dans le sol sous *Acacia* comme la minéralisation de l'azote (chapitre V) et l'incorporation progressive de la litière à la matière

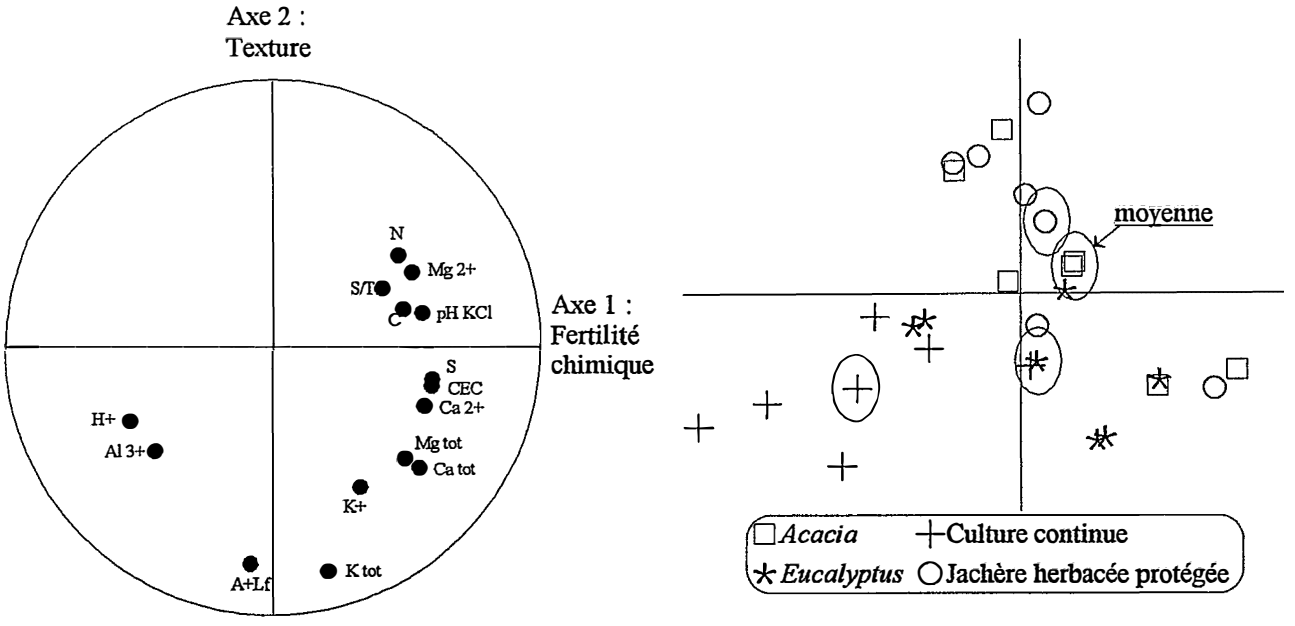


Figure 25 : Analyse en composantes principales des caractéristiques de l'horizon 0-10 cm à Ngong en 1995.

Tableau 5 : Corrélations entre la CEC, le carbone et les éléments fins du sol (argile + limons fins) dans les horizons de surface.

Année	Site	Horizon (cm)	r_1	Niveau de signification de r_1	r_2	Niveau de signification de r_2
1989	Ngong	0-20	0,41	0,09	- 0,2	ns
1989	Ngong	20-40	0,03	ns	-0,2	ns
1995	Ngong	0-10	0,82	0,0001	-0,03	ns
1995	Ngong	10-20	0,73	0,0001	0,11	ns
1995	Ngong	20-40	0,70	0,0001	0,10	ns
1995	Mayo Dadi	0-10	0,76	0,0002	0,14	0,10
1995	Mayo Dadi	10-20	0,65	0,0064	0,12	ns
1995	Mayo Dadi	20-40	0,44	ns	0,55	ns

r_1 : coefficient de corrélation entre la CEC et le carbone du sol
r_2 : coefficient de corrélation entre la CEC et les éléments fins du sol

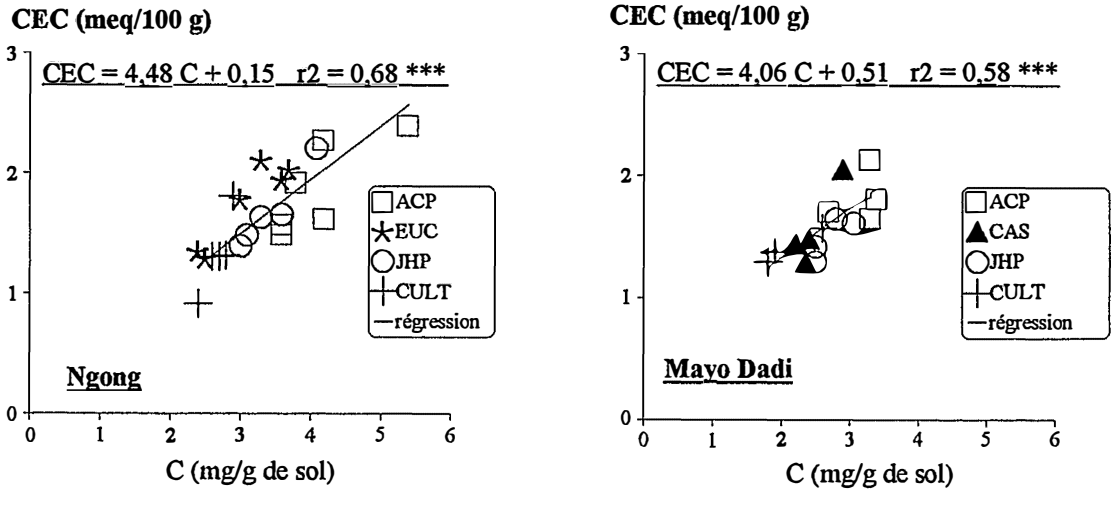


Figure 26 : Relations entre la CEC et le carbone du sol dans l'horizon 0-10 cm en 1995.

organique du sol par fragmentation et humification (BERNHARD-REVERSAT, 1987a, 1988). A ce sujet, ce dernier auteur observe sous *Acacia seyal* une bonne minéralisation de l'azote dans les fractions comprises entre 50 et 500 µm et une très faible production d'azote minéral dans les mêmes fractions, résistantes à la dégradation, sous *Eucalyptus*.

Sous jachère herbacée, dans l'horizon 0-20 cm, on observe peu d'évolution des fractions grossières (figure 23) confirmant l'incorporation superficielle de débris végétaux au sol mise en évidence par l'étude synchronique (paragraphe 231). D'autre part, les teneurs en C et N de la fraction fine se maintiennent au cours du temps (figure 24). Ces faits traduisent la stabilisation du statut organique du sol par la jachère herbacée de 4 ans.

Sous *Eucalyptus*, la figure 23 ne montre pas d'incorporation de MO au sol sous forme de débris végétaux, elle indiquerait plutôt une dépréciation des fractions grossières sans qu'on puisse toutefois l'affirmer. La figure 24 montre peu d'évolution des teneurs en C et N de la fraction fine entre 1989 et 1995, indiquant une certaine stabilité de cette fraction.

3. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MINERALES DU SOL

31. Comparaison des caractéristiques minérales du sol sous les différents traitements en 1995

- Corrélations entre les différentes variables dans l'horizon 0-10 cm à Ngong

Une ACP pour 14 variables édaphiques est schématisée sur la figure 25. La variabilité est expliquée par le plan principal pour 68%. L'axe 1 peut être assimilé à un axe de "fertilité", étant fortement corrélé à la CEC, S, Mg^{2+}, Ca^{2+}, pHKCl, C, Ca tot, Mg tot et H^+. Les mêmes variables, exceptées H^+ sont fortement intercorrélées positivement ($0,7 < r < 0,99$). Les variables d'acidité d'échange H^+ et Al^{3+} sont corrélées négativement avec toutes les autres variables ($0,56 < r < 0,90$). Le potassium échangeable (K^+), très peu abondant dans ce sol à kaolinite (teneur < 0,10 meq/100 g), est l'élément majeur le moins bien corrélé avec le carbone, la CEC et les autres bases. Enfin les moyennes des différents traitements se placent le long de l'axe 1 selon l'ordre décroissant suivant : ACP≥ JHP≥ EUC≥ CULT.

L'axe 2 correspond à la texture. Les traitements ACP et JHP ont, en moyenne, des textures légèrement moins argileuses, indiquant une situation de départ moins favorable qu'EUC et CULT.

Tableau 6 : Caractéristiques minérales des sols de Ngong et Mayo Dadi en 1995. Les analyses sont faites indépendamment pour chaque site et chaque horizon. Le seuil de signification de l'ANOVA est précisé (*, **, ***) ; les lettres a, b et c indiquent les groupes homogènes.

Ngong

Traitement	Horizon (cm)	Arg. +lim. (%)	pHeau	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Al^{3+}	Mn^{2+}	H^{+}	S	CEC	S/T	P ass. (ppm)	Ca total	Mg total	K total	P total (ppm)
				(meq/100g)											(meq/100g)			
Acacia	0-10	6,9	6,33 a**	1,19	0,41 a***	0,07	0,02	0,00	0,09	0,00	1,69 a*	1,88 a*	0,90	5,38	1,86	1,25 a*	4,66	67,7
	10-20	8,3	6,05	0,94	0,22	0,09	0,01	0,01	0,09	0,02	1,27	1,53	0,82 ab*	8,89	2,02	2,01 a***	5,32	89,1 a*
	20-40	11,3	5,68	0,73	0,18 a*	0,07 a*	0,01	0,03	0,11	0,03	0,99	1,15	0,86 a*	6,08	1,47 a*	1,60	5,86	82,0 a*
	40-60	20,8	5,35	1,08	0,37	0,05	0,02	0,05	0,12	0,07	1,54	1,82	0,85	3,00				
	60-70	31,8	5,72	1,72	0,67	0,05	0,02	0,05	0,07	0,05	2,46	2,73	0,90	3,33				
	70-90	38,4	5,80	2,09	0,90	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	3,08	3,40	0,91	3,62				
Eucalyptus	0-10	6,4	6,45 a**	1,15	0,30 b***	0,10	0,02	0,00	0,08	0,00	1,57 a*	1,74 a*	0,90	5,65	1,93	1,28 a*	4,96	78,2
	10-20	9,2	5,84	0,79	0,20	0,07	0,01	0,02	0,11	0,03	1,07	1,37	0,78 b*	8,17	1,44	1,31 b***	5,29	79,2 ab*
	20-40	11,7	5,57	0,51	0,18 a*	0,05 b*	0,02	0,05	0,14	0,04	0,75	1,00	0,74 b*	4,22	0,94 b*	1,45	5,88	75,9 ab*
	40-60	21,5	5,18	0,93	0,30	0,04	0,03	0,06	0,12	0,06	1,28	1,53	0,84	2,93				
	60-70	31,9	5,73	1,64	0,59	0,04	0,03	0,03	0,08	0,04	2,30	2,54	0,90	2,55				
	70-90	36,6	5,90	1,91	0,74	0,06	0,03	0,02	0,04	0,03	2,74	2,88	0,95	4,79				
Jachère herbacée protégée	0-10	7,4	6,41 a**	1,13	0,35 ab***	0,07	0,02	0,00	0,07	0,00	1,56 a*	1,67 ab*	0,93	5,62	1,71	1,19 ab*	4,12	73,1
	10-20	9,7	5,99	0,95	0,20	0,07	0,01	0,02	0,07	0,02	1,24	1,42	0,86 a*	6,97	1,59	1,33 b***	4,71	72,4 b*
	20-40	11,4	5,64	0,65	0,14 ab*	0,06 ab*	0,02	0,03	0,06	0,03	0,86	1,00	0,85 a*	4,85	1,10 b*	1,31	4,99	69,0 b*
	40-60	26,2	5,10	1,07	0,26	0,05	0,02	0,08	0,06	0,06	1,40	1,65	0,85	5,16				
	60-70	34,7	5,75	1,82	0,52	0,04	0,02	0,06	0,04	0,05	2,41	2,68	0,90	2,65				
	70-90	39,3	6,00	2,27	0,78	0,07	0,03	0,03	0,02	0,03	3,13	3,08	1,03	2,89				
Culture continue	0-10	8,3	6,05 b**	0,85	0,19 c***	0,06	0,02	0,01	0,08	0,02	1,11 b*	1,26 b*	0,88	12,11	1,52	1,07 b*	4,52	75,9
	10-20	10,1	5,82	0,73	0,18	0,06	0,01	0,03	0,09	0,03	0,99	1,29	0,74 b*	13,72	1,54	1,40 b***	5,08	88,0 a*
	20-40	11,7	5,54	0,49	0,12 b*	0,04 b*	0,02	0,05	0,08	0,04	0,68	0,84	0,81 ab*	9,06	1,08 b*	1,35	5,13	84,8 a*
	40-60	20,3	5,17	0,93	0,28	0,07	0,02	0,07	0,09	0,07	1,30	1,59	0,82	3,28				
	60-70	29,9	5,75	1,79	0,56	0,07	0,04	0,03	0,04	0,04	2,45	2,66	0,92	2,97				
	70-90	36,4	5,87	2,29	0,80	0,06	0,03	0,02	0,02	0,03	3,17	3,38	0,94	6,13				

Suite du tableau 6.

Mayo Dadi

Traitement	Horizon (cm)	Arg. +lim. (%)	pHeau	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Al^{3+}	Mn^{2+}	H^{+}	S	CEC	S/T	P ass. (ppm)
				(meq/100g)										
Acacia	0-10		6,54	1,23	0,33 a*	0,12	0,02	0,00	0,06	0,00	1,69	1,82	0,93 ab*	9,35
	10-20		6,36	1,28	0,32 a*	0,09	0,01	0,00	0,08	0,01	1,71	1,89	0,90	6,33
	20-40		5,74	1,17	0,34	0,07	0,02	0,00	0,08	0,02	1,61	1,77	0,91	4,19
	40-60		5,55	1,06	0,45	0,05	0,02	0,02	0,15	0,04	1,58	1,84	0,86	4,52
Cassia	0-10	8,9	6,79	1,16	0,28 a*	0,07	0,01	0,00	0,04	0,00	1,52	1,56	0,99 a*	9,04
	10-20	11,1	6,35	0,98	0,28 a*	0,07	0,01	0,01	0,08	0,01	1,35	1,63	0,82	12,16
	20-40	13	5,49	0,83	0,27	0,07	0,02	0,02	0,09	0,03	1,18	1,37	0,86	10,12
	40-60	16,6	6,02	1,01	0,25	0,05	0,02	0,00	0,10	0,03	1,35	1,51	0,88	5,20
	60-70	19,2	5,17	1,36	0,33	0,06	0,02	0,00	0,09	0,03	1,79	1,95	0,91	4,50
	70-90	19,9	5,60	1,54	0,46	0,06	0,02	0,00	0,06	0,02	2,09	2,21	0,94	5,50
Jachère herbacée protégée	0-10	7,1	6,48	1,07	0,32 a*	0,07	0,03	0,00	0,06	0,00	1,48	1,48	1,00 a*	6,17
	10-20	10,6	6,15	1,04	0,29 a*	0,06	0,01	0,00	0,08	0,01	1,41	1,68	0,84	6,03
	20-40	12,9	5,33	1,05	0,28	0,07	0,02	0,04	0,08	0,03	1,40	1,60	0,87	4,70
	40-60	16,5	5,50	1,21	0,34	0,05	0,04	0,01	0,07	0,02	1,65	1,76	0,93	4,53
	60-70	18,6	5,70	1,65	0,48	0,06	0,02	0,00	0,05	0,04	2,22	2,35	0,94	7,10
	70-90	19,9	5,20	1,60	0,57	0,05	0,02	0,00	0,03	0,04	2,20	2,34	0,96	3,50
Culture continue	0-10	9	6,30	0,94	0,20 b*	0,06	0,01	0,00	0,06	0,00	1,21	1,40	0,86 b*	12,43
	10-20	10,7	6,15	1,00	0,20 b*	0,08	0,09	0,01	0,08	0,01	1,37	1,56	0,87	13,63
	20-40	12,4	5,73	0,86	0,20	0,06	0,02	0,02	0,08	0,03	1,14	1,26	0,89	8,40
	40-60	14,4	5,70	0,93	0,28	0,08	0,05	0,06	0,05	0,05	1,34	1,40	0,98	4,60
	60-70	16,9	6,10	1,18	0,37	0,07	0,02	0,11	0,04	0,06	1,64	1,73	0,97	12,00
	70-90	17,2	5,30	1,40	0,46	0,07	0,02	0,08	0,03	0,05	1,97	2,01	0,97	5,80

- Corrélations entre C et CEC dans les horizons de surface

Le tableau 5 donne, pour les horizons de surface, les coefficients de corrélation entre la CEC et les composantes principales du complexe absorbant à savoir le carbone et les éléments fins du sol (argile + limons fins). En 1989, à Ngong, la relation positive entre la CEC et le carbone est faible ($r_1 < 0,4$) et non significative. En 1995, la corrélation entre ces 2 variables est assez élevée et très hautement significative pour les horizons 0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm. La relation entre la CEC et le carbone a augmenté avec les variations positives ou négatives du taux de carbone suivant les traitements. Le coefficient de corrélation r_1 diminue avec la profondeur et diminue de Ngong à Mayo Dadi, en liaison avec un taux de carbone plus faible et également une plus faible variation de ce taux de C. Par ailleurs, l'absence de corrélation significative de la CEC avec les éléments fins ($r < 0,15$ à Ngong) et la relation positive entre C et CEC confirme que dans ces sols sableux à kaolinite la CEC est essentiellement due au carbone. La figure 26 illustre la relation linéaire existant entre la CEC et le carbone dans l'horizon 0-10 cm et fait apparaître une certaine hiérarchie entre les traitements, indiquant l'effet du mode de gestion du sol sur l'évolution simultanée du taux de carbone et de la CEC.

- Comparaison des sites

Les caractéristiques minérales du sol mentionnées sur le tableau 6 se montrent légèrement moins favorables en surface (horizons 0-40 cm) à Ngong qu'à Mayo Dadi. Cependant, à partir de 60 cm de profondeur la tendance est inversée et la CEC et la somme des bases sont toujours plus élevées à Ngong en liaison avec un taux d'argile plus fort.

- Comparaison des traitements (ANOVA)

Le tableau 6 met en évidence peu de différences significatives entre les traitements. A Ngong, on constate un effet du traitement sur le pH, le magnésium échangeable, le K échangeable, la somme des bases, la CEC, le magnésium total, le calcium total et le taux de saturation. Les effets significatifs des modes de gestion du sol sur les variations du taux de C se répercutent sur les caractéristiques minérales qui montrent cependant une évolution moins rapide. La hiérarchisation des traitements jachères n'apparaît de façon significative que pour quelques composantes : Mg^{2+} fortement corrélé avec le carbone, K^+, Mg total et S/T.

Dans l'horizon 0-10 cm, la forte saturation du complexe absorbant est due aux apports d'éléments par les litières compensant les prélèvements par les plantes. Dans les horizons 10-20 et 20-40 cm, on constate une tendance à la désaturation du complexe absorbant car les prélèvements sont certainement moins compensés par les apports. La désaturation plus importante dans les *Eucalyptus* que dans les autres jachères est à mettre en relation avec la forte concentration des racines fines de cette espèce dans les horizons 10-20 et 20-30 cm (voir chapitre IV). Enfin les tendances observées permettent de classer les traitements quand à leur effet sur la fertilité minérale selon l'ordre décroissant déjà obtenu pour le C :

Acacia ≥ *Cassia* = jachère spontanée herbacée ≥ *Eucalyptus* ≥ culture continue.

Le niveau plus élevé de phosphore assimilable dans la culture continue est dû à l'apport de fumure minérale sur ce traitement depuis 1989-90. Cela confirme l'effet généralement favorable des fumures sur le taux de phosphore assimilable mentionné par PIERI (1989).

32. Analyse diachronique des caractéristiques minérales du sol

La méthode est la même que celle utilisée pour la dynamique de la MO (paragraphe 22 de ce chapitre). L'évolution des variables CEC, S et Mg^{2+} de l'horizon 0-20 cm à Ngong est représentée sur la figure 27. Ce sont les seules caractéristiques ayant montré des variations statistiquement significatives au cours des 4 années considérées. Les variations de ces caractéristiques minérales sont significativement corrélées avec les variations du carbone ($0,56 < r < 0,64$).

Les baisses des taux de C sous culture continue et *Eucalyptus* s'accompagnent de baisses significatives de la CEC. Par contre, l'augmentation significative du taux de C sous *Acacia* ne correspond pas à une augmentation de CEC. On sait, d'après FELLER (1995), que pour un sol de même minéralogie et de texture un peu plus fine (argile + limons fins = 14%), la CEC organique représente 68% de la CEC totale. Elle augmente fortement des fractions grossières (100 cmole/g C de fraction 20-2000 µm) vers les fractions fines (1000 cmole/g C de fraction 0-0,2 µm). Ce sont les fractions inférieures à 20 µm et particulièrement celles inférieures à 2 µm qui contribuent le plus à la CEC organique. Par conséquent, les variations maximales de CEC, selon le mode de gestion des sols, sont limitées puisque les variations de carbone concernent prioritairement les fractions supérieures à 20 µm.

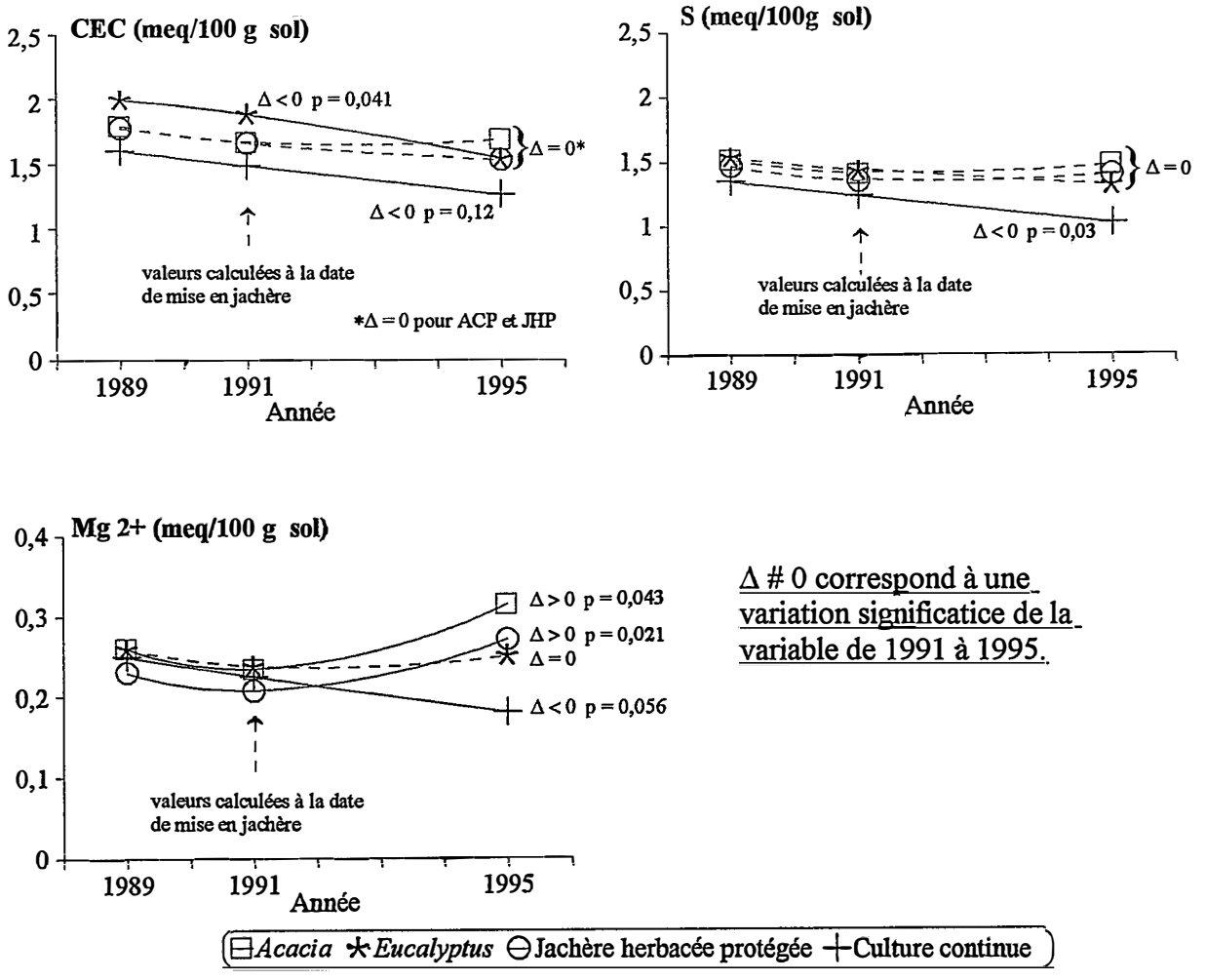


Figure 27 : Evolution de quelques caractéristiques minérales de l'horizon 0-20cm du sol de Ngong.

En situation de culture continue (CULT), on observe une baisse significative de la CEC de 0,32 meq/100 g sol en 6 ans soit une perte de 3,7% par an. Dans cette situation, la perte dérisoire imputable aux fractions organiques grossières est de l'ordre de 0,05 meq/100 g de sol[5]. De même, sous *Acacia* l'augmentation de CEC due à la fraction supérieure à 20 µm est au plus de 0,07 meq/100 g de sol[6].

N'ayant pas étudié les différentes fractions du compartiment organominéral contribuant à environ 30 % des variations du carbone du sol, il n'est pas possible de chiffrer son effet sur les variations de la CEC. Il semble cependant que la minéralisation touche la fraction organique la plus fine (0-2 µm) comportant 45 à 70 % des sites organiques d'échange selon FELLER (1995).

---

(5) Fraction 20-2000 µm : -0,47 mg C/g sol * 100 cmole/kg fraction ÷ 1000 = - 0,047 meq/100 g sol

(6) 0,70 mg C/g sol * 100 cmole/kg fraction ÷ 1000 = + 0,07 meq/100 g sol

Au Sénégal, BERNHARD-REVERSAT (1988) constate que la fraction organominérale (0-50 µm) sous *Eucalyptus* fournit 80% de l'azote disponible pour la végétation et sous *Acacia*, 30 à 50%. Elle constate également que la minéralisation du carbone est aussi importante dans la fraction organominérale que dans les fractions grossières.

Sous culture continue, on observe une baisse significative entre 1989 et 1995 de la somme des bases échangeables et de Mg^{2+}. La désaturation du complexe absorbant entraînant une baisse sensible du pH (étude synchrone), a pu avoir également un effet dépressif sur la CEC du sol, à la fois sous culture et *Eucalyptus*.

Concernant l'augmentation du compartiment organo-minéral sous *Acacia*, on peut penser qu'il s'agit dans un premier temps de l'addition au compartiment organo-limoneux (2-20 µm), de débris végétaux très décomposés, assez peu efficaces dans les propriétés d'échange cationique (FELLER, 1995). Il s'en suivrait une augmentation très faible de la CEC du sol.

Ces hypothèses sur l'évolution du complexe absorbant n'ont toutefois pas pu être vérifiées dans le cadre de cette étude.

Sous jachère, la seule évolution positive de 1991 à 1995 correspond à un accroissement significatif de Mg^{2+} sous ACP et JHP dû au recyclage de cet élément par la litière et le pluviolessivage.

En conclusion, l'amélioration progressive de la fertilité minérale des horizons de surface du sol sous jachère est très lente. L'augmentation de la CEC induite par l'accroissement du taux de MO du sol n'est pas mise en évidence en 4 ans. L'enrichissement en bases échangeables dû à la saturation du complexe absorbant favorisée par le recyclage des cations n'est effectif que pour le magnésium. Enfin, le stockage de réserves minérales dans la MOS plus ou moins facilement minéralisable améliore la disponibilité en nutriments pour les plantes de la jachère et la culture suivante.

4. EVOLUTION DE LA MACROFAUNE DU SOL

Les analyses présentées dans ce chapitre sont issues ou construites à partir du travail de Dominique BERGEAL et Sophie GUIBON effectué en 1994 dans le cadre d'un stage que nous avons encadré sur le terrain.

Les résultats sont exprimés pour un ensemble de sept taxons définis (Vers de terre,

Termites, Myriapodes, Fourmis, Diptères, Coléoptères, Arachnides) et un ensemble des autres taxons, en densité (nombre d'individus par m^2) et en biomasse (g/m^2). Les résultats sont également donnés en fréquence, indice de biodiversité exprimant l'importance de la dissémination des taxons dans le volume de sol considéré. Cette grandeur utilisée par BERNHARD-REVERSAT et al. (1996) est exprimée en pourcentage. Elle est obtenue en divisant le nombre total de présences de chaque taxon dans chacun des traitements par le nombre total d'observations possibles par traitement. Dans notre cas, le nombre total d'observations par traitement est de : 4 couches dont la litière x 10 répétitions x 8 taxons = 320. Si on recherche la fréquence par couche, ce nombre est de 10 x 8 = 80.

- Analyse générale

L'expression des résultats par la densité (tableaux 7 et 8) montre une assez grande dispersion influencée par celles des Fourmis et Termites. Alors que ces deux taxons constituent les groupes dominants au niveau des densités (44 % à 90 %), ils deviennent négligeables au niveau des biomasses et cèdent la place aux Vers de terre qui représentent 60% à 99% des biomasses totales et dans une moindre mesure aux Coléoptères.

Les diagrammes de fréquence (figure 28) indiquent que la macrofaune est moins fréquente dans la culture continue que dans les jachères et la savane naturelle. Il semble également qu'il existe une meilleure distribution de la biodiversité dans les jachères arborées et herbacées protégées (ACP, EUC, CAS, JHPng) que dans les systèmes pâturés et parfois brûlés (SAV, JHD,

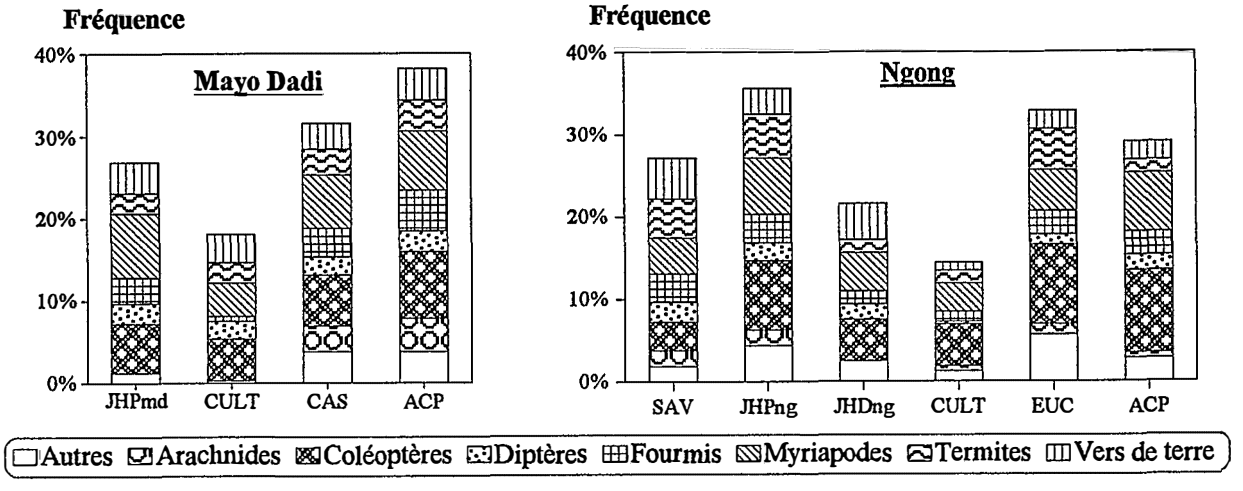


Figure 28 : Diagrammes de fréquence d'observation des différents taxons dans les différents traitements (au maximum 4 x 10 répétitions x 8 taxons = 320 observations par colonne).

JHPmd). Cela s'explique en partie par la très faible biodiversité, c'est à dire le petit nombre voire l'absence de taxons rencontré dans la couche de litière des systèmes pâturés ou brûlés.

- Etude par groupe

Cette étude s'appuie sur les résultats de densité et de biomasse (tableaux 7 et 8).

Les taxons **Fourmis** (Insectes Hyménoptères) et **Termites** (Insectes Isoptères) ne présentent aucune différence significative entre les traitements en raison des forts écarts types qui les caractérisent. Ceci reflète la répartition géographique agrégative de ces groupes au sein de nids ou de galeries, rendant imparfaite la méthode utilisée pour leur quantification. Néanmoins, il est dommage de ne pas pouvoir différencier les traitements vis à vis de ces taxons étant donné le rôle important qu'ils peuvent jouer dans la structure et la chimie des sols.

Enfin, aucune observation sur les termites n'a été faite en saison sèche, correspondant à une période de forte activité (DUBOISSET A., communication personnelle). MANLAY et al. (1995) mentionnent également l'importance des termites en saison sèche dans la décomposition de la nécromasse racinaire accumulée en phase de jachère.

Le groupe des **Diptères** (Insectes Diptères) est surtout constitué de larves. Il présente des densités et des biomasses quasi identiques dans tous les traitements. L'absence de différence significative entre les traitements semble être ici le reflet d'une réalité biologique à savoir que le mode de gestion du sol a peu d'influence sur ce taxon.

Les **Coléoptères** (Insectes Coléoptères) se présentent à la fois sous forme de larves et sous forme adulte. Le régime alimentaire et la niche écologique globale peuvent changer d'une forme à l'autre. On les classe en deux sous ordres selon leur régime alimentaire : les adéphages, espèces en général carnivores, et les polyphages : phytophages, détritivores, décomposeurs. Les Coléoptères sont plus abondants dans les jachères à *Acacia polyacantha* qu'ailleurs et de façon significative pour les deux sites. A Mayo Dadi, la biomasse est également significativement plus importante sous *Acacia* que dans les autres traitements. La présence des coléoptères sous *Acacia* est certainement liée à un habitat spécifique caractérisé par :

- un micro-climat particulier dû à l'ombrage plus fort qu'ailleurs,
- une litière plus riche en azote que dans la savane et les autres peuplements ligneux,

Tableau 7 : Densités moyennes (*ind./m²*) et biomasses moyennes (*g/m²*) de la macrofaune à Ngong (erreur standard). Source : BERGEAL & GUIBON, 1994.

Densités *ind./m²*	*Eucalyptus* (EUC)	*Acacia* (ACP)	Culture continue (CULT)	Jachère pâturée dégradée (JHDng)	Jachère herbacée protégée (JHPng)	Savane naturelle
Arachnides	***6*** (3,4) A,B	***3*** (2) A,B	***3*** (2) A,B	***0*** (0) B	***10*** (2,5) A	***10*** (3,4) A
Autres	***69*** (15) C	***22*** (7) D,E	***6*** (3,4) E	***18*** (7) D,E	***30*** (7) D,E	***11*** (3,4) D,E
Coléoptères	***133*** (18) G,H	***306*** (31) I	***42*** (10) H	***78*** (14) G,H	***144*** (29) F	***33*** (7) H
Diptères	***10*** (5) J	***13*** (5) J	***2*** (2) J	***16*** (8) J	***13*** (5) J	***18*** (9) J
Fourmis	***621*** (598) K	***190*** (100) K	***11*** (8) K	***214*** (204) K	***61*** (45) K	***210*** (130) K
Myriapodes - Iules	***42 - 27*** (12) M	***117 - 102*** (22) L	***88 - 88*** (50) L,M	***54 - 53*** (9) L,M	***110 - 91*** (23) L,M	***50 - 26*** (17) L,M
Termites	***552*** (266) N	***208*** (163) N	***56*** (34) N	***454*** (423) N	***541*** (275) N	***3405*** (3076) N
Vers de terre	***37*** (12) Q,R	***21*** (8) Q,R	***10*** (5) R	***192*** (26) O	***59*** (13) Q	***131*** (23) P

Biomasses *g/m²*	*Eucalyptus* (EUC)	*Acacia* (ACP)	Culture continue (CULT)	Jachère pâturée dégradée (JHDng)	Jachère herbacée protégée (JHPng)	Savane naturelle
Arachnides	***0,016*** (0,014) a,b	***0,008*** (0,008) b	***0,002*** (0,001) b	***0*** (0) b	***0,08*** (0,05) a	***0,026*** (0,016) a,b
Autres	***0,16*** (0,06) c	***0,04*** (0,02) c	***0,006*** (0,004) c	***0,045*** (0,026) c	***0,045*** (0,02) c	***0,68*** (0,66) c
Coléoptères	***2,6*** (0,5) d,e,f	***6,2*** (1,3) d,e	***0,5*** (0,18) f	***2,4*** (0,5) e,f	***6,3*** (1,7) d	***3,6*** (2,3) d,e,f
Diptères	***0,17*** (0,15) g,h	***0,31*** (0,15) g	***0,003*** (0,003) h	***0,18*** (0,16) g,h	***0,16*** (0,08) g,h	***0,03*** (0,02) g,h
Fourmis	***6,6*** (6,6) i	***0,3*** (0,3) i	***0,013*** (0,01) i	***0,18*** (0,12) i	***0,08*** (0,03) i	***0,16*** (0,11) i
Myriapodes	***2,5*** (1,5) k	***9,0*** (1,6) j	***0,24*** (0,12) k	***0,75*** (0,19) k	***2,4*** (0,9) k	***2,3*** (1,2) k
Termites	***0,32*** (0,16) l	***0,13*** (0,1) l	***0,04*** (0,03) l	***0,22*** (0,2) l	***0,35*** (0,13) l	***8,6*** (8,4) l
Vers de terre	***24*** (8,3) n	***23*** (8,5) n	***10*** (7) n	***179*** (36) m	***36*** (12) n	***124*** (28) m

Les ***moyennes*** et (écarts-types) sont calculés à partir de 10 échantillons pour chaque traitement. Tous les traitements non significativement différents à 95 % selon le test de Fisher, par rapport à un taxon donné, sont signalés par une lettre identique.

Tableau 8 : Densités moyennes (*ind./m²*) et biomasses moyennes (m²/ha)de la macrofaune de Mayo Dadi (erreur standard). Source : BERGEAL & GUIBON, 1994.

Densités *ind./m²*	*Cassia* (CAS)	*Acacia* (ACP)	Culture continue (CULT)	Jachère herbacée protégée (JHPmd)
Arachnides	*21* (5,4) A	*30* (7) A	*1,6* (1,6) B	*0* (0) B
Autres	*40* (13,3) C	*24* (6,8) C,D	*6,4* (6,4) D	*8* (3,6) D
Coléoptères	*72* (16) F	*139* (16,3) E	*38* (7,2) F	*69* (16,3) F
Diptères	*14,4* (4,7) G	*14,4* (4,4) G	*11,2* (4,2) G	*18* (7,3) G
Fourmis	*45* (25,6) H	*51* (13,2) H	*37* (35) H	*451* (432) H
Myriapodes - Iules	*118 - 94* (34) I	*101 - 92* (33) I	*29 - 27* (8,5) J	*149 - 112* (28) I
Termites	*146* (65,8) K	*1066* (630) K	*1085* (924) K	*72* (48) K
Vers de terre	*98* (23) L	*91* (16) L	*35* (7,5) M	*134* (28) L

Biomasses *g/m²*	*Cassia* (CAS)	*Acacia* (ACP)	Culture continue (CULT)	Jachère herbacée protégée (JHPmd)
Arachnides	*0,29* (0,13) A	*0,48* (0,40) A	*0,005* (0,004) A	*0* (0) A
Autres	*1,35* (1,3) B	*1,2* (0,8) B	*0* (0) B	*0,02* (0,02) B
Coléoptères	*2,7* (1,5) C	*10,4* (3,9) D	*2,1* (1,2) C	*1,7* (0,65) C
Diptères	*0,17* (0,09) E	*0,88* (0,52) E	*0,21* (0,18) E	*0,235* (0,09) E
Fourmis	*0,046* (0,02) F	*0,06* (0,02) F	*0,11* (0,11) F	*1,25* (1,17) F
Myriapodes	*3,16* (1,5) G	*1,63* (0,42) G,H	*0,35* (0,27) H	*1,11* (0,19) G,H
Termites	*0,11* (0,05) I	*1,57* (1,1) I	*0,12* (0,07) I	*0,1* (0,05) I
Vers de terre	*80,2* (30) J	*82,3* (17,8) J	*23,8* (8,2) J	*168,3* (33,6) K

Les *moyennes* et (écarts-types) sont calculés à partir de 10 échantillons pour chaque traitement. Tous les traitements non significativement différents à 95 % selon le test de Fisher, par rapport à un taxon donné, sont signalés par une lettre identique.

- et peut-être, une mésofaune plus abondante.

Les **Arachnides** (Arthropodes Chélicérates) sont globalement négligeables, tous traitements confondus. Leur comportement de prédateurs implique probablement que leur densité dans un milieu est liée à celle de leur proie. On ne les a pas trouvés dans 2 des 3 traitements "jachère herbacée" (JHPmd et JHDng).

Au sein des **Myriapodes** (Arthropodes), on distingue classiquement deux groupes : les Chilopodes (une paire de pattes par segment) et les Diplopodes (deux paires de pattes par segment). Les premiers sont des carnassiers tels que Géophiles et Scolopendres. Les seconds, tels que les Iules se nourrissent de végétaux décomposés.

Dans notre étude, le groupe des Myriapodes présente une répartition complexe tout comme celui des Arachnides. Contrairement à ces derniers, ils sont assez abondants et peuvent représenter jusqu'à 17% de la densité moyenne totale (cas de la jachère herbacée de Mayo Dadi). Ils sont généralement abondants dans les parcelles à *Acacia* ; d'ailleurs à Ngong, on y observe une biomasse significativement supérieure à celle des autres traitements. Les Iules consommateurs de végétaux décomposés représentent respectivement 92% et 73% des densités de Myriapodes sous *Acacia* à Ngong et Mayo Dadi. En dehors des *Acacia,* les Iules sont abondants sous *Cassia* et jachères herbacées. Ils sont très peu abondants sous *Eucalyptus*, peut-être en relation avec la mauvaise décomposition de la litière sous cette espèce.

Par ailleurs, l'importance des Coléoptères qui constituent des proies pour les Myriapodes prédateurs tel que les Chilopodes (Scolopendre) peut favoriser leur développement.

L'effet des **Vers de terre** (Annélides oligochètes) sur la structure du sol est important. Ils participent à la macroaggrégation du sol par leurs déjections sous forme de turricules. De plus, les anéciques et les endogés creusent des galeries qui améliorent la porosité, la capacité de rétention en eau et l'infiltration. Les Vers de terre participent activement au cycle de la matière organique et des nutriments. Dans tous les traitements, seulement deux catégories de vers de terre ont été rencontrées : des épi-endogés et des endogés mésohumiques. Cette faible diversité peut s'expliquer par la nature du climat de la zone étudiée. En effet, sous climat de plus en plus chaud, les épigés (vivant dans la litière) sont progressivement remplacés par les anéciques (vivant dans le sol et se nourrissant dans la litière), puis par les endogés mésohumiques (ingérant le sol des couches supérieures) et oligohumiques (ingérant le sol de couches plus profondes) (LAVELLE

et al., 1989).

Dans cette étude, les Vers de terre constituent un groupe très intéressant du point de vue de sa répartition dans les différents traitements. Les densités et les biomasses des traitements se répartissent dans l'ordre croissant suivant :

- Ngong : CULT ≤ ACP = EUC ≤ JHPng < SAV ≤ JHD ;
- Mayo Dadi : CULT ≤ ACP = CAS ≤JHPmd (*).

(*) Les traitements soulignés sont soumis au pâturage.

Il est intéressant de voir que les jachères herbacées, plus ou moins pâturées, ont des niveaux de population comparables à la savane également pâturée et significativement supérieurs aux autres traitements, en particulier la jachère herbacée non pâturée. L'effet positif du pâturage semble encore plus marqué sur les biomasses que sur les densités. Il faut préciser que les Vers de terre mésohumiques, contrairement au polyhumiques, ingèrent le sol sans faire aucune sélection et profitent, par conséquent, dans les zones pâturées d'une nourriture plus riche due à l'apport par les troupeaux de matière organique fécale qui se mélange à la terre.

Les jachères arborées semblent peu favorables, au moins dans le jeune âge, au développement des vers de terre, peut-être à cause de la capacité des arbres à assécher le sol qui a pu être mise en évidence à Ngong (voir chapitre V). Dans les plantations d'*Eucalyptus* et d'*Acacia* au Congo, les vers n'apparaissent qu'à partir d'une douzaine d'années (BERNHARD-REVERSAT F., communication personnelle).

La densité intermédiaire et la faible biomasse mesurées dans le traitement JHPng sont peut-être le reflet d'une dynamique de colonisation par les vers de terre. Le faible niveau de population est la conséquence de modalités de gestion de JHPng différentes de celles des autres jachères herbacées en particulier le traitement voisin JHDng. Parmi ces différences on peut recenser :

- la faible durée du traitement JHPng (4 ans),
- l'absence de pâturage et de restitutions organiques d'origine animale dans JHPng,
- le passé cultural de JHPng à savoir la culture du coton en 1988 et 1990 ayant fait l'objet de traitements insecticides,
- l'isolement des parcelles JHPng de petite taille (400 m²) au sein d'un dispositif comprenant des cultures et des jachères arborées.

Tableau 9 : Densités et biomasses de Vers de terre pour différents modes de gestion du sol à Ngong en 1995. Les valeurs d'une même variable indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil d'erreur de 5 %.

	Traitement				
	JHD ng	JHP ng	EUC	EUC pât.*	Seuil de signification
Densité (individus/m²)	116 a	107 a	26 b	75 ab	*
Biomasse (g/m²)	99 a	107 a	20 b	50 ab	*

* EUC pât. correspond à la plantation paysanne d'Eucalyptus surpâturée.
Dans chaque ligne, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes.

Pour préciser les hypothèses précédentes, un inventaire complémentaire des Vers de terre a été réalisé en 1995 dans les parcelles JHPng, EUC et JHDng précédemment étudiées en 1994. Une plantation paysanne d'*Eucalyptus* installée sur jachère surpâturée contiguë à JHDng a aussi été inventoriée. Cette plantation (EUC pât.) est également surpâturée. Les résultats de densités et biomasses mentionnés sur le tableau 9 permettent de classer les traitements dans l'ordre croissant suivant :

EUC ≤ EUC pât. ≤ JHPng = JHDng

Les niveaux de population de JHPng et JHDng sont équivalents, ce qui signifie que les vers de terre ont colonisé le traitement JHPng. Les relevés bruts indiquent des densités variables et parfois élevées pour la parcelle du bloc 1b (57 à 394 ind./m²), révélatrices de la distribution agrégative du groupe. En revanche, les Vers de terre ne se sont pas développés dans la parcelle d'*Eucalyptus* adjacente. D'autre part, on constate un niveau de population intermédiaire dans la plantation d'*Eucalyptus* pâturée. Il semblerait alors qu'*Eucalyptus* ait eu un effet dépressif sur les Vers de terre.

Les **autres groupes d'invertébrés**, regroupant des taxons faiblement représentés dans les deux sites, n'ont donc pas permis la considération d'unités taxonomiques indépendantes. Ces taxons étaient essentiellement des larves de Lépidoptères (chenilles), des larves d'Homoptères (cigale), des Isopodes (cloportes), des Diploures et des Thysanoures.

En conclusion, de l'inventaire de la macrofaune dans les différents systèmes de gestion du

sol nous retiendrons les points suivants :

- l'arrêt des cultures favorise la diversité des peuplements d'invertébrés en relation avec la protection de la jachère vis à vis du feu et du pâturage ;
- dans les jachères herbacées, le pâturage exerce un effet positif sur les vers de terre confirmant des observations effectuées par ailleurs (LAVELLE et PASHANASI, 1989) ;
- dans les jachères herbacées, en l'absence de pâturage, la dynamique de colonisation par les Vers de terre est assez lente ; elle peut dépendre de la localisation des parcelles par rapport à d'éventuelles sources de colonisation et également de la nature du précédent concernant la rémanence de populations relictuelles : dans notre situation, il a fallu 5 ans pour atteindre le niveau des jachères pâturées ;
- les jachères arborées ne favorisent pas l'installation des Vers de terre, en particulier dans les premières années ;
- on constate un effet positif des acacias fixateurs d'azote sur les Coléoptères ;
- les Iules, consommateurs de végétaux décomposés, sont très abondants sous *Acacia*, *Cassia* et jachère herbacée, en revanche ils sont très peu abondants sous *Eucalyptus*, ce qui peut tenir à la qualité de la litière.

5. QUELQUES RESULTATS SUR LE COMPORTEMENT DES CULTURES APRES JACHERE

51. Comportement des cultures à Ngong après 2 ans de jachère

En juin 1993, après 2 ans de jachère, l'exploitation des peuplements et la remise en culture de coton ont eu lieu sur la moitié du dispositif (figure 7). Les productions de coton graine n'ont pas montré de différence en fonction du précédent. Par contre, en 1994, la culture de sorgho, installée sans engrais sur les mêmes parcelles, a permis de différencier les précédents. D'après les résultats de production de la culture figurant sur le tableau 10, les traitements se classent dans l'ordre décroissant suivant selon le test t :

Acacia > (Jachère herbacée protégée) ≈ *Eucalyptus* > Culture continue
(ACP) (JHP) (EUC) (CULT)

Une jachère de deux ans complantée d'*Eucalyptus* a permis d'augmenter le rendement par

Tableau 10 : Rendement en sorgho en 2e année de culture (1994) après 2 ans de jachère à Ngong.

Poids épis en t/ha	Précédent jachère			
	Acacia	Jachère herbacée protégée	*Eucalyptus*	Culture continue
Moyenne	2,64	1,39	1,28	0,81
Ecart type	0,53	0,13	0,35	0,55
Nombre de placeaux de récolte de 32 m²	(12)	(4)	(12)	(24)

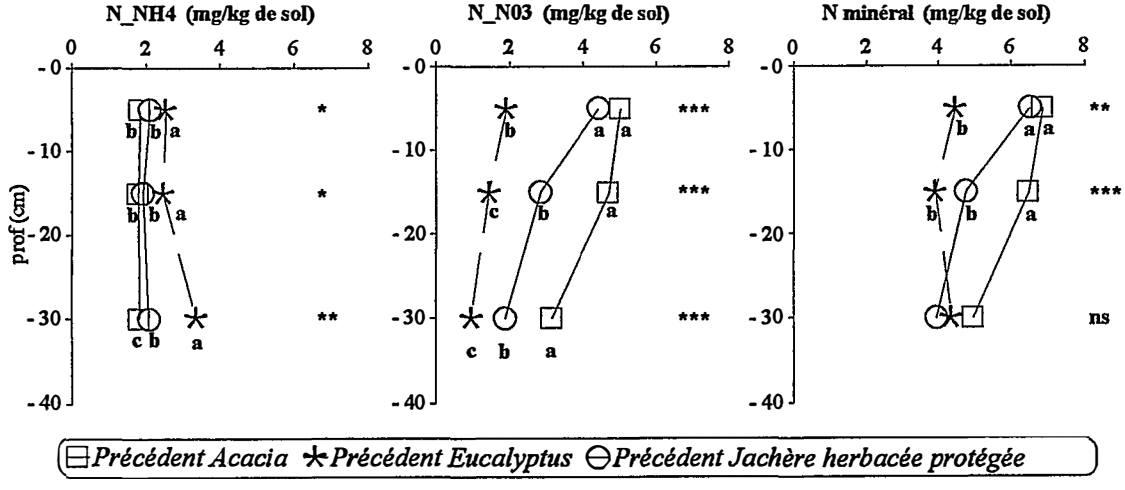


Figure 29 : Teneurs en azote minéral du sol sous culture de sorgho après différents précédents jachère à Ngong. Le seuil de signification de l'ANOVA pour chaque horizon est précisé (*,**,*** ou ns) ; les lettres a, b et c indiquent les groupes homogènes.

Tableau 11 : Quelques caractéristiques du sol de Ngong en 1993 avant l'exploitation des jachères. Dans chaque ligne, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

		Traitement				
Horizon (cm)	Caractéristique du sol	CULT	JHP	EUC	ACP	Seuil de signification
0-5	C (mg/g de sol)	0,24 b	0,32 a	0,30 a	0,32 a	*
0-5	N total (mg/g de sol)	0,27	0,32	0,30	0,31	ns
0-10	C (mg/g de sol)	0,28	0,32	0,30	0,31	ns
0-10	N total (mg/g de sol)	0,28	0,33	0,28	0,32	ns
0-10	pH	5,65 b	6,05 a	6,03 a	6,15 a	*
0-10	CEC (meq/100 g de sol)	1,6	1,72	1,63	1,64	ns

rapport à la culture continue et de façon significative (p = 0,011). Ce résultat s'est toutefois montré inférieur et de façon très hautement significative (p = 0,0001) à l'augmentation apportée par le précédent *Acacia* qui correspond au doublement de la production obtenue après les autres jachères. Le précédent jachère herbacée ne présentant que 4 placeaux de récolte n'a pas été inclus dans le test, néanmoins sa production moyenne de 1390 kg/ha et la faible dispersion de ses résultats (CV = 9%) nous conduisent à le classer avec le précédent *Eucalyptus*. Il faut ajouter que la taille des tiges de sorgho après *Acacia* était de plus de 4 m alors que dans les autres situations le sorgho atteignait à peine 2,5 m de haut. Le démarrage du sorgho après *Acacia* a été spectaculaire par rapport aux autres situations où la plante présentait une teinte jaunâtre symptomatique de carence en azote. Pour préciser ce phénomène, un prélèvement de sol pour analyse d'azote minéral a eu lieu en début de cycle cultural, le 30 juin 1994 à raison de 5 échantillons composites de 8 prélèvements par profondeur et par traitement. La figure 29 montre qu'il existe une disponibilité en azote minéral dans le sol, en particulier en nitrates, plus importante après *Acacia* qu'ailleurs. Cette plus grande disponibilité en nitrates, essentielle pour l'alimentation en azote du sorgho, peut expliquer la différence de développement de la culture. Néanmoins, l'origine de cet azote assimilable par la plante reste à élucider, car en 1993, avant l'exploitation des jachères de 2 ans, il n'apparaît pratiquement pas d'évolution des caractéristiques du sol (tableau 11). On ne perçoit, dans l'horizon 0-10 cm, aucune différence significative entre les traitements jachères et culture continue pour C et N totaux et CEC. On constate seulement, dans l'horizon 0-5 cm, une plus forte teneur en C du sol des jachères par rapport à la situation cultivée mais sans différenciation du type de jachère.

L'azote total du sol après *Acacia* est certainement sous une forme plus facilement minéralisable que dans les autres précédents (voir chapitre V). RHOADES (1995) observe que les augmentations de rendement des cultures sous *Faidherbia albida* ne correspondent pas à une plus forte teneur en azote total du sol, mais à une plus forte minéralisation de l'azote. Cependant, l'*Acacia* n'a pas montré, par rapport aux autres jachères, d'effet améliorateur du rendement de la première culture. Par conséquent, on peut penser que le comportement de la deuxième culture a été aussi influencé par la restitution au sol des éléments minéraux immobilisés dans les racines, la litière et les résidus d'exploitation de la jachère. Ces formes n'ont pas été prises en compte dans les analyses chimiques de sol au moment de l'exploitation de la jachère. Le brûlis ayant éliminé la majeur partie de l'azote des résidus d'exploitation, le stock d'azote minéralisable disponible pour les cultures suivantes est surtout constitué de la nécromasse racinaire dont la décomposition peut être importante entre les deux premières cultures en inter saison sèche (MANLAY et al.,

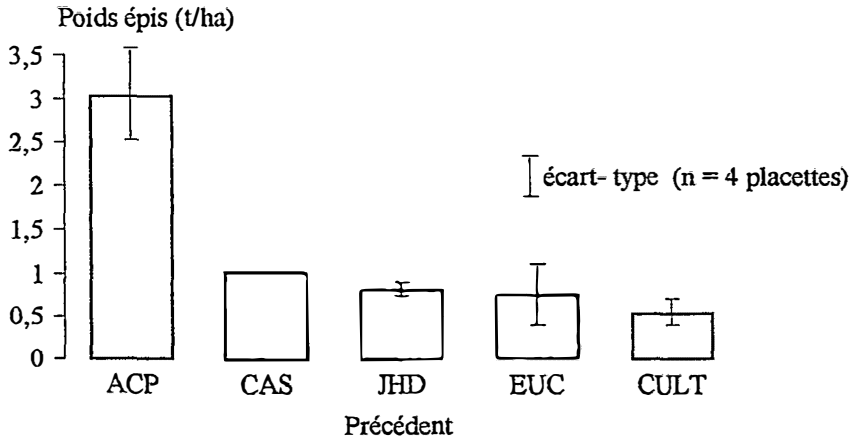


Figure 30 : Rendement en maïs en 1ère année de culture après 5 ans de jachère à Ngong.

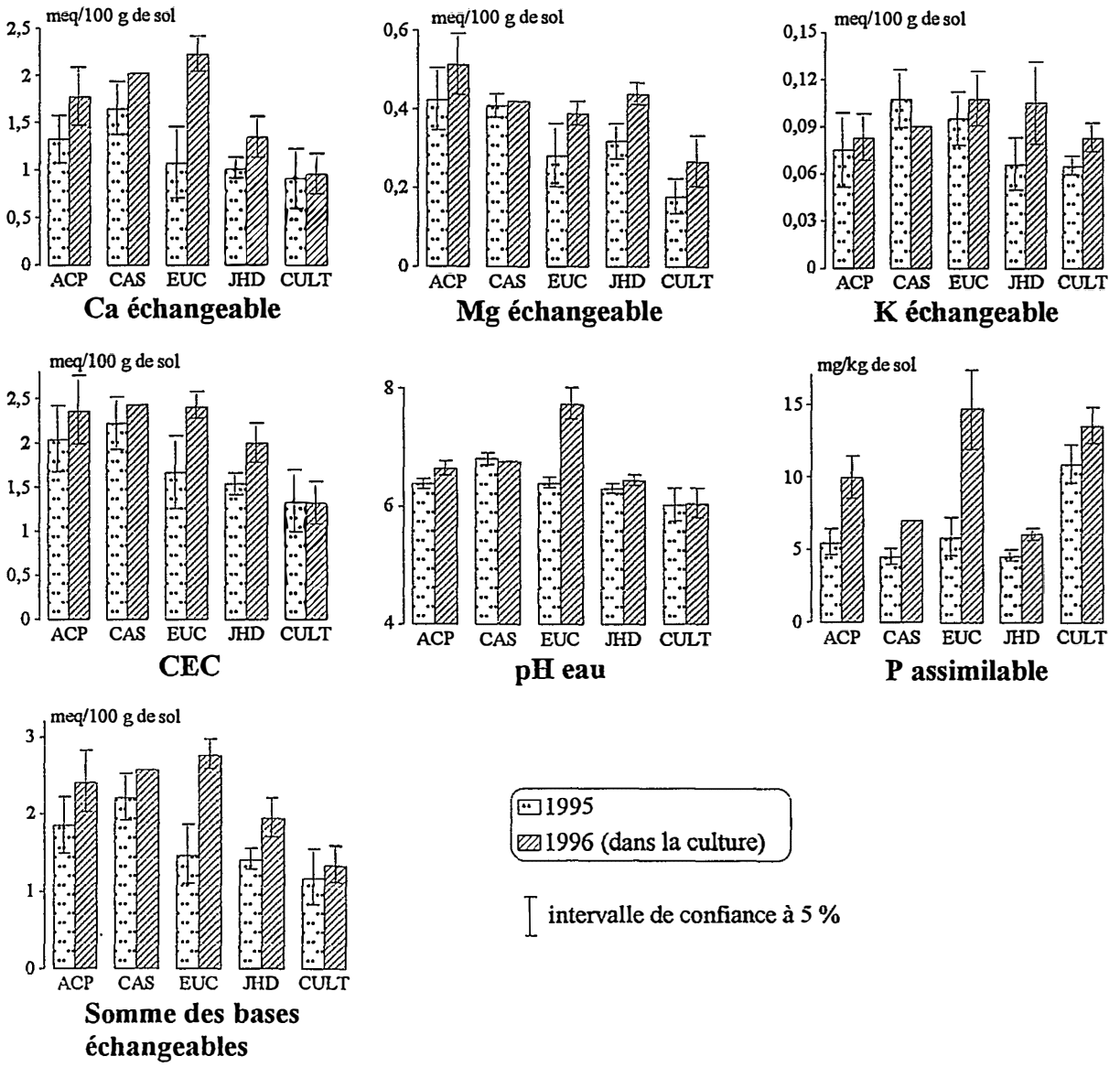


Figure 31 : Evolution des caractéristiques minérales de l'horizon 0-10 cm avec l'exploitation des peuplements et brûlis de la litière et des résidus ; parcelles des blocs 2b et 3b à Ngong.

1996). Dans le cas de la légumineuse fixatrice d'azote, cette réserve a été manifestement plus importante et/ou plus vite minéralisée.

52. Comportement des cultures à Ngong après 5 ans de jachère

En 1996, après 5 ans de jachère, les parcelles des blocs 2b et 3b du dispositif de Ngong (figure 7) ont été exploitées et remises en culture de maïs après brûlis des résidus. Les rendements de la culture, pratiquée sans engrais, montrent l'effet supérieur du précédent *Acacia* (figure 30). Cet effet est à mettre en relation avec le niveau convenable de nutrition azotée du maïs après *Acacia*, donné par la teneur en azote des feuilles prélevées selon la méthode du diagnostic foliaire de LOUE (1965). Cette teneur est de 3% alors que dans les autres précédents elle est en moyenne de 2,2%, bien en dessous du seuil de carence admis s'élevant à 3,1% (OLIVER R., communication personnelle).

L'effet favorable de l'*Acacia* n'est pas montré par les caractéristiques du complexe d'échange du sol sous culture mesurées en juillet 1996 après 300 mm de pluviométrie après brûlis de la litière et des résidus d'exploitation. Ces caractéristiques ne diffèrent pas entre les précédents "jachère ligneuse" (figure 31). Dans les plantations d'*Eucalyptus*, le brûlis permet, par la restitution des cendres au sol, de doubler le taux de Ca échangeable de l'horizon 0-10 cm, d'augmenter de façon significative les taux de Mg échangeable, de P assimilable ainsi que le pH du sol (figure 31). La correction de l'acidité favorise une augmentation significative de la CEC (FALLAVIER, 1996) qui retrouve un niveau comparable à celle des sols après *Acacia* et *Cassia*. L'effet du brûlis est moins marqué dans les autres jachères. Sous *Acacia* et *Cassia*, il permet surtout une augmentation significative du taux de P assimilable. Sous jachère herbacée, l'effet du brûlis est important pour K et Mg, il est atténué pour le Ca. Il en résulte un plus faible taux de Ca échangeable et une plus faible somme des bases de l'horizon 0-10 cm par rapport aux précédents "jachère ligneuse". Si l'effet du brûlis est spectaculaire dans l'horizon 0-10 cm (+1 meq/100 g de sol pour le Ca échangeable après *Eucalyptus*), il diminue fortement avec la profondeur. Ainsi la comparaison des données du tableau 6 pour les horizons plus profonds que 10 cm avec celles de 1996 non mentionnées ici (HIEN, 1996) indique une augmentation de Ca après *Eucalyptus* due au brûlis de 0,4 meq/100 g de sol dans 10-20 cm et dérisoire (+0,1 meq) dans 20-40 cm. De même, l'acidité corrigée en surface (+ 1 unité) ne l'est pas dans 20-40 cm.

Pour conclure, la plus forte production de la culture après *Acacia* est due à la plus grande teneur en azote du sol, également plus facilement minéralisable (voir chapitre V), mais aussi peut-

être à un plus fort stockage de nutriments dans la MO et à des processus biologiques tel que la minéralisation de C, N et P rendant les nutriments plus disponibles pour la culture que dans les autres traitements.

6. CONCLUSION SUR L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL

Après seulement deux ans de jachère, aucun type de végétation (strate herbacée ou plantations arborées) ne montre d'effet sur les caractéristiques chimiques de l'horizon 0-10 cm, en comparaison avec la culture continue. Ceci est en accord avec les résultats de UGUEN (1996) selon lesquels deux ans de croissance d' *A. holosericea* en zone soudano-sahélienne ne suffisent pas pour augmenter les stocks de carbone et d'azote du sol. De même, AWETO (1981) ne constate pas d'évolution du taux de MOS entre 1 et 3 ans sous jachère forestière en zone humide au Nigéria. Néanmoins, dans notre étude, le rendement de la 2ème culture après exploitation de la jachère et brûlis des résidus est accru et très fortement dans le cas du précédent *Acacia*, en rapport avec une meilleure nutrition azotée de la culture en l'occurrence le sorgho. Cette amélioration est due à une plus grande disponibilité en azote liée à la minéralisation de l'azote du sol mais aussi vraisemblablement à la décomposition de la nécromasse racinaire. Après 5 ans de jachère, seul l'*Acacia* montre, par rapport à la strate herbacée, un effet améliorateur du rendement de la première culture en raison d'une plus grande teneur en azote total du sol plus facilement minéralisable.

Ces premiers résultats montrent bien que la restauration de la fertilité du sol par la jachère ne dépend pas seulement de l'âge mais aussi du type et de la vigueur de la végétation en place.

A Ngong, durant les 4 années considérées, une certaine dégradation du statut organominéral du sol a eu lieu sous culture continue avec baisse significative du taux de MO, de la CEC, de la somme des bases échangeables et du magnésium échangeable. La plantation d'*Eucalyptus* a montré également une évolution plutôt défavorable mais moins accentuée, avec une mauvaise incorporation de MO au sol sous forme de débris végétaux s'accompagnant d'une plus faible porosité du sol que dans les autres jachères. On observe aussi une baisse significative de la CEC et une désaturation du complexe absorbant. La jachère naturelle herbacée, protégée contre le feu et le pâturage, a eu un effet favorable superficiel sur les caractéristiques organiques et minérales du sol, avec une augmentation significative du magnésium échangeable dans l'horizon

0-20 cm. Mais seule la plantation d'*Acacia* a permis une amélioration nette du statut organique du sol se répercutant sur les caractéristiques minérales qui affichent cependant une évolution moins marquée que la MO. L'effet du *Cassia* sur les caractéristiques du sol semble relativement comparable à celui de la jachère herbacée.

L'action de la jachère sur la MOS se manifeste principalement par une augmentation des débris végétaux peu efficaces dans les propriétés d'échange cationique. L'effet sur le complexe absorbant s'en trouve par conséquent limité, d'autant plus fortement que l'accroissement du taux de MO est superficiel et peu élevé. Néanmoins, cette MO plus ou moins facilement minéralisable constitue une source de nutriments pour les plantes de la jachère et les cultures suivantes. Sous *Acacia*, on constate également une légère augmentation des teneurs en C et N de la fraction organominérale du sol (0-20 µm), vraisemblablement liée au développement des processus d'humification des débris végétaux déjà montré par BERNHARD-REVERSAT (1987a, 1988) pour *Acacia seyal* au Sénégal.

Les effets défavorables des jeunes plantations d'*Eucalyptus* sur le statut organominéral du sol ont déjà été évoqués par différents auteurs : POCHON et al. (1959) au Maroc, BERNHARD-REVERSAT (1987a, 1988) au Sénégal, JAMET (1975), BERNHARD-REVERSAT (1991,1993,1996) et LOUBELO (1990) au Congo, TOKY et SINGH (1993) en Inde, KING et CAMPBELL (1994) au Zimbabwe.

Ces effets dépressifs sur les caractéristiques chimiques du sol semblent être une tendance commune du comportement de nombreuses espèces ligneuses en plantation dans le jeune âge. Au Nigéria, CHIJICKE (1980) note une baisse du taux de MO du sol sous *Gmelina arborea* comparativement à la strate herbacée environnante. Aux Philippines, OHTA (1990) constate une dégradation des caractéristiques organiques (C et N) et de la CEC sous *Acacia auriculiformis* de 5 ans ainsi qu'une baisse du taux de MO et une acidification du sol sous *Pinus kesyia* de 8 ans. Au Sud de la Côte d'Ivoire, OLIVER et GANRY (1994) mentionnent une plus faible teneur en N sous *A. auriculiformis* et *mangium* de 5 ans par rapport à la jachère herbacée.

La dégradation du statut organique du sol sous de jeunes plantations serait due à l'augmentation de la minéralisation de la MO initiale induite par l'afforestation (OHTA,1990), et ces pertes ne seraient compensées que lentement par des apports liés à la décomposition des litières. L'acidification du sol serait due à l'apport d'acides organiques par la minéralisation et au fort prélèvement d'éléments minéraux par les ligneux abaissant la somme des cations échangeables.

Cependant les caractéristiques organiques du sol s'améliorent avec le temps. Au Congo,

BERNHARD-REVERSAT et al. (1996) notent que le taux de C du sol sous plantation d'*Eucalyptus* hybride retrouve celui de la savane environnante à 7 ans alors que le taux d'N demeure inférieur. Au cours des années suivantes, les taux de C et N croissent de façon importante. En fait, le même auteur évoque une période de latence entre la plantation et l'augmentation des taux de carbone et d'azote sous couvert. Dans le cas des plantations d'*A. auriculiformis* et *mangium*, au Congo, cette période est plus courte que pour l'*Eucalyptus* et l'accroissement des taux de C et N est effectif à 6-7 ans.

De même, POLGLASE et al. (1992) observent une augmentation de C et N du sol avec l'âge de la plantation d'*Eucalyptus regnans* en Australie. Aux Philippines, OHTA (1990) constate une amélioration des caractéristiques organiques (C et N) et minérales (pH) du sol des vieilles plantations par rapport à la strate herbacée environnante.

Dans notre étude, on ne perçoit pas d'effet dépressif des espèces *Cassia* et *Acacia* sur les propriétés chimiques du sol. La plantation de *Cassia* montre un statut organique du sol comparable à la savane naturelle. DRECHSEL et al. (1993), au Centre Togo, notent la supériorité de la plantation de *Cassia* de 5 ans par rapport à la jachère naturelle, sur le taux de calcium du sol.

L'effet "organique" favorable de l'*A. polyacantha* par rapport à la savane naturelle apparaît dès la 5ème année après plantation. Cette espèce se place au dessus des autres espèces en accord avec les observations de nombreux auteurs sur la supériorité des arbres fixateurs d'azote à accroître le taux de MO du sol. Au Zimbabwe, CAMPBELL et al. (1994) observent les plus fortes teneurs en azote sous les *Acacia*, comparativement aux autres arbres de la savane.

Au moment de l'exploitation des peuplements de jachère, le brûlis de la litière et des résidus permet, par la restitution au sol des éléments dans les cendres, de corriger les effets dépressifs de l'*Eucalyptus* sur le complexe absorbant du sol. Dans l'horizon 0-10 cm, le brûlis fait augmenter le Ca échangeable, la somme des bases et corrige l'acidité, ce qui accroît la CEC. De cette manière, les caractéristiques minérales du sol après *Eucalyptus* retrouvent sensiblement le niveau des autres précédents "jachère ligneuse" (*Acacia* et *Cassia*) pour lesquels le brûlis a beaucoup moins d'effet.

Les différences d'évolution des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols sous jachère correspondent à une aptitude différente des types de végétation à fixer et à recycler les éléments minéraux. Ces caractéristiques seront discutées dans les chapitres suivants.

CHAPITRE IV

LES PHASES DES CYCLES BIOGEOCHIMIQUES DES PEUPLEMENTS DE JACHERE

LES PHASES DES CYCLES BIOGEOCHIMIQUES DES PEUPLEMENTS DE JACHERE

1. LE STOCKAGE DES BIOELEMENTS

11. Les stocks de carbone et d'éléments minéraux du sol

Les stocks de carbone, d'azote, d'éléments minéraux échangeables et d'éléments totaux des sols de Ngong et Mayo Dadi ont été estimés. Le calcul utilise pour chaque horizon sa teneur en éléments minéraux, son épaisseur, sa densité apparente mesurée au niveau de chaque parcelle ainsi que la proportion de terre fine. Cette proportion est supérieure à 99% du sol total jusqu'à 90 cm de profondeur. Les densités apparentes des différents horizons figurent en annexe 4.

Les stocks en bioéléments des couches 0-40 cm et 0-90 cm du sol de Ngong figurent sur le tableau 12. Dans les horizons 0-40 cm, les stocks de C, N, Mg^{2+}, P assimilable et d'éléments totaux présentent des différences significatives entre les situations, confirmant les résultats obtenus dans le chapitre III.

En accord avec les différences significatives entre les stations observées au chapitre III pour la teneur en carbone des horizons supérieurs, on remarque des stocks plus importants de C et N à Ngong (tableau 12) qu'à Mayo Dadi (tableau 13). En revanche, les stocks de bases échangeables de la couche 0-40 cm sont plus élevés à Mayo Dadi qu'à Ngong. Cependant, le passage de la profondeur 40 cm à la profondeur 90 cm s'accompagne à Ngong d'une multiplication du stock de bases échangeables par un facteur de 3,2 à 4 selon les traitements alors que ce facteur est en moyenne de 2,5 à Mayo Dadi. Il en résulte une plus forte réserve en bases échangeables de la couche 0-90 cm à Ngong. Cette différence d'augmentation des réserves minérales avec la profondeur est liée au plus fort accroissement du taux d'argile à Ngong. D'après les profils texturaux présentés au chapitre I, l'écart entre les stocks d'éléments échangeables des 2 stations s'accroît en faveur de Ngong si l'épaisseur de sol augmente au delà de la profondeur 90 cm.

Les espèces végétales pourront recycler les éléments minéraux de la profondeur au profit des couches superficielles du sol avec vraisemblablement plus de facilité à Ngong qu'à Mayo Dadi en raison des plus fortes réserves disponibles. Dans la suite du document, la notion de réserve

Tableau 12 : Stocks de carbone et d'éléments minéraux du sol de Ngong en juillet 1995. Pour chaque caractéristique, les lettres a, b et c indiquent les groupes homogènes au sens de l'ANOVA.

a) Epaisseur de sol : 0-40 cm

Elément du sol		Traitement				Seuil de signification	*Cassia* (hors dispositif)
		Acacia	*Eucalyptus*	Jachère herbacée protégée	Culture continue		
C	($t.ha^{-1}$)	19,1 a	14,5 bc	16,4 b	13,6 c	0,0015	19,1
N	(kg/ha)	1980 a	1650 b	1740 b	1570 b	0,0009	2090
Ca^{2+}	"	1130	920	1080	810	ns	1590
Mg^{2+}	"	190 a	160 a	160 a	110 b	0,0057	260
K^{+}	"	180 a	150 ab	160 ab	130 b	0,092	250
Na^{+}	"	22	26	25	27	ns	46
ST	"	1520	1260	1420	1080	ns	2150
P ass.	"	42 b	34 b	36 b	70 a	0,0001	23
Ca tot.	"	2160 a	1630 b	1760 b	1640 b	0,03	2220
K tot.	"	8680 a	8590 a	7870 b	8250 ab	0,027	9230
Mg tot.	"	1250 a	1040 b	1010 b	990 b	0,0001	1260

b) Epaisseur de sol : 0-90 cm

Elément du sol		Traitement				
		Acacia	*Eucalyptus*	Jachère herbacée protégée	Culture continue	*Cassia* (hors dispositif)
C	($t.ha^{-1}$)	33,5	28,9	33,3	26,3	34,3
N	(kg/ha)	4080	3700	4160	3490	4040
Ca^{2+}	"	3590	3140	3770	3410	4010
Mg^{2+}	"	790	650	660	630	890
K^{+}	"	340	300	320	320	460
Na^{+}	"	75	76	72	77	96
ST	"	4790	4170	4830	4440	5460
P ass.	"	67	62	66	104	50

minérale du sol désignera, de la même façon, un stock d'éléments "échangeables", "assimilables" ou "minéralisables" et non pas un stock d'éléments totaux.

Tableau 13 : Stocks de carbone et d'éléments minéraux du sol de Mayo Dadi en juillet 1995.

a) Epaisseur de sol : 0-40 cm

Elément du sol		Traitement			
		Acacia	*Cassia*	Jachère herbacée protégée	Culture continue
C	(t/ha)	15,48	13,96	14,46	12,04
N	(kg/ha)	1737	1620	1617	1472
Ca^{2+}	"	1485	1161	1300	1139
Mg^{2+}	"	246	205	215	149
K^{+}	"	210	160	157	156
Na^{+}	"	25	21	28	54
ST	"	1966	1547	1699	1498
P ass.	"	37	63	34	68

b) Epaisseur de sol : 0-90 cm

Elément du sol		Traitement			
		Acacia	*Cassia*	Jachère herbacée protégée	Culture continue
C	(t/ha)	26,3	23,9	25,6	20,5
N	(kg/ha)	3360	3050	3340	3100
Ca^{2+}	"	3560	3090	3470	2880
Mg^{2+}	"	700	520	630	490
K^{+}	"	360	330	310	370
Na^{+}	"	63	64	78	113
ST	"	4680	4000	4480	3850
P ass.	"	71	102	68	116

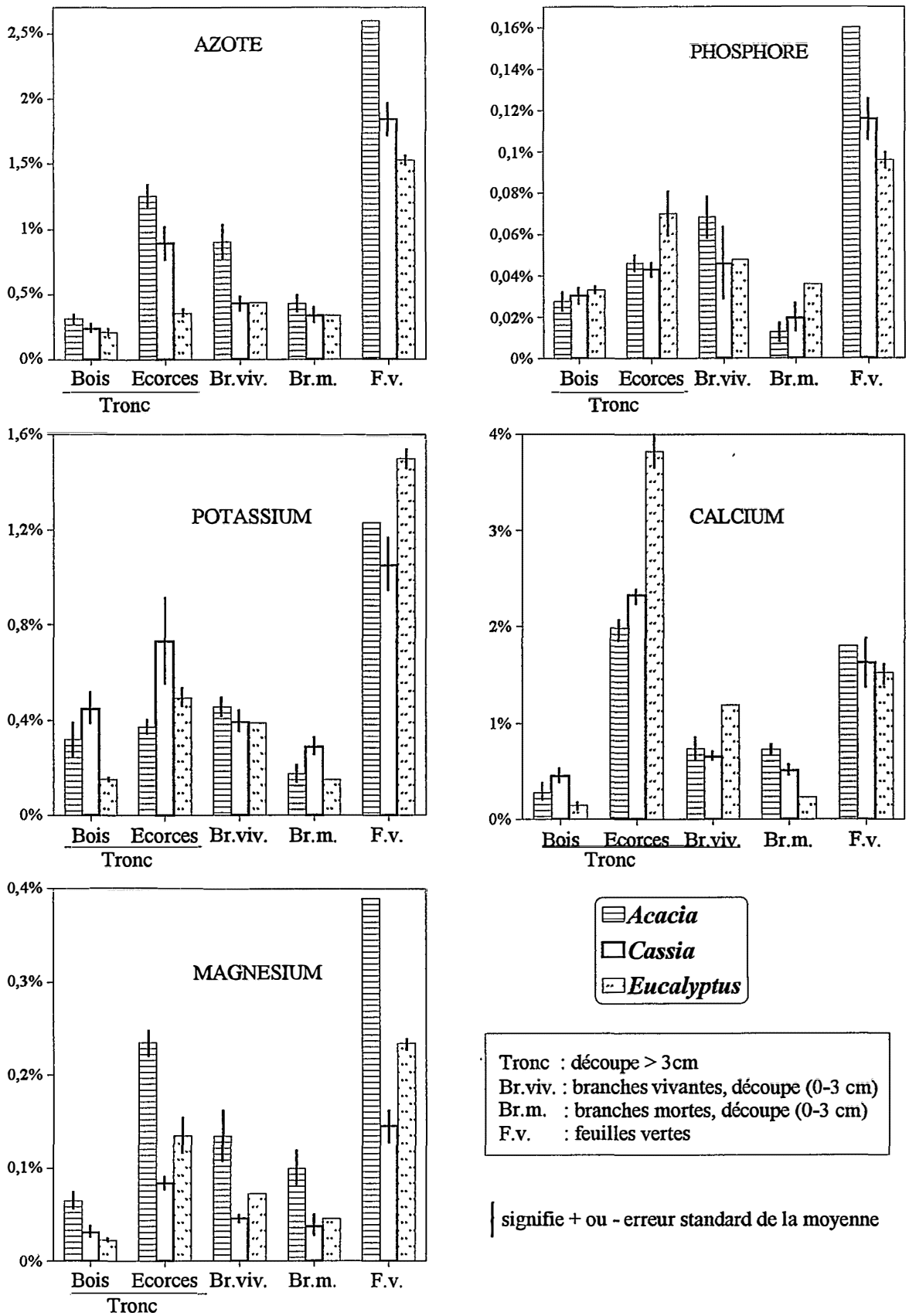


Figure 32 : Concentrations en bioéléments majeurs des différents compartiments des espèces ligneuses à Ngong (g pour 100 g de MS).

12. Accumulation dans la biomasse ligneuse aérienne des peuplements

L'exploitation des peuplements ligneux (*Acacia, Cassia* et *Eucalyptus*) de Ngong en décembre 1995 et janvier 1996 a permis d'évaluer l'accumulation des éléments minéraux dans la biomasse pérenne. Les estimations de matière sèche (MS) ont été effectuées en utilisant les taux d'humidité et les proportions de bois et d'écorce de tronc établis à l'annexe 1.

121. Composition chimique des tissus

La figure 32 donne les concentrations moyennes en bioéléments des différents compartiments de chaque espèce. Les lois générales suivantes se dégagent quant au classement des compartiments en fonction de leur teneur en éléments nutritifs quelle que soit l'espèce :
- pour N, P, K et Mg : feuilles > écorces de tronc ou branches vivantes > bois de tronc,
- pour Ca : écorces de tronc > feuilles > branches > bois de tronc.

De plus, les stratifications effectuées dans les parties ligneuses permettent de donner sur le tableau 14 les teneurs en bioéléments par catégorie de diamètre. La tendance générale est une augmentation des teneurs avec la diminution du diamètre, sauf pour K et Ca dans *Cassia*.

On retrouve le schéma courant selon lequel les éléments à vocation énergétique et

Tableau 14 : Concentrations en bioéléments majeurs dans les différentes découpes ligneuses en fonction de l'espèce (résultats en g pour 100 g de MS).

	Acacia polyacantha					*Cassia siamea*				
Compartiment *	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Découpe (> 7)	0,50	0,030	0,33	0,60	0,096	0,31	0,028	0,53	0,67	0,039
(3 - 7)	0,53	0,038	0,32	0,58	0,110	0,29	0,034	0,43	0,58	0,033
(1 - 3)	0,76	0,060	0,40	0,62	0,113	0,40	0,033	0,40	0,60	0,043
(0 - 1)	0,92	0,065	0,40	0,79	0,144	0,43	0,059	0,34	0,66	0,044

	Eucalyptus camaldulensis				
	N	P	K	Ca	Mg
Découpe (> 7)	0,23	0,039	0,20	0,68	0,039
(3 - 7)	0,35	0,045	0,31	0,70	0,067
(1 - 3)	0,41	0,042	0,30	1,06	0,071
(0 - 1)	0,48	0,059	0,56	1,43	0,076

* Les limites de chaque découpe sont données par les diamètres du tronc ou des branches exprimés en cm.

physiologique, N, P (et K dans 2 cas sur 3), dominent dans les tissus jeunes, alors que Ca, élément à vocation structurale est autant présent dans les tissus âgés. Concernant l'*Eucalyptus*, la faible teneur du bois en Ca ne permet pas d'observer cette situation à partir des compositions chimiques des découpes présentées globalement (tableau 14). Néanmoins, si on considère seulement l'écorce du tronc, l'annexe 1 montre une diminution progressive de la teneur en Ca des écorces les plus âgées du pied de l'arbre (4,3 %) vers les écorces les plus jeunes de la cime (2,1%).

D'autre part, l'évolution des rapports N/Ca, P/Ca (et même K/Ca dans 2 cas sur 3) traduit bien le phénomène physiologique d'utilisation des réserves de la plante par transfert interne des éléments N, P et K vers les organes en croissance. Les exemples les plus nets sont ceux de l'écorce du tronc d'*Eucalyptus* et des différents tronçons d'*Acacia* et de *Cassia* (excepté K) pour lesquels les rapports mentionnés sur le tableau 15, augmentent quand on passe à des proportions de plus en plus fortes de tissu jeune. Ce cycle biochimique interne, participant à l'autosuffisance des plantes pérennes a déjà été mentionné par COLE et RAPP (1980), BOUCHON et al. (1985) et RANGER et al. (1988).

L'immobilisation de K dans les tissus âgés de *Cassia*, confirmée par l'augmentation progressive du rapport K/Ca avec le diamètre des branches, semble être une propriété particulière du fonctionnement minéral de cette espèce.

En ce qui concerne les tissus morts, l'appauvrissement en différents bioéléments est général, mais dans certains cas, il reste peu ou pas marqué (cas de Ca dans les *Acacia* et *Cassia*).

Du tableau 14 complétant la figure 32, se dégage le classement suivant des espèces en fonction de la teneur en éléments nutritifs de leurs parties ligneuses :

Tableau 15 : Rapports des teneurs en bioéléments majeurs des différents compartiments.

		Acacia polyacantha				*Cassia siamea*			
Compartiment *		N/Ca	P/Ca	K/Ca	Mg/Ca	N/Ca	P/Ca	K/Ca	Mg/Ca
Découpe	(> 7)	0,83	0,051	0,55	0,16	0,46	0,042	0,79	0,06
	(3 - 7)	0,90	0,066	0,55	0,19	0,50	0,058	0,73	0,06
	(1 - 3)	1,22	0,096	0,64	0,18	0,66	0,055	0,66	0,07
	(0 - 1)	-	-	-	-	0,65	0,090	0,51	0,07
		Eucalyptus camaldulensis							
		N/Ca	P/Ca	K/Ca	Mg/Ca				
Ecorce	(1 - 4)	0,08	0,013	0,10	0,03				
du tronc	(4 - 8)	0,11	0,027	0,14	0,04				
	(8 -12)	0,19	0,042	0,29	0,10				

* Les limites de chaque découpe sont données par les diamètres du tronc ou des branches exprimés en cm ;
Chaque compartiment de l'écorce du tronc est donnée par sa position dans l'arbre : 1 à 4 m, 4 à 8 m et 8 à 12 m.

- pour N : *Acacia* > *Cassia* ≥ *Eucalyptus*,
- pour P dans le tronc : *Eucalyptus* > *Acacia* > *Cassia*,
- pour K : *Cassia* > *Acacia* > *Eucalyptus*,
- pour Ca : *Eucalyptus* >*Acacia* et *Cassia*,
- pour Mg : *Acacia* > *Eucalyptus* ≥ *Cassia*.

122. Les tarifs

Plus de 120 tarifs ont été construits pour évaluer la biomasse et la minéralomasse. Nous ne présentons ici que les tarifs généraux donnant l'évaluation des biomasse et minéralomasse totale des différents peuplements (tableau 16).

D'après l'annexe 1, il est remarquable de constater que les teneurs en N et P du bois de tronc d'*Eucalyptus* augmentent légèrement (r = 0,58) et de façon significative avec la taille de l'arbre. On peut proposer deux explications à ce phénomène. D'une part, le meilleur développement des arbres serait lié à une meilleure alimentation en azote et en phosphore. Ce dernier élément pourrait être fourni par des réserves en profondeur auxquelles les plus gros arbres auraient accès. D'autre part, les plus gros arbres, en forte croissance, pourraient contenir des proportions d'aubier plus importantes que les petits. La plus grande richesse en N et P de l'aubier par rapport au bois de coeur (CRANE et RAISON, 1980) augmenterait alors les concentrations

Tableau 16 : Quelques exemples de tarifs logarithmiques de la forme : log MS_{kg} ou d'éléments$_g$ = a + b log C. Le niveau de signification des tarifs est P = 0,0001.

	Compar-timent	Ordonnée à l'origine (a)	Pente (b)	Coefficient de corrélation (r)
Cassia siamea	MS	- 1,630	1,919	0,90
	N	- 0,843	1,813	0,90
C : circonférence à 10 cm (C_{10})	P	- 1,929	1,851	0,90
n = 17	K	- 0,759	1,799	0,89
	Ca	- 0,847	1,942	0,90
	Mg	- 1,947	1,890	0,90
Acacia polyacantha	MS	1,447	1,912	0,84
	N	- 0,672	1,830	0,89
C : circonférence à 10 cm (C_{10})	P	- 2,023	1,906	0,91
n = 38 pour MS	K	- 1,04	1,904	0,90
n = 25 pour N, P, K, Ca et Mg	Ca	- 0,483	1,771	0,87
	Mg	- 1,368	1,818	0,89
Eucalyptus camaldulensis	MS	- 2,782	2,805	0,93
	N	-2,677	3,067	0,92
C : circonférence à 130 cm (C_{130})	P	- 3,835	3,222	0,93
n = 48 pour MS	K	- 2,376	2,861	0,91
n = 15 pour N, P, K, Ca et Mg	Ca	- 1,901	2,819	0,93
	Mg	- 3,040	2,812	0,91

Tableau 17 : Biomasse et minéralomasse des peuplements ligneux de Ngong en décembre 1995 (MS : matière sèche en t / ha ; minéralomasse en kg / ha).

		Acacia polyacantha (7 ans)												*Cassia siamea* (6 ans)												*Eucalyptus camaldulensis* (7ans)											
		MS		N		P		K		Ca		Mg		MS		N		P		K		Ca		Mg		MS		N		P		K		Ca		Mg	
		t/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg. ha^{-1}	%	t/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	t/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%
Feuilles														1,02		19,0		1,18		10,7		16,5		1,47		3,06		46,7		2,93		45,9		46,7		7,16	
Branches (0-3)		5,35	14	48,3	24	3,7	30	15,9	14	61,4	25	7,2	19	6,90	30	29,4	38	3,15	40	27,1	27	45,0	32	3,13	36	5,07	13	22,0	21	2,43	15	19,8	22	60,3	20	3,67	21
Bois mort		7,38	20	31,6	16	0,9	8	21,7	18	32,3	13	7,4	19	2,31	10	7,4	10	0,51	6	8,8	9	11,1	8	0,81	9	0,18	0	0,6	1	0,06	0	0,3	0	0,4	0	0,08	0
Découpe 3 *	Bois	19,33	52	60,7	30	5,4	44	61,3	52	52,4	21	12,5	32	12,36	54	29,0	37	3,74	47	55,3	55	54,8	39	3,77	43	29,69	74	63,1	61	9,92	62	45,5	50	41,6	14	6,70	38
	Ecorce	5,01	14	62,7	30	2,3	19	18,8	16	99,5	41	11,8	30	1,32	6	11,7	15	0,57	7	9,6	10	30,6	22	1,10	12	5,16	13	18,5	18	3,63	23	25,8	28	196,3	66	7,05	40
	Total	24,35	66	123,4	60	7,7	63	80,1	68	151,9	62	24,3	62	13,68	60	40,8	53	4,31	54	65,0	64	85,4	60	4,87	55	34,85	87	81,7	78	13,55	84	71,3	78	237,9	80	13,75	79
Arbre ligneux		37,08	100	203,3	100	12,3	100	117,8	100	245,6	100	38,8	100	22,89	100	77,6	100	7,97	100	100,9	100	141,5	100	8,80	100	40,09	100	104,2	100	16,04	100	91,3	100	298,6	100	17,49	100
Arbre total														23,91		96,6		9,15		111,6		158,0		10,27		43,15		151,0		18,97		137,2		345,3		24,65	

* Découpe 3 : parties ligneuses de diamètre > 3 cm.

Tableau 18 : Production moyenne de biomasse et accumulation moyenne annuelle de minéralomasse (MS en t/ha/an ; minéralomasse en kg/ha/an).

		Acacia polyacantha						*Cassia siamea*						*Eucalyptus camaldulensis*					
		MS	N	P	K	Ca	Mg	MS	N	P	K	Ca	Mg	MS	N	P	K	Ca	Mg
Branches (0-3)		0,76	6,9	0,52	2,3	8,8	1,03	1,15	4,9	0,53	4,5	7,5	0,52	0,72	3,1	0,35	2,8	8,6	0,52
Bois mort		1,05	4,5	0,13	3,1	4,6	1,05	0,38	1,2	0,08	1,5	1,9	0,13	0,03	0,1	0,01	0,0	0,1	0,01
Découpe 3	Bois	2,76	8,7	0,77	8,8	7,5	1,78	2,06	4,8	0,62	9,2	9,1	0,63	4,24	9,0	1,42	6,5	5,9	0,96
	Ecorce	0,72	9,0	0,33	2,7	14,2	1,68	0,22	2,0	0,09	1,6	5,1	0,18	0,74	2,6	0,52	3,7	28,0	1,01
	Total	3,48	17,6	1,10	11,4	21,7	3,46	2,28	6,8	0,72	10,8	14,2	0,81	4,98	11,7	1,94	10,2	34,0	1,96
Arbre ligneux		5,30	29,0	1,75	16,8	35,1	5,55	3,81	12,9	1,33	16,8	23,6	1,47	5,73	14,9	2,29	13,0	42,7	2,50

du bois des arbres ayant un développement important. Le magnésium du bois de tronc d'*Eucalyptus* montre une relation inverse (r = - 0,44) avec une plus grande dilution dans les plus gros arbres. Les teneurs en Ca et K ne montrent pas de variation significative en fonction de la taille des arbres.

123. Biomasse et minéralomasse

L'application des tarifs à l'inventaire des arbres a permis de calculer la biomasse et la minéralomasse pérenne de chaque peuplement. Une modification du résultat obtenu a été effectuée pour corriger l'erreur due au tarif. La comparaison entre données mesurées et données calculées indique une sous-estimation par le calcul, variant de 1 à 2,5% selon le tarif.

Biomasse et productivité de matière sèche à l'ha

Les tableaux 17 et 18 indiquent les productions cumulées et annuelles de biomasse par compartiment. Pour les parties ligneuses, on note la plus forte proportion de bois de tronc chez l'*Eucalyptus* (74%) comparativement aux *Acacia* (52%) et *Cassia* (54%). Le bois mort, en quantité insignifiante chez l'*Eucalyptus*, représente respectivement 20% et 10% des biomasses ligneuses de l'*Acacia* et du *Cassia*. Chez l'*Acacia*, l'importance de ce compartiment s'explique par le faible élagage naturel de cette espèce, dont les branches basses restent très longtemps fixées sur le tronc après leur mortalité. Chez le *Cassia*, l'importance relative du bois mort est due au dépérissement de portions d'arbres voire d'arbres entiers à partir de la 4e année. Le plus faible développement du *Cassia* conduit à une proportion plus importante de petit bois en particulier de branches vivantes comparativement aux autres espèces.

Les productions ligneuses totales annuelles des *Acacia* (5,3 t/ha/an) et *Eucalyptus* (5,73 t/ha/an) ne diffèrent pas significativement (tableau 19). En revanche la biomasse du tronc d'*Eucalyptus* présente un accroissement moyen significativement supérieur à celui de l'*Acacia*. Le peuplement de *Cassia* non intégré au dispositif se montre moins productif (3,8 t/ha/an).

Comparativement aux données bibliographiques ces productions sont assez bonnes compte tenu de la situation pédoclimatique. En zone sahélienne au Sénégal, BERNHARD-REVERSAT (1987b) mentionne des productions de biomasse ligneuse moyenne annuelle d'*Eucalyptus* en plantation de l'ordre de 3,8 t/ha à 8 ans et de 1,7 t/ha pour *A. seyal* en peuplement naturel. TANDON et al. (1993), en zone tropicale semi-aride d'Inde (600 mm de pluviométrie annuelle),

Tableau 19 : Analyse de variance sur la production de biomasse et l'immobilisation annuelle des nutriments dans les peuplements d'*Acacia* et *Eucalyptus*.

Niveau de stratification	MS	N	P	K	Ca	Mg
Gros bois à découpe 3 cm	*	*	**	ns	**	*
Total ligneux (hors feuilles)	ns	**	*	ns	ns	**

** : 1 % ; * : 5 % ; ns : non significatif.

Tableau 20 : Productivité des peuplements ligneux de Ngong.

Biomasse totale ligneuse aérienne (t MS / ha / an)	*Eucalyptus*	*Acacia*	*Cassia*
Accroissement moyen	5,73	5,30	3,81
Accroissement courant 1995 (par tarif)	5,95	3,10	0,90

donnent une production de 5,4 à 10,7 t/ha/an pour *Eucalyptus* hybride entre 6 et 8 ans. En zone de savane humide d'altitude au Cameroun (1900 mm/an), la production d'*E. saligna* de 14 et 40 ans varie de 10,3 à 12,8 t/ha (NJOUKAM, 1995). De même, en savane humide au Congo LOUBELO (1990) donnent des productions de l'*Eucalyptus* hybride sur sol pauvre de 10 à 17 t/ha/an.

L'accroissement courant pour l'année 1995 a pu être établi en appliquant les tarifs à l'inventaire des peuplements réalisés en janvier 1995 et en faisant la différence entre la biomasse de janvier 96 et celle de janvier 95. L'*Eucalyptus* s'est bien développé au cours de la 7e année car son accroissement courant est comparable à l'accroissement moyen (tableau 20). En revanche, les deux autres espèces ont réduit leur accroissement. La très faible productivité du *Cassia* en 95 montre bien la nécessité d'exploiter cette espèce vers 4 ans lorsque les signes de dépérissement apparaissent.

Minéralomasse

Les éléments majeurs se classent dans l'ordre décroissant suivant par rapport à leur accumulation dans les parties ligneuses aériennes des *Acacia* et *Eucalyptus* (tableau 17) :
Ca > N > K > Mg > P.

Pour le *Cassia* l'importance de K modifie cet ordre qui devient : Ca > K > N > Mg > P.

Dans les feuilles, quelle que soit l'espèce, l'ordre est le suivant : N > Ca > K > Mg > P.

On retrouve l'importance des petits compartiments tels que les feuilles et les branches dans la rétention des bioéléments (tableau 17). Les feuilles de *Cassia* et d'*Eucalyptus* représentent respectivement 4 et 7% de la biomasse totale et immobilisent 13% et 22% de la masse totale des éléments. Les branches d'*Acacia*, de *Cassia* et d'*Eucalyptus* représentent respectivement 14%, 30% et 13% de la biomasse ligneuse et retiennent 22%, 32% et 20% des éléments des parties ligneuses. En revanche, le bois de tronc est moins riche en bioéléments et les 52%, 54% et 74% de biomasse d'*Acacia*, de *Cassia* et d'*Eucalyptus* immobilisent respectivement 31%, 44% et 26% de la minéralomasse totale ligneuse. On note également la forte teneur en éléments minéraux de l'écorce du tronc, qui représente respectivement 14%, 6% et 13% des biomasses ligneuses de l'*Acacia*, du *Cassia* et de l'*Eucalyptus* et retient 32%, 16% et 40% des bioéléments des parties ligneuses. Chez l'*Acacia* et l'*Eucalyptus*, l'écorce du tronc contient les plus fortes proportions des masses totales de Ca et Mg.

Concernant le potassium, on observe peu d'influence de la nature du compartiment ligneux sur son accumulation qui reste proportionnelle à la biomasse.

Les valeurs d'accumulation moyenne annuelle des bioéléments dans les parties ligneuses figurent sur le tableau 18. L'absence de différence significative (tableau 19) entre les productions de biomasse ligneuse totale d'*Acacia* et d'*Eucalyptus* s'accompagne néanmoins d'une accumulation plus forte de N et Mg et plus faible de P dans les *Acacia*. La plus grande importance du gros bois (diamètre > 3 cm) dans l'*Eucalyptus* correspond également à une immobilisation plus forte de P et Ca mais à une accumulation plus faible de N et Mg par rapport à l'*Acacia*, en relation avec de plus faibles concentrations.

La plus faible production de biomasse du *Cassia* entraîne une plus faible fixation de bioéléments, sauf de K dont le niveau annuel d'accumulation est le plus important.

Une autre manière d'exprimer les besoins propres des peuplements qui résultent d'un effet espèce et de leur âge (RAISON et CRANE, 1981) est de calculer le rendement des éléments nutritifs. Pour produire une tonne de MS ligneuse, les différents peuplements d'*Acacia*, de *Cassia* et d'*Eucalyptus* utilisent respectivement 5,5 - 4 et 2,6 kg de N, 0,3 - 0,4 et 0,4 kg de P, 3,2 - 4,7 et 2,3 kg de K, 6,6 - 6,6 et 7,4 kg de Ca et 1 - 0,4 et 0,4 kg de Mg. L'*Acacia* se montre plus frugal en P et plus exigeant en Mg que les autres espèces. L'*Eucalyptus* présente la meilleure efficience d'utilisation de N et de K, mais pour les autres éléments sa réputation de frugalité n'est pas vérifiée. Ses besoins en Ca sont supérieurs à ceux des autres espèces et ses exigences en P sont élevées. Le *Cassia* présente des besoins élevés en K et également en N. La forte

accumulation d'azote dans la biomasse des espèces du genre *Cassia* a déjà été mentionnée par SANCHEZ et PALM (1996).

Dans les autres situations mentionnées par la littérature (voir ci-dessus page 91), l'*Eucalyptus* présente une meilleure efficience d'utilisation du P (0,1 à 0,27 kg par tonne de MS produite). Hormis le cas du sahel sénégalais où les besoins en autres éléments nutritifs sont plus importants (BERNHARD-REVERSAT, 1987b), ailleurs les plus fortes productions de biomasse correspondent à une plus forte dilution des éléments minéraux dans les tissus, conduisant à des valeurs de fixation annuelle relativement proches de celles de Ngong. C'est le cas de P, K et Mg fixés par *E. saligna* entre 14 et 40 ans en savane d'altitude du Cameroun (NJOUKAM, 1995). Cela montre que la production de biomasse peut augmenter, avec la pluviométrie, indépendamment de la nutrition minérale dans une certaine marge. Par conséquent, le facteur hydrique relativise la notion de besoins. Cependant, dans nos conditions, les peuplements sont généralement plus jeunes et donc naturellement moins efficients dans l'utilisation des éléments minéraux. Ainsi, CRANE et RAISON (1980) et FLORENCE (1986) montrent que les 10 premières années correspondent à une phase d'accumulation de P chez l'*Eucalyptus* et qu'ensuite,

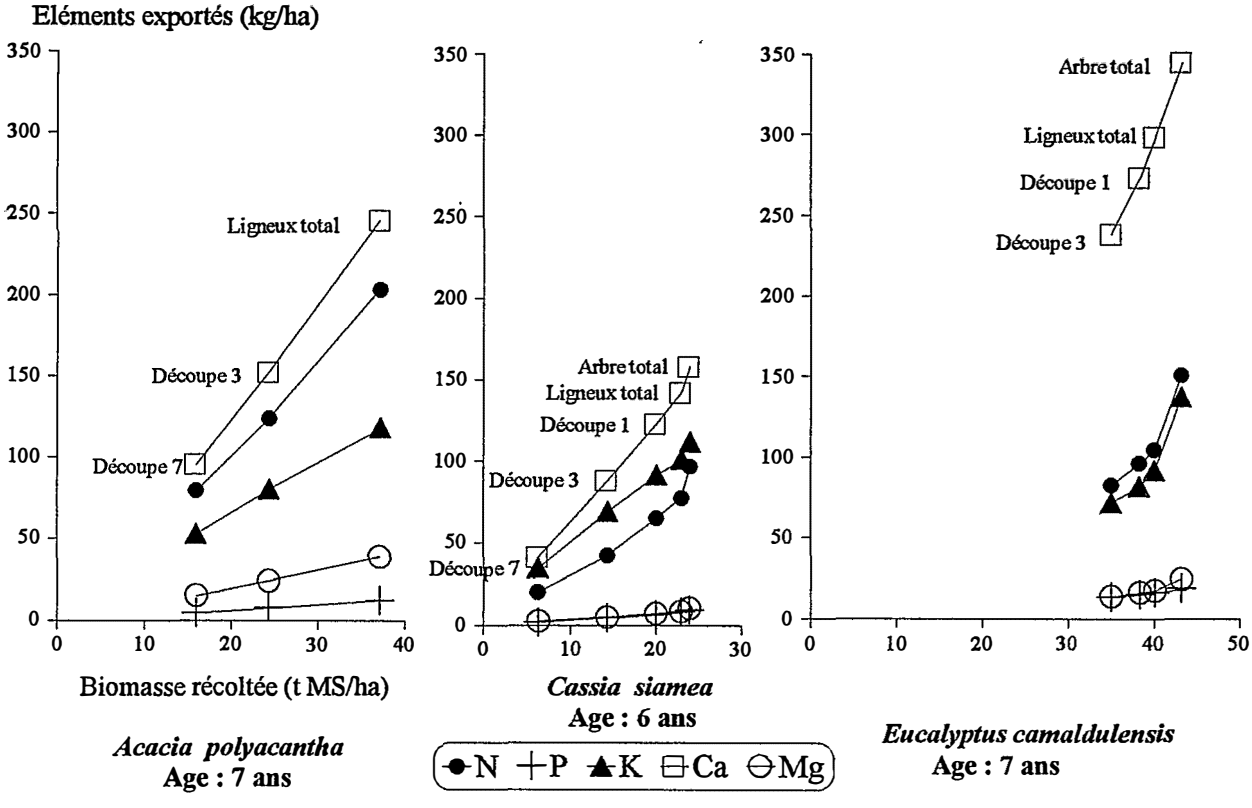


Figure 33 : Liaison entre l'intensité de la récolte de la biomasse ligneuse aérienne et l'exportation des éléments nutritifs majeurs des peuplements de Ngong.

l'efficience d'utilisation du P s'améliore progressivement. Les phénomènes de transfert interne, intervenant au moment de la formation du bois de coeur, entraînent la diminution de la teneur en P du tronc et de l'arbre entier et réduisent ainsi les besoins de l'arbre tel qu'ils ont été définis ici.

Coût en éléments nutritifs de l'exploitation de biomasse

Si on met en parallèle les éléments retenus par les arbres (tableau 17) et les réserves édaphiques assimilables ou échangeables (tableau 12), on se rend compte que la minéralomasse ligneuse aérienne correspond à une proportion non négligeable des réserves de l'horizon 0-40 cm. Ainsi, dans le cas des *Acacia* et des *Eucalyptus*, les éléments accumulés dans la biomasse ligneuse représentent respectivement 28% et 47% de P, 64% et 58% de K, 21% et 32% de Ca et 21% et 11% de Mg. Ces fortes accumulations n'ont pas fait baisser de façon significative les réserves du sol en comparaison avec la jachère herbacée protégée. Si on considère une épaisseur de sol plus grande, limitée à la profondeur de 90 cm, largement atteinte par les systèmes racinaires, les immobilisations respectives des éléments dans la biomasse de l'*Acacia* et de l'*Eucalyptus* ne représentent plus que 17% et 26% de P, 34% et 30% de K, 7% et 9% de Ca et 5% et 3% de Mg. Cette comparaison renseigne sur le rôle probablement important que peuvent jouer les réserves minérales de profondeur dans le fonctionnement de ces écosystèmes. Même si on ne peut pas négliger l'action des plantes sur la rétention des éléments apportés par les pluies et des éléments issus de l'altération des minéraux primaires, on peut penser qu'une partie de la minéralomasse provient de la remontée d'éléments situés à une profondeur plus grande que 40 cm. Cet aspect sera discuté au chapitre V.

La figure 33 illustre les relations existant entre les exportations d'éléments nutritifs et l'intensité de la récolte de la biomasse. Quand on passe d'une exploitation partielle à une exploitation totale (feuilles exclues), l'allure des courbes témoigne d'une proportionnalité globale entre éléments exportés et biomasse récoltée. Ceci est à rapprocher des résultats obtenus par RANGER et al. (1988) pour les taillis de peuplier à courte rotation (7 ans) en France. Dans les taillis âgés "classiques" à longue rotation (30 à 40 ans) en pays tempéré, BOUCHON et al. (1985) présentent des courbes de forme exponentielle traduisant une disproportionnalité plus grande entre biomasse et minéralomasse quand on cumule les compartiments de la découpe 7 cm jusqu'à l'arbre total (feuilles exclues). Ceci est à relier à l'age élevé des taillis classiques : la proportion d'organes vieux y est plus importante et la proportion d'écorce est plus faible accentuant les

Tableau 21 : Restitutions de biomasse et de bioéléments majeurs en fonction du mode d'exploitation de la biomasse ligneuse des peuplements de Ngong (en valeurs absolues et en pourcentage de la fixation totale).

Espèce	Age	Biomasse et bioéléments	Mode d'exploitation de la biomasse ligneuse						
			Exportation nulle	Découpe 7 + écorçage	Découpe 7	Découpe 3 + écorçage	**Découpe 3**	Découpe 1	Ligneux total
Cassia	6 ans	Matière sèche (t/ha)	23,91 (100 %)			11,09 (46 %)	9,66 (40 %)	3,91 (16 %)	1,02 (4 %)
Acacia	7 ans		37,08 (100 %)	24,06 (65 %)	21.11 (57 %)	17,74 (48 %)	12,73 (34 %)		0,00 (0 %)
Eucalyptus	7 ans		43,15 (100 %)			13,28 (31 %)	8,13 (19%)	4,83 (11 %)	3,06 (7 %)
Cassia	6 ans	N	97 (100 %)			66 (69 %)	54 (56 %)	31 (33 %)	19 (20 %)
Acacia	7 ans		203 (100 %)	163 (80 %)	124 (61 %)	143 (70 %)	80 (39 %)		0 (0 %)
Eucalyptus	7 ans		151 (100 %)			87 (58 %)	69 (45 %)	55 (37 %)	47 (31 %)
Cassia	6 ans	P	9,1 (100 %)			5,3 (58 %)	4,7 (51 %)	2,9 (32 %)	1,2 (13 %)
Acacia	7 ans		12,3 (100 %)	8,8 (72 %)	7,4 (60 %)	6,9 (56 %)	4,6 (37 %)		
Eucalyptus	7 ans		19,0 (100 %)			9,0 (47 %)	5,4 (28 %)	4,0 (21 %)	2,9 (15 %)
Cassia	6 ans	K	112 (100 %)			53 (48 %)	43 (38 %)	20 (18 %)	11 (10 %)
Acacia	7 ans		118 (100 %)	75 (64 %)	65 (55 %)	57 (48 %)	38 (32 %)		0 (0 %)
Eucalyptus	7 ans		137 (100 %)			91 (67 %)	66 (48 %)	56 (41 %)	46 (33 %)
Cassia	6 ans	Ca	158 (100 %)			101 (64 %)	70 (44 %)	36 (22 %)	17 (10 %)
Acacia	7 ans		246 (100 %)	208 (85 %)	150 (61 %)	193 (79 %)	94 (38 %)		0 (0 %)
Eucalyptus	7 ans		345 (100 %)			303 (88 %)	107 (31 %)	72 (21 %)	47 (13 %)
Cassia	6 ans	Mg	10,3 (100 %)			6,4 (62 %)	5,2 (51 %)	2,7 (27 %)	1,5 (14 %)
Acacia	7 ans		38,8 (100 %)	30,6 (79 %)	23,6 (61 %)	26,4 (68%)	14,6 (38 %)		0 (0 %)
Eucalyptus	7 ans		24,7 (100%)			17,9 (72 %)	10,8 (44 %)	8,5 (34 %)	7,2 (29 %)

différences de concentration entre gros bois et petit bois.

Restitutions d'éléments nutritifs au sol en fonction du mode d'exploitation

Même si l'exportation d'une partie de la biomasse présente un coût d'éléments nutritifs pour le système sol-jachère ligneuse, la restitution de l'autre partie des éléments nutritifs en surface peut représenter un gain pour le système sol-plante cultivée puisque celui-ci est limité à une profondeur de sol plus faible.

Le tableau 21 indique les niveaux de restitution envisageables en fonction du mode d'exploitation de la biomasse. L'écorçage des produits sur le terrain permet de restituer des quantités très importantes de bioéléments en particulier de Ca, Mg et P. Chez l'*Eucalyptus,* le niveau de restitution de Ca est multiplié par 3 par rapport à un simple retour au sol des branches feuillées. Ce niveau correspond à un tiers de la réserve en Ca échangeable de l'horizon 0-40 cm. L'azote, également restitué de façon importante chez l'*Acacia*, sera perdu en grande partie au moment du brûlis, surtout si celui-ci est pratiqué en période sèche.

La découpe 3 cm, correspondant à l'exploitation pratiquée sur ces parcelles afin de standardiser le protocole, a permis de restituer 38 à 56% des éléments sous *Cassia*, 32 à 39% sous *Acacia* et 28 à 48% sous *Eucalyptus*.

Les valeurs soulignées correspondent au mode d'exploitation utilisé couramment en milieu paysan. Dans le cas de l'*Acacia*, le bois de diamètre inférieur à 7 cm est très épineux et difficile à manipuler si bien qu'il est en général abandonné sur le sol. Cette pratique permet de restituer au sol 55 à 61% des bioéléments avant les pertes dues au feu au moment de la remise en culture. Pour l'*Eucalyptus* et le *Cassia*, c'est la découpe 1 cm que les paysans retiennent comme limite utilisable en bois de feu, et dans ce cas, la restitution au sol correspondant aux plus petites branches de diamètre inférieur à 1 cm ne représente plus que 18 à 33% des bioéléments. En fait, ces espèces très prisées pour leur bois favorisent un mode d'exploitation des petits compartiments très exportateur d'éléments minéraux.

13. Fixation temporaire dans la partie aérienne de la strate herbacée

Le tapis herbacé se développe pendant la saison des pluies accomplissant son cycle végétatif pendant 5 à 7 mois et mobilisant une partie des éléments minéraux.

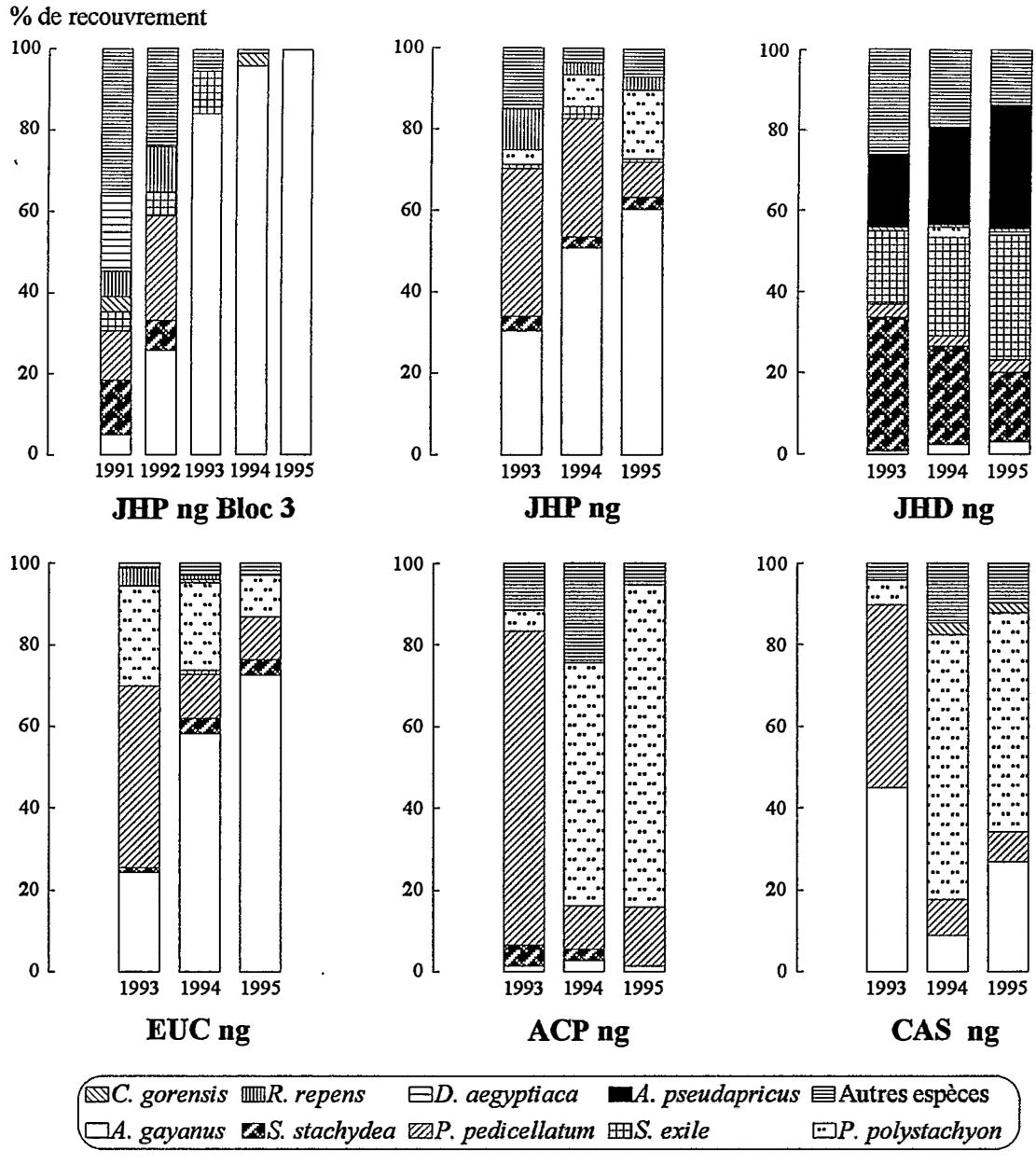


Figure 34 : Evolution de la contribution des espèces au recouvrement total herbacé dans les différentes jachères de Ngong.

131. Dynamique de la strate herbacée

Des relevés de végétation ont été effectués sur toutes les parcelles de jachère en fin de saison des pluies avec estimation d'un indice de recouvrement pour chaque espèce inventoriée, duquel a été déduit un indice moyen spécifique de recouvrement par traitement et par année. Cet indice a été transformé en pourcentage de recouvrement. La figure 34 résume le tableau de l'annexe 6 donnant l'évolution de la contribution des principales espèces au recouvrement herbacé

total. D'après les données de la parcelle du bloc 3b de la jachère herbacée protégée de Ngong, au cours des 2 premières années après abandon cultural (1991-1992), on assiste au remplacement des adventices de culture par des espèces de jachère dont les plus impliquées dans cette dynamique sont *Pennisetum spp.*. En situation de protection contre le feu et le pâturage et d'ensoleillement, ces espèces annuelles pionnières sont remplacées à leur tour par une espèce pérenne : *Andropogon gayanus*. Ainsi, cette dernière occupe rapidement une position dominante dans la jachère herbacée protégée et sous l'*Eucalyptus* dont la position verticale des feuilles laisse passer la lumière.

Sous *Acacia*, *Pennisetum pedicellatum* régresse et cède la place à *Pennisetum polystachyon* sans qu'*A. gayanus* ne puisse se développer, vraisemblablement gêné par un ombrage trop fort.

Sous *Cassia*, l'indice moyen de recouvrement total ne dépasse pas 30 %, indiquant un fort effet dépressif de l'arbre sur le développement de la strate herbacée. La relative ouverture du couvert arboré laisse supposer que le *Cassia* limite le développement des herbacées par un effet allélopathique.

Dans la jachère herbacée dégradée (JHD), les principales espèces sont *Andropogon pseudapricus*, *Schizachyrium exile*, *Spermacoce stachydea* et *Spermacoce radiata*. Les deux dernières espèces sont, dans cette localité, caractéristiques des stations soumises à une pression pastorale excessive (DONFACK P., communication personnelle). *A. gayanus* s'y installe sans parvenir à se développer car il est perpétuellement brouté.

Pour conclure, tout au long de la jachère, on s'est acheminé vers une réduction de la diversité floristique des formations herbacées, variable suivant le mode de protection et le type de couvert ligneux et des conséquences sont à prévoir sur la production de la strate herbacée.

132. Biomasse et production primaire aérienne de la strate herbacée

La biomasse herbacée maximale sur pied a été mesurée en fin de cycle de végétation, au moment de la fructification des principales espèces. Elle comprend la matière vivante et la matière morte "dressée" de l'année. Pour obtenir la production primaire annuelle de la strate herbacée, il faut ajouter à cette valeur la quantité d'organes morts tombés au sol au cours de la période de végétation. Cette quantité n'est pas directement mesurable en raison de la décomposition du matériel mort, or négliger cette valeur peut conduire à une sous-estimation importante de la production primaire : 36% pour les savanes sahéliennes d'après BILLE (1976) et 58% d'après

Tableau 22 : Biomasse et minéralomasse herbacée maximale (kg/ ha). Pour chaque année, les lettres a, b, c, etc indiquent les groupes homogènes au sens de l'ANOVA.

				Matière sèche					
			Ngong				**Mayo Dadi**		Seuil de
Année	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	Jachère dégradée	Jachère protégée	*Acacia*	*Cassia*	Jachère protégée	signification
1993	2700 c	2450 cd	2700 c	3150 bc	4470 a	3980 ab	1560 d	4440 a	0,0001
1994	660 d	360 d	3190 c	4540 b	6130 a	2830 c	1250 d	4540 b	0,0001
1995	2240 cd	180 e	3490 bc	4420 b	7890 a	3520 bc	1000 de	4250 b	0,0001
				Azote					
1993	24 ab	13 c	18 bc	25 ab	26 ab	24 ab	10 c	30 a	0,0001
1994	7 d	3 d	19 bc	25 ab	30 a	15 c	8 d	21 bc	0,0001
1995	29 b	2 c	25 b	32 ab	38 a	27 b	6 c	29 b	0,0001
				Phosphore					
1993	3,3 cd	1,7 d	5,8 b	3,0 cd	6,5 a	6,8 ab	4,0 c	8,4 a	0,0001
1994	0,8 e	0,4 e	5,5 b	3,3 cd	8,3 a	4,3 c	3,1 d	7,2 a	0,0001
1995	2,5 d	0,2 e	5,5 b	4,1 c	7,7 a	5,0 bc	2,2 d	7,2 a	0,0001
				Potassium					
1993	61 a	38 ab	41 ab	40 ab	50 a	60 a	24 b	59 a	0,036
1994	21 c	8 c	41 b	51 b	67 a	51 b	20 c	51 b	0,0001
1995	56 bc	4 d	47 c	58 bc	70 ab	81 a	12 d	65 ab	0,0001
				Calcium					
1993	10 b	8 b	11 b	32 a	30 a	16 b	7 b	40 a	0,0001
1994	2 d	1 d	11 c	30 a	19 b	8 c	5 cd	22 b	0,0001
1995	7 cd	1 d	14 bc	46 a	21 b	11 c	5 cd	46 a	0,0001
				Ma nesium					
1993	5,8 ecd	4,4 ed	5,1 ed	9,1 abc	10,4 ab	6,8 bcd	2,8 d	12,3 a	0,0001
1994	1,4 de	0,9 e	5,3 c	9,8 a	10,5 a	4,5 c	2,7 d	7,7 b	0,0001
1995	4,9 b	0,5 c	6,5 b	11 6 a	10 5 a	6 6 b	2 0 c	11 1 a	0,0001

CORNET (1981). Ce dernier taux, très élevé, s'explique par la nature du compartiment biomasse considéré, correspondant uniquement à de la matière vivante. En savane soudano-sahélienne constituée de graminées annuelles, BERNHARD-REVERSAT (1986) estime que la chute de litière herbacée ne dépasserait pas 15% de la biomasse maximale (biomasse vivante et morte sur pied). En savane soudanaise à graminées pérennes de Côte d'Ivoire, CESAR (1992) mesure dans différents facies l'évolution de la matière morte au sol. Partant d'une valeur pratiquement nulle en début de cycle végétatif en raison de l'élimination de la litière par le feu, celle-ci représente toujours environ 10 % de la phytomasse totale en fin de cycle. Si le taux annuel de décomposition est de l'ordre de 50 %, il parait alors raisonnable de majorer la biomasse maximale aérienne de 15 % pour estimer la production primaire de la strate herbacée et calculer le recyclage annuel d'éléments minéraux.

Les biomasses maximales herbacées des saisons 1993 à 1995 figurent sur le tableau 22. Les variations interannuelles indiquent une augmentation de 1993 à 1995 dans la jachère herbacée protégée et sous *Eucalyptus* à Ngong liée à la progression d'*A. gayanus* dans ces situations. Cette évolution ne correspond pas à la légère baisse de pluviométrie de 1993 à 1995, confortant ainsi l'hypothèse de l'effet de la succession végétale sur la biomasse. On assiste à une diminution progressive importante de la biomasse sous *Cassia* due vraisemblablement à l'effet dépressif de l'arbre. Cette tendance semble exister également sous *Acacia*, cependant la très faible biomasse enregistrée à Ngong en 1994 est surtout liée au fait que les *Pennisetum spp.* n'ont pas obtenu les conditions favorables à leur développement initial. En fait, la spécialisation du peuplement herbacé sous les arbres peut rendre sa régénération aléatoire. Dans la jachère herbacée protégée à Mayo Dadi, alors qu'on pouvait s'attendre à une augmentation de la biomasse au cours du temps, le peu de changement constaté semble être lié à des carences nutritionnelles du milieu.

Au cours d'une même année, il existe des différences significatives entre les situations avec, en 1995, la plus forte biomasse dans la jachère herbacée protégée (JHP) à Ngong (8 t. ha^{-1}) et la plus faible sous les *Cassia* (0,18 t. ha^{-1}). Dans la situation JHP à Ngong, la biomasse atteint plus de 10 t. ha^{-1} dans les zones de peuplement pur à *A. gayanus* correspondant à des valeurs citées en général pour des zones plus humides. MITJA et PUIG (1990) donnent une valeur sensiblement supérieure pour une jachère de 2 ans et de même facies en zone humide de Côte d'Ivoire. MENAUT et CESAR (1979) donnent des valeurs de 7 à 10 t. ha^{-1} de phytomasse épigée totale pour les savanes préforestières de Côte d'Ivoire et BERNHARD-REVERSAT (1993) trouve une valeur de 8,2 t. ha^{-1} pour la savane congolaise à *Loudetia* sous 1250 mm de

pluviométrie. Enfin, le chiffre de 4,5 t. ha^{-1} obtenu en jachère herbacée à Mayo Dadi correspond aux valeurs données par CESAR (1992) pour les savanes soudanaises de Côte d'Ivoire.

D'une manière générale, la biomasse diminue sous l'influence du couvert ligneux et parfois de façon très importante. Cet effet dépressif des ligneux sur la strate herbacée a déjà été évoqué par différents auteurs : RIPPSTEIN (1985) pour les savanes de l'Adamaoua camerounais et CESAR (1992) pour les savanes soudano-guinéennes de Côte d'Ivoire. Cependant, sous des climats plus secs, lorsque la densité d'arbres est faible (pluviométrie inférieure à 800 mm), l'effet s'inverse et différents auteurs rapportent que l'arbre augmente la productivité du tapis herbacé, en liaison avec une amélioration du bilan hydrique et de la disponibilité en éléments minéraux en particulier l'azote sous ombrage (WALKER, 1974 ; BERNHARD-REVERSAT, 1982 ; BELSKY et al., 1989 et 1993 ; GROUZIS et al., 1991).

133. Teneurs en éléments minéraux des plantes herbacées

Les concentrations des tissus mesurées pendant la période de biomasse maximale sont

Tableau 23 : Concentrations en bioéléments majeurs de la strate herbacée en période de biomasse maximale dans les différentes jachères (g pour 100 g de MS).

	Ngong					Mayo Dadi		
Année	ACP	CAS	EUC	JHD	JHP	ACP	CAS	JHP
Azote								
1993	0,90	0,51	0,67	0,81	0,59	0,59	0,65	0,69
1994	1,11	0,75	0,60	0,55	0,48	0,54	0,67	0,47
1995	1,29	1,00	0,72	0,73	0,48	0,77	0,59	0,69
Phosphore								
1993	0,12	0,07	0,21	0,10	0,15	0,17	0,26	0,19
1994	0,13	0,12	0,17	0,07	0,13	0,15	0,25	0,16
1995	0,11	0,12	0,16	0,09	0,10	0,14	0,22	0,17
Potassium								
1993	2,25	1,56	1,52	1,27	1,12	1,52	1,52	1,32
1994	3,12	2,24	1,29	1,13	1,10	1,81	1,59	1,11
1995	2,49	2,08	1,35	1,32	0,88	2,32	1,20	1,53
Calcium								
1993	0,35	0,34	0,42	1,02	0,68	0,41	0,43	0,91
1994	0,33	0,37	0,33	0,67	0,30	0,27	0,44	0,47
1995	0,31	0,65	0,40	1,03	0,27	0,30	0,51	1,09
Magnesium								
1993	0,22	0,18	0,19	0,29	0,23	0,17	0,18	0,28
1994	0,21	0,25	0,17	0,21	0,17	0,16	0,21	0,17
1995	0,22	0,27	0,19	0,26	0,13	0,19	0,20	0,26

données sur le tableau 23. La situation JHP à Ngong présente en général les plus faibles concentrations, au moins en N, K, Ca et Mg, en raison de la dilution des éléments minéraux dans une biomasse plus importante. Si on considère chaque site indépendamment, on note les plus fortes teneurs en N et K sous les *Acacia* et en P sous *Eucalyptus* dont la biomasse ligneuse est également la plus riche en P.

Les concentrations en P et K sous *Acacia* et *Eucalyptus* sont globalement comparables à celles données par BERNHARD-REVERSAT (1986) sous *Acacia seyal* et *Eucalyptus camaldulensis* en zone soudano-sahélienne du Sénégal. Par contre, si les teneurs en N sont équivalentes sous *Eucalyptus*, elles sont plus faibles sous *Acacia* dans nos stations où le sol est moins riche en azote probablement en raison de l'âge moins élevé de nos plantations.

Enfin, les teneurs en N, P et K de JHP à Ngong sont sensiblement plus élevées que celles données par CESAR (1992) pour les savanes périforestières de Côte d'Ivoire. La savane congolaise présente la même teneur en azote que JHP à Ngong.

Par rapport à leur importance dans la partie aérienne des herbacées, les éléments se classent en général dans l'ordre décroissant suivant : K > N > Ca > Mg ≥ P.

Concernant les variations inter annuelles (figure 35), les teneurs en éléments minéraux de la strate herbacée à Ngong décroissent avec l'augmentation de la biomasse, pour K dans toutes les situations, et pour les autres éléments dans les situations *Cassia* et JHP. Sous *Eucalyptus*, la forte teneur en P de la strate herbacée diminue aussi et de façon spectaculaire avec l'augmentation de la biomasse. Tout cela confirme que la production de matière sèche herbacée peut augmenter indépendamment de la nutrition minérale dans une certaine marge (BERNHARD-REVERSAT, 1986). On observe le phénomène inverse sous *Acacia* où la teneur en azote de la strate herbacée augmente fortement sans liaison avec la biomasse mais plutôt en relation avec l'amélioration progressive du statut azoté du sol. Si on considère chaque année individuellement, il existe une relation significative entre les teneurs en N et P ($0,67 < r < 0,77$), indiquant que la nutrition en P serait liée au niveau d'absorption de N sous *Acacia*. Cependant, les variations inter annuelles du niveau d'absorption de N ne semblent pas influencer le niveau d'absorption du P. Ce processus a déjà été observé par BERNHARD-REVERSAT (1986) pour la strate herbacée sous *Acacia* et *Eucalyptus* au Sénégal.

La comparaison des sites de Ngong et de Mayo Dadi est possible pour les situations jachère herbacée ayant des biomasses comparables : JHD à Ngong et JHP à Mayo Dadi et pour les traitements *Acacia* et *Cassia*. Elle indique en général, une plus faible teneur en N et une plus forte teneur en P de la strate herbacée à Mayo Dadi. Cela nous conduit à penser que la croissance

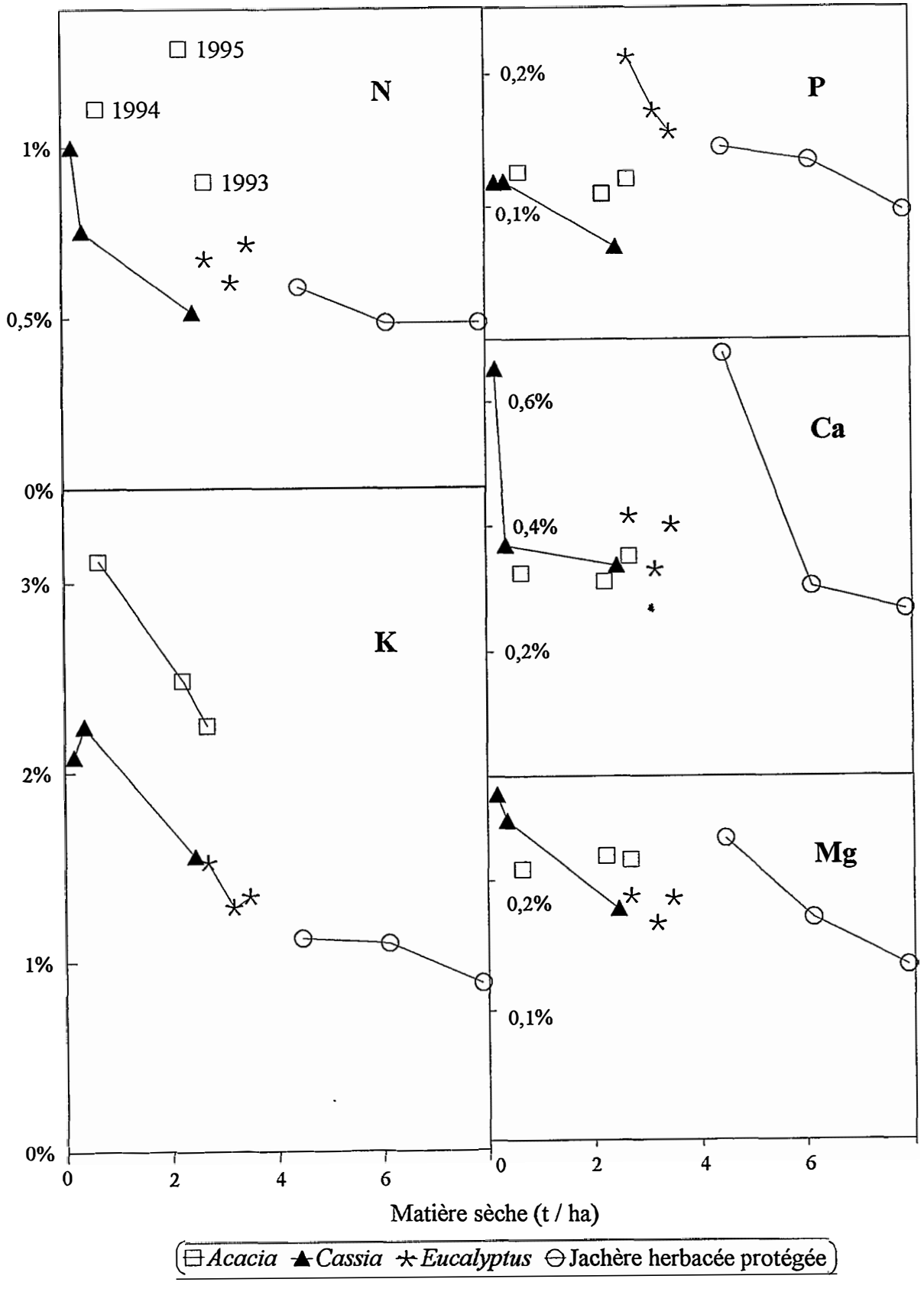


Figure 35 : Variations inter annuelles des teneurs en éléments minéraux de la strate herbacée en fonction de sa biomasse dans les différentes jachères à Ngong.

végétale serait limitée par la disponibilité en P à Ngong et par la disponibilité en N à Mayo Dadi. Cet aspect sera discuté au paragraphe 312 de ce chapitre portant sur les teneurs en éléments minéraux des litières d'arbres.

134. Minéralomasse de la partie aérienne de la strate herbacée

Les valeurs de fixation annuelle des éléments minéraux dans la biomasse herbacée maximale figurent sur le tableau 22. En raison d'une certaine proportionnalité entre la biomasse et la minéralomasse, les jachères herbacées présentent en général les plus forts niveaux de fixation alors que la situation *Cassia* présente les plus faibles. Les valeurs des jachères herbacées sont supérieures à celles trouvées par SICOT (1980) dans les savanes sahéliennes. Hormis des niveaux de fixation de N comparable et de Ca inférieur sous *Acacia,* nos valeurs de fixation sous *Acacia* et *Eucalyptus* sont supérieures à celles données par BERNHARD-REVERSAT (1986) en zone soudano-sahélienne. Nos valeurs de fixation de N, P et K dans les jachères herbacées non protégées sont sensiblement plus élevées que celles données par ABBADIE (1984) et CESAR (1992) pour les savanes périforestières de Côte d'Ivoire.

Dans la jachère herbacée protégée à Ngong, la relation entre biomasse et minéralomasse montre, qu'à partir d'une certaine quantité d'éléments immobilisés la minéralomasse n'augmente plus. On peut considérer alors qu'un niveau maximal de fixation des éléments minéraux dans la biomasse est atteint, exprimant un équilibre entre la potentialité du milieu et la capacité d'absorption racinaire des plantes. Cette minéralomasse est inférieure aux réserves disponibles du sol. Par rapport aux stocks d'éléments minéraux des horizons 0-40 cm et 0-90 cm (profondeur atteinte par les racines des herbacées), l'accumulation dans la state herbacée de JHP à Ngong représente, en 1995, respectivement 22% et 12% de P assimilable, 44% et 21% de K échangeable et quelques pour-cent de Ca et Mg seulement.

On constate le même phénomène de seuil avec le P sous *Eucalyptus*. Pour les autres situations, ce phénomène de seuil n'a pas été constaté et la minéralomasse croît avec la biomasse. Cela s'explique par l'existence d'autres facteurs limitant la production que la disponibilité en éléments minéraux. Dans les jachères arborées, il peut s'agir d'effets allélopathiques ou d'ombrage procurés par les arbres. Dans la jachère herbacée dégradée à Ngong, le facteur limitant est le pâturage et dans la jachère herbacée protégée à Mayo Dadi, il pourrait s'agir d'une carence en oligoéléments du milieu.

14. Accumulation dans la phytomasse racinaire

En zone soudanienne le système racinaire joue un rôle essentiel dans le stock de matière organique souvent faible et peu humifié des sols sableux pauvres en argile (MENAUT et al., 1985 ; HARMAND, cette étude). De plus, dans les jachères, les racines constituent la seule forme de production végétale qui échappe à l'exportation et au brûlis au moment de la remise en culture.

141. Phytomasse des grosses racines et souches des peuplements ligneux

Les prélèvements effectués au niveau d'un arbre moyen de chaque espèce ont permis une estimation approximative de la biomasse des grosses racines car aucune répétition n'a été effectuée. En supposant que la biomasse racinaire est proportionnelle à la biomasse aérienne, les résultats mentionnés sur le tableau 24 sont calculés à partir du rapport : biomasse aérienne réelle / biomasse aérienne définie à partir de l'arbre moyen ; le système racinaire latéral est séparé du système pivotant. Le tableau 24 illustre la concentration du système racinaire dans les couches supérieures du sol. Ce phénomène, évoqué par de nombreux auteurs, s'explique par la semi aridité du climat et l'existence des processus biologiques en surface. Néanmoins des différences de distribution racinaire apparaissent entre les sites et entre les espèces. A Ngong, la discontinuité texturale du profil caractérisée par l'augmentation brutale du taux d'argile en dessous de 40 cm de profondeur, a constitué un obstacle physique aux racines qui se sont développées plus

Tableau 24 : Répartition sur la profondeur 0-60 cm de la phytomasse des grosses racines latérales et phytomasse des souches des peuplements ligneux en janvier 96 (MS en t/ha).

		Ngong						Mayo Dadi			
		Acacia		*Cassia*		*Eucalyptus*		*Acacia*		*Cassia*	
	Horizon (cm)										
Racines latérales	0-10	7,31	49%	0,26	5%	1,37	14%	0,57	14%	0,04	1%
	10-20	6,75	45%	3,87	69%	3,74	39%	0,71	18%	1,49	44%
	20-30	0,35	2%	1,14	20%	2,72	29%	1,70	43%	0,47	14%
	30-40	0,32	2%	0,22	4%	1,07	11%	0,91	23%	0,43	12%
	40-50	0,18	1%	0,08	1%	0,48	5%	0,03	1%	0,41	12%
	50-60	0,12	1%	0,02	-	0,14	2%	0,04	1%	0,58	17%
Total racines latérales		15,03	100%	5,60	100%	9,52	100%	3,96	100%	3,42	100%
Souches + racines verticales *		4,10		3,73		4,31		2,51		2,70	
Total		19,13		9,33		13,8		6,47		6,12	

* Les racines verticales ont été prélevées sur la profondeur 0-60 cm.

superficiellement qu'à Mayo Dadi. Les plus faibles masses racinaires mesurées à Mayo Dadi sont dues au développement plus modeste de l'*Acacia* et à la distribution plus profonde des racines de *Cassia*. Le compartiment "grosses racines" situé en dessous de 60 cm de profondeur n'a pas été évalué mais il faut souligner qu'après 6 mois de plantation, le pivot du *Cassia* atteignait 2 m de profondeur.

A Ngong, l'*Acacia* présente la plus forte biomasse, essentiellement contenue dans l'horizon 0-20 cm en relation avec l'orientation horizontale de ses racines. Les systèmes racinaires latéraux d'*Eucalyptus* et *Cassia* sont plus profonds avec tout de même plus de 90% des racines dans l'horizon 0-40 cm, la majeure partie étant contenue dans l'horizon 10-30 cm. Les racines présentent alors une orientation subhorizontale. Les systèmes pivotants et les souches de ces deux dernières espèces ont une plus forte masse relative que celles de l'*Acacia* au développement racinaire plus superficiel.

Des fosses réalisées à Ngong en 1994 avaient permis d'observer la présence de racines chez *Acacia* et *Eucalyptus* jusqu'à des profondeurs respectives de 1,90 m et 2,50 m.

142. Phytomasse des racines fines des peuplements ligneux de Ngong

Les profils de racines fines (diamètre < 2 mm) établis en octobre 1995 au moment de la mesure de la biomasse herbacée maximale sont représentés sur la figure 36. La phytomasse racinaire contenue dans l'horizon 0-60 cm figure sur le tableau 25. D'une manière générale, les plus fortes phytomasses de racines fines se rencontrent sous les espèces *Cassia* et *Acacia* et les plus faibles sous *Eucalyptus* et jachère herbacée. On observe, comme pour les grosses racines, une plus forte concentration dans les couches supérieures à Ngong qu'à Mayo-Dadi.

Chez l'*Acacia,* le très fort développement du système racinaire dans l'horizon 0-10 cm facilite le recyclage des éléments minéraux par la litière et le pluviolessivage et correspond à la plus forte capacité de cette espèce à former un horizon organique de surface. Les espèces *Cassia* et *Eucalyptus* ont un système racinaire proportionnellement plus développé dans les horizons sous-jacents. Par rapport à l'*Acacia*, ce développement peut être lié à une plus forte dessiccation de l'horizon de surface pendant la période de végétation, et/ou à une moindre résistance des racines de ces espèces à la dessiccation.

C. siamea a développé son système racinaire de façon assez uniforme jusqu'à 30 cm de profondeur et présente la plus forte phytomasse de racines fines de toutes les espèces étudiées.

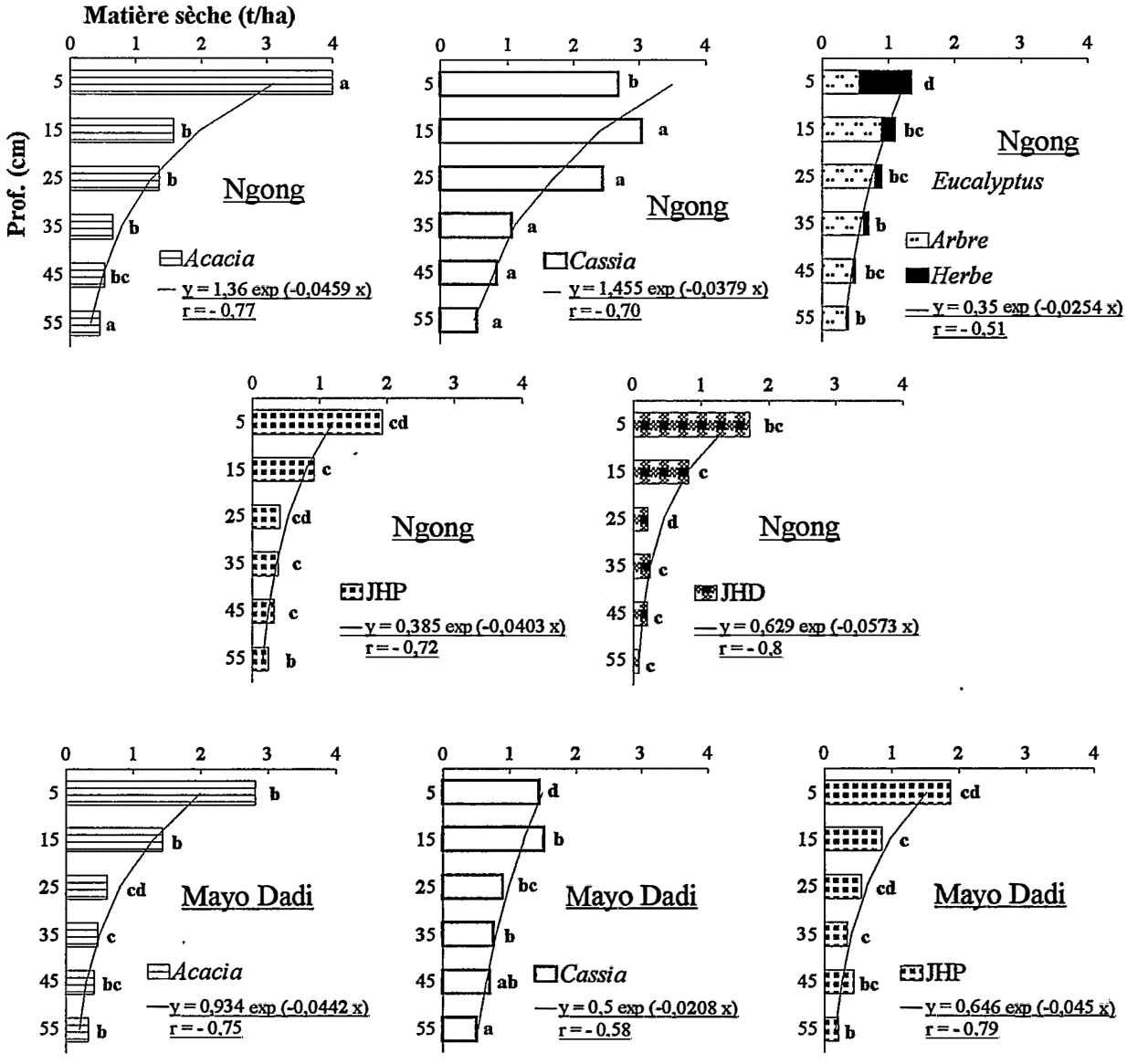


Figure 36 : Répartition dans le profil du sol et ajustement à une exponentielle de la phytomasse de racines fines des différents peuplements de jachère en 1995. Dans chaque horizon, pour tous traitements confondus, l'ANOVA montre des différences significatives (P = 0,0001). Les lettres a, b, c et d indiquent les groupes homogènes.

Ce comportement serait une caractéristique des espèces du genre *Cassia* qui exploitent au maximum l'azote et les éléments minéraux du sol (GARRITY et MERCADO, 1994). Dans un sol sableux, en Tanzanie, JONSSON et al. (1988) observent également la supériorité du *Cassia siamea* par rapport aux espèces *Leucaena leucocephala, Prosopis chilensis* et *Eucalyptus spp.* dans le développement des racines fines jusqu'à 60 cm de profondeur.

Chez l'*Eucalyptus,* la distinction des racines de l'arbre de celles des herbacées a pu être faite et les racines superficielles sont en majorité celles des graminées susceptibles d'exploiter les

éléments apportés par les litières et de concurrencer l'arbre. Cette constatation a déjà été faite par BERNHARD-REVERSAT (1986) au Sénégal. L'*Eucalyptus* présente la distribution racinaire verticale la plus homogène de tous les types de végétation. En Tanzanie, JONSSON et al. (1988) n'observent pas de variation de densité de racines fines de l'*Eucalyptus camaldulensis* jusqu'à 1 m de profondeur, et comparativement aux espèces *P. chilensis*, *L. leucocephala* et *C. siamea*, l'*Eucalyptus* présente la plus faible biomasse racinaire en surface et la plus forte en profondeur.

La phytomasse racinaire de la jachère herbacée protégée (4,34 t/ha), essentiellement constituée d'*Andropogon gayanus,* a été sous estimée en raison de la prise d'échantillons réalisée essentiellement à proximité des touffes et très peu à l'aplomb de celles-ci où se trouve la plus forte densité racinaire. A titre de comparaison, pour une jachère à *Andropogon gayanus* de 2 ans, la phytomasse hypogée de l'horizon 0-60 cm donnée par MITJA et PUIG (1990) est de l'ordre de 4,9 t/ha pour une phytomasse épigée maximale de 14,08 t/ha au lieu de 17,7 t/ha dans notre étude. Pour le même facies âgé de deux ans, CESAR et COULIBALY (1993) donnent une phytomasse racinaire de l'ordre de 5,5 t/ha pour une biomasse aérienne de seulement 2,0 t/ha.

La distribution racinaire fine dans le profil du sol s'ajuste à un modèle asymptotique $y = a\ e^{-bx}$ déjà utilisé par de nombreux auteurs, en particulier HUTTEL et BERNHARD-REVERSAT (1975) et CESAR et COULIBALY (1993). L'application de ce modèle à la profondeur 1,50 m permet d'estimer l'importance du système racinaire en dessous de l'horizon 0-60 cm. Il apparaît alors que, selon les espèces et le site, 70 à 85% des racines fines de la jachère seraient localisées au dessus de la profondeur 60 cm.

Le rapport : phytomasse de racines fines / biomasse aérienne, plus élevé chez le *Cassia* (tableau 25) que chez les autres espèces, suggère une aptitude différente du *Cassia* à utiliser les éléments minéraux. Il peut s'agir, d'une plus faible capacité d'absorption racinaire, d'une moindre disponibilité en éléments minéraux dans le sol en particulier en azote assimilable ou encore d'une moindre efficience d'utilisation des éléments minéraux. Les besoins établis pour la production de biomasse ligneuse aérienne (paragraphe 123 de ce chapitre) montrent effectivement une moindre efficience d'utilisation de N et de K du *Cassia* par rapport à l'*Eucalyptus.*

Le rapport : phytomasse des parties souterraines / biomasse aérienne est beaucoup plus élevé chez les *Cassia* et *Acacia* que chez l'*Eucalyptus.* Pour cette dernière espèce, il est proche de celui mesuré par WESTMAN et ROGERS (1977) s'élevant à 44,6%. Ce plus faible ratio

Tableau 25 : Phytomasse et minéralomasse souterraine des peuplements de jachère sur la profondeur 0-60 cm en 1995. Pour les racines fines, les lettres a, b, c, d et e indiquent les groupes homogènes au sens de l'ANOVA. Le seuil de signification obtenu pour chaque variable est P = 0,0001).

Lieu	Ngong					Mayo dadi		
Traitement	ACP	CAS	EUC	JHP	JHD	ACP	CAS	JHP
				Matière sèche				
Racines fines[1]	9,12 b	12,15 a	5,37 d	4,33 de	3,99 e	6,68 c	6,39 c	4,65 de
Grosses racines[1]	15,03	5,60	9,52			3,96	3,42	
Souches[1]	4,10	3,73	4,31	1,84*	0,96*	2,51	2,70	0,9*
Racines totales	**28,25**	**21,48**	**19,20**	**6,17**	**4,95**	**13,10**	**12,51**	**5,55**
Phytomasse aérienne	41,30	24,12	46,66	7,89	4,65			4,25
ratio 1 [2]	0,22	0,50	0,12					
ratio 2 [2]	0,68	0,89	0,41	0,78	1,06			1,31
				Azote				
Racines fines	190 a	130 b	52 c	55 c	67 c			
Grosses racines	123	21	42					
Souches	29	13	12	nd	nd			
Total	**342**	**165**	**106**					
				Phosphore				
Racines fines	7,0 a	7,1 a	3,2 b	3,5 b	4,1 b			
Grosses racines	7,9	3,3	2,4					
Souches	0,9	1,6	1,1					
Total	**15,8**	**12,0**	**6,7**					
				Potassium				
Racines fines	31 b	54 a	23 c	12 d	25 c			
Grosses racines	49	28	19					
Souches	22	18	5					
Total	**102**	**101**	**47**					
				Calcium				
Racines fines	115 a	127 a	89 b	29 d	54 c			
Grosses racines	68	33	113					
Souches	23	19	53					
Total	**206**	**179**	**256**					
				Magnesium				
Racines fines	15,5 a	13,3 b	7,0 c	4,1 d	8,3 c			
Grosses racines	11,6	1,6	4,0					
Souches	4,6	1,0	1,4					
Total	**31,7**	**15,9**	**12,3**					

[1] : Les grosses racines sont les racines latérales de diamètre supérieur à 2 mm, les souches comprennent le système racinaire vertical jusqu'à 60 cm de profondeur.
[2] : Le ratio 1 est le rapport de la phytomasse de racines fines sur la biomasse aérienne (phytomasse - litière au sol) ; le ratio 2 est le rapport de la phytomasse souterraine sur la biomasse aérienne (phytomasse - litière au sol).
* : La quantité de talles a été calculée à partir du rapport à la biomasse aérienne donnée par MITJA et PUIG (1989) pour une jachère à *Andropogon gayanus* de 2 ans.

correspond aux plus fortes productions aériennes ligneuses et herbacées de la plantation d'*Eucalyptus*. Celles-ci peuvent s'expliquer par une meilleure efficience d'utilisation de l'azote

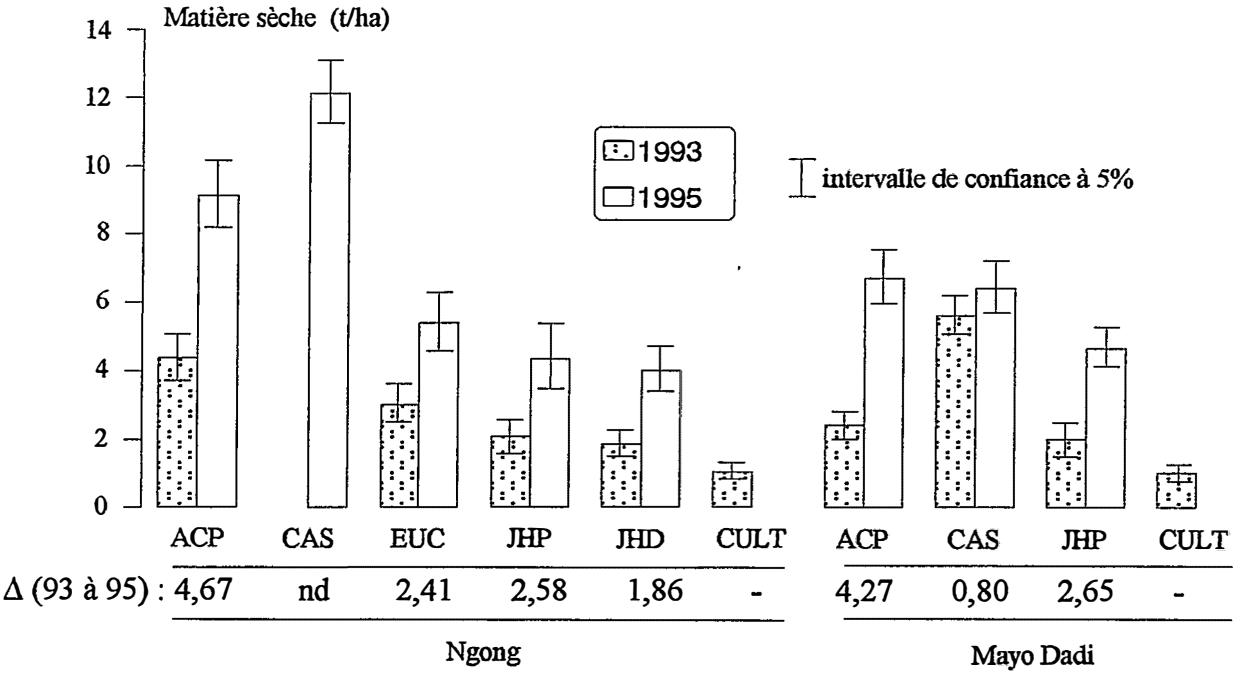


Figure 37 : Evolution des phytomasses de racines fines sur la profondeur 0-60 cm d'octobre 1993 à octobre 1995 (MS en t/ha).

et du potassium, mais aussi par une meilleure capacité d'absorption racinaire et un fort développement vertical du système racinaire favorisant des prélèvements de nutriments en profondeur, ce qui limiterait la concurrence de la strate herbacée.

La figure 37 donnant l'évolution des racines fines de 1993 à 1995 montre que l'augmentation du stock est la plus importante chez l'*Acacia*. Chez l'*Eucalyptus*, elle est comparable à celle des jachères herbacées.

A Mayo Dadi, le système racinaire de l'*Acacia* n'est pas différent de celui des jachères herbacées en 1993. Il croît remarquablement ensuite (2,1 t/an) en liaison avec le développement tardif de l'espèce et devient équivalent, en 1995, à celui du *Cassia* qui a peu évolué depuis 1993.

La très faible augmentation du stock de racines fines du *Cassia* peut être mis en relation, d'une part avec la faible croissance aérienne de l'arbre depuis 1993 (paragraphe 123 de ce chapitre) et d'autre part avec la stabilité du stock de litière au sol de 1993 à 1995 (paragraphe 151). Cela confirme que le *Cassia* a très fortement ralenti son développement général par rapport aux autres espèces.

143. Teneurs en éléments minéraux des racines à Ngong

Le tableau 26 donne les teneurs en bioéléments des racines pour chaque catégorie de dimension. Comme dans la biomasse ligneuse aérienne, la tendance générale est une augmentation des concentrations avec la diminution du diamètre des racines sauf pour K et P dans *Cassia*.

Le classement des espèces ligneuses en fonction de la teneur en éléments minéraux des racines est sensiblement le même que pour les parties ligneuses aériennes sauf pour le phosphore (voir page 89). En fait, le taux de phosphore est le plus faible dans les racines d'*Eucalyptus* et l'ordre de classement des espèces est celui du P dans les branches et les feuilles : *Acacia* > *Cassia* > *Eucalyptus*.

Les teneurs en éléments minéraux des racines varient avec la profondeur (figure 38) et sont souvent liées significativement aux teneurs du sol : 0,85 < r < 0,92 pour N dans les jachères ligneuses, r = 0,69 pour Ca dans ACP, r = 0,85 pour Mg dans EUC. Les plus fortes concentrations observées dans la couche superficielle sont dues à l'absorption des éléments apportés par les litières et le pluviolessivage et à l'existence des processus biologiques en surface, en particulier la minéralisation de la MO, source d'azote et de nutriments assimilables par les plantes. Les concentrations tendent à diminuer de la surface jusqu'à une profondeur variant de 30 à 50 cm selon l'élément et l'espèce. La tendance générale est à l'augmentation en dessous de la

Tableau 26 : Concentrations en bioéléments majeurs des racines de l'horizon 0-60 cm en fonction de l'espèce et de la taille du compartiment (résultats en g pour 100 g de MS).

	Acacia					*Cassia*				
Compartiment *	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
(7-10)	0,33	0,021	0,40	0,17	0,048					
(3 - 7)	0,85	0,051	0,32	0,48	0,077					
(1 - 3)	0,77	0,057	0,29	0,43	0,083	0,35	0,090	0,47	0,50	0,023
(0,2 - 1)	1,16	0,092	0,37	0,71	0,113	0,46	0,073	0,55	0,77	0,030
(0-0,2)	2,08	0,076	0,34	1,26	0,170	1,07	0,058	0,45	1,04	0,109
	Eucalyptus					Jachère herbacée protégée				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
(0-0,2)						1,27	0,080	0,28	0,67	0,095
(3 - 7)	0,33	0,023	0,14	1,18	0,023					
(1 - 3)	0,44	0,025	0,17	1,02	0,032	Jachère herbacée dégradée				
(0,2 - 1)	0,43	0,023	0,26	1,42	0,066	N	P	K	Ca	Mg
(0-0,2)	0,96	0,058	0,43	1,66	0,130	1,07	0,065	0,39	0,86	0,131

* Les limites de chaque compartiment sont données par les diamètres des racines exprimés en cm.

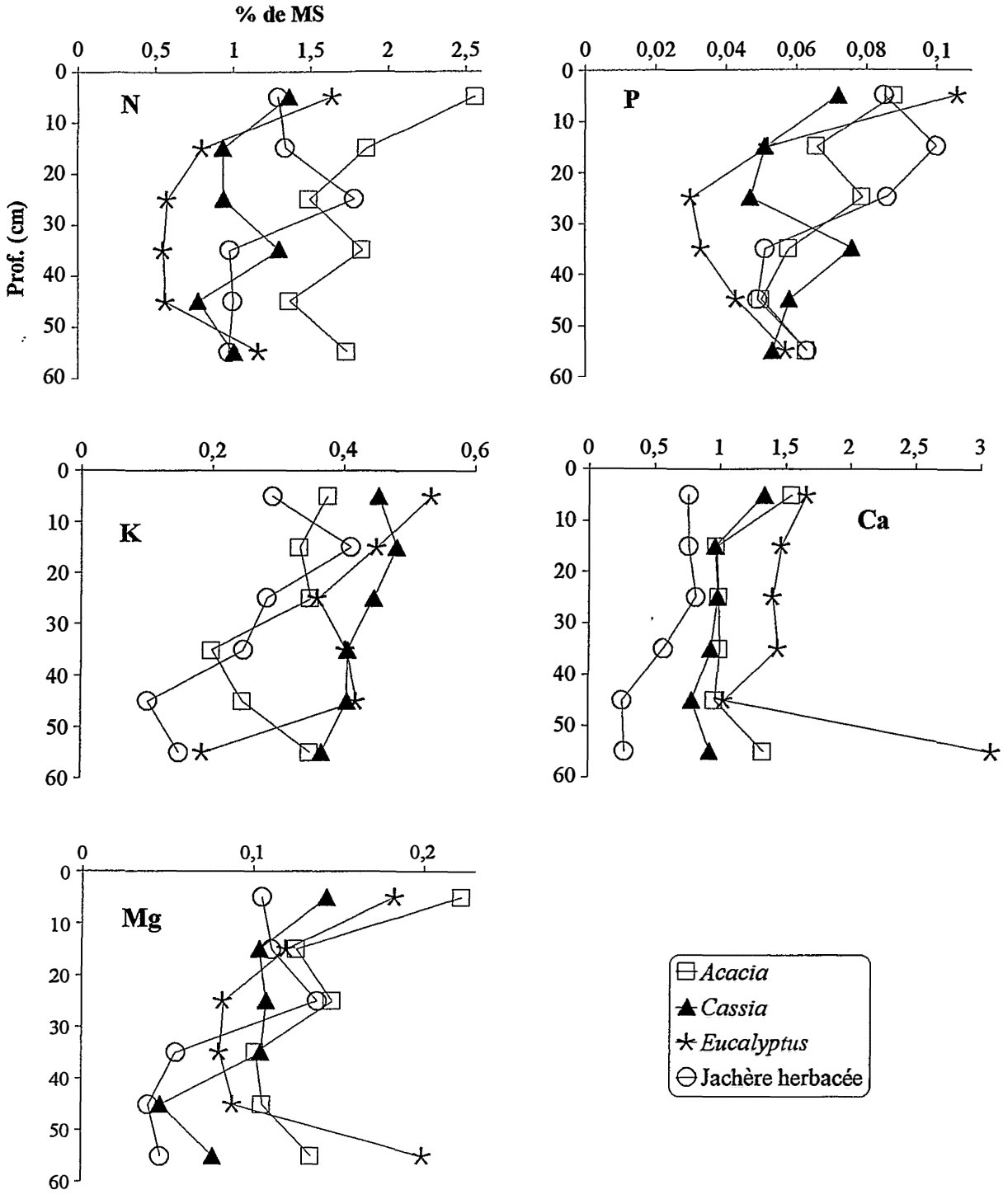


Figure 38 : Variations des teneurs en éléments minéraux des racines fines en fonction de la profondeur.

profondeur 50 cm en rapport avec une plus forte disponibilité en cations dans cette zone.

Tableau 27 : Stock de litière au sol en septembre-octobre 1995 (MO en kg/ha). Erreur standard de 10 prélèvements entre parenthèses. Les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Lieu	Ngong					Mayo dadi		Seuil de
Traitement	ACP	CAS	EUC	JHP	JHD	CAS	JHP	probabilité
Bois	121 3% (45)	474 17% (155)	2674 21% (332)			173 8% (52)		
Feuilles	1368 30% (207)	1624 58% (119)	2302 18% (145)			1138 55% (198)		
Herbe	585 13% (85)	313 11% (46)	3669 29% (577)	7974 (1097)	2476 (538)	614 30% (119)	2353 (296)	
Restant	2422 54% (186)	366 13% (58)	3982 32% (229)			131 6% (20)		
Total	**4497 c (422)**	**2778 d (137)**	**12627 a (655)**	**7974 b (1097)**	**2476 d (538)**	**2056 d (193)**	**2353 d (296)**	**0,0001**

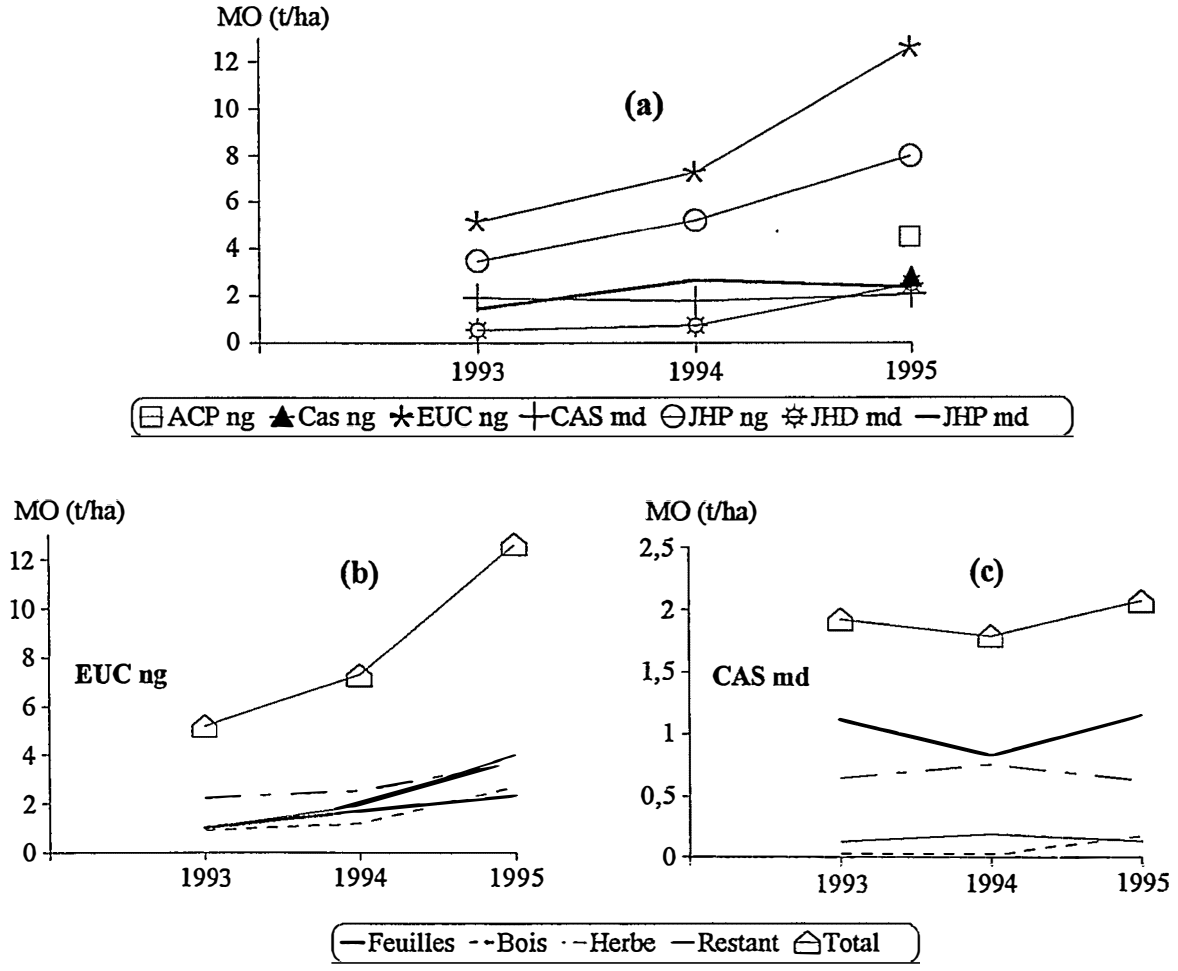


Figure 39 : Evolution inter annuelle du stock total de litière au sol dans les différentes situations **(a)** et évolution inter annuelle des stocks de fraction de litière sous *Eucalyptus* à Ngong **(b)** et sous *Cassia* à Mayo Dadi **(c)** (MO en t/ha).

144. Minéralomasse des parties souterraines

Les quantités d'éléments accumulées dans la phytomasse racinaire à Ngong en 1995 figurent sur le tableau 25. Toujours en raison d'une certaine proportionnalité entre biomasse et minéralomasse, l'*Acacia* présente les plus fortes valeurs d'accumulation, viennent ensuite, dans l'ordre, le *Cassia*, l'*Eucalyptus* et les jachères herbacées. Cet ordre n'est toutefois pas vérifié pour le Ca en quantité plus importante dans les racines d'*Eucalyptus* que chez les autres espèces.

Les développements racinaires relativement superficiels à Ngong favorisent une accumulation d'éléments minéraux dans les couches supérieures du sol ; en effet plus de 90% des éléments minéraux des systèmes souterrains limités à la profondeur 60 cm sont contenus dans l'horizon 0-40 cm. Chez l'*Acacia*, les 80% de la minéralomasse racinaire sont localisés dans l'horizon 0-20 cm.

15. Accumulation dans la litière au sol

151. Evolution du stock de litière au sol

La litière présente sur le sol est constituée de feuilles, de bois, d'herbe et de débris végétaux relativement dégradés. Cet état de dégradation plus ou moins avancé entraîne une certaine contamination à partir du sol. C'est pourquoi, une fraction de chaque échantillon de litière analysé a été calcinée à 550 °C afin d'évaluer la part de matériel minéral à déduire du poids initial. Les valeurs exprimées dans ce chapitre sont le résultat de cette différence, représentant uniquement du matériel organique.

Les prélèvements de septembre-octobre 1995 montrent de grandes différences de masse de litière au sol entre les situations (tableau 27). Ces différences se retrouvent en partie au niveau des différentes fractions et s'expliquent par l'évolution inter annuelle des stocks de litière. De 1993 à 1995, on constate une forte accumulation de matière organique sous *Eucalyptus* et jachère herbacée protégée à Ngong alors qu'une certaine stabilité du stock s'observe sous *Cassia* et jachère herbacée à Mayo Dadi (figure 39).

Dans la jachère herbacée à *Andropogon gayanus* de Ngong (JHP ng), la forte accumulation de litière (+ 52% par an) s'explique par le foisonnement important de la matière

Tableau 28 : Concentrations en bioéléments (% de la matière organique) de la litière au sol en septembre-octobre 1995. Les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Lieu	Ngong					Mayo dadi		Seuil de
Traitement	ACP	CAS	EUC	JHP	JHD	CAS	JHP	probabilité
				Azote				
Bois	1,26	0,88	0,38			0,72		
Feuilles	2,44	1,59	0,92			1,48		
Herbe	1,40	0,72	0,46	0,56	0,87	0,75	0,89	
Restant	3,20	1,76	1,48			1,76		
Total	**2,68 a**	**1,41 b**	**0,85 d**	**0,56 e**	**0,87 d**	**1,23 c**	**0,89 d**	**0,0001**
				Phosphore				
Bois	0,04	0,04	0,02			0,04		
Feuilles	0,09	0,07	0,04			0,09		
Herbe	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	
Restant	0,11	0,09	0,09			0,10		
Total	**0,10 a**	**0,07 c**	**0,05 d**	**0,05 d**	**0,06 cd**	**0,08 b**	**0,08 b**	**0,0001**
				Potassium				
Bois	0,17	0,20	0,15			0,22		
Feuilles	0,32	0,33	0,25			0,29		
Herbe	0,33	0,18	0,16	0,22	0,36	0,25	0,55	
Restant	0,32	0,35	0,38			0,30		
Total	**0,32 cb**	**0,31 cbd**	**0,24 cd**	**0,22 d**	**0,36 b**	**0,28 cbd**	**0,55 a**	**0,0001**
				Calcium				
Bois	2,00	1,81	2,07			1,47		
Feuilles	2,18	3,49	3,69			4,96		
Herbe	0,74	0,69	0,70	0,54	1,37	0,89	1,17	
Restant	2,61	3,60	3,64			4,07		
Total	**2,22 c**	**2,94 b**	**2,46 c**	**0,54 e**	**1,37 d**	**3,40 a**	**1,17 d**	**0,0001**
				Magnesium				
Bois	0,24	0,12	0,12			0,10		
Feuilles	0,38	0,15	0,20			0,18		
Herbe	0,18	0,08	0,11	0,12	0,20	0,09	0,18	
Restant	0,39	0,18	0,20			0,16		
Total	**0,35 a**	**0,14 de**	**0,16 cd**	**0,12 e**	**0,20 b**	**0,15 d**	**0,18 bc**	**0,0001**

Tableau 29 : Stocks des bioéléments dans la litière au sol en septembre-octobre 1995. Dans chaque ligne, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à P = 0,05.

Lieu	Ngong					Mayo dadi		Seuil de
Traitement	ACP	CAS	EUC	JHP	JHD	CAS	JHP	probabilité
Azote	120,2 a	38,8 bc	106,1 a	42,0 b	20,8 d	25,6 cd	20,4 d	0,0001
Phosphore	4,3 b	1,8 c	6,8 a	3,5 b	1,5 c	1,7 c	1,9 c	0,0001
Potassium	14,1 b	8,6 cd	30,4 a	16,2 b	8,4 cd	5,6 d	12,4 bc	0,0001
Calcium	101,1 b	80,1 b	311,1 a	41,7 cd	32,8 d	72,7 bc	27,0 d	0,0001
Magnesium	15,8 b	3,9 d	19,7 a	8,9 c	4,9 d	3,0 d	4,1 d	0,0001

morte qui reste, pour partie, longtemps suspendue au dessus du sol. Néanmoins, ce matériel mort n'a pas gêné le développement d'*Andropogon gayanus* dont le port dressé s'accommode bien d'un système litière développé (CESAR, 1992).

Sous *Eucalyptus*, la strate herbacée à *A. gayanus* contribue pour une part importante au stock de litière (29%). Le stock de feuilles présente une progression linéaire relativement faible (figure 39b). Le matériel organique restant, constitué en majorité de fragments de feuilles et d'herbe en cours de décomposition progresse fortement entre 94 et 95. De même, la part du bois augmente en raison des plus fortes restitutions liées au vieillissement du peuplement. Ces deux compartiments expliquent la forte augmentation du stock de litière au sol en 1995 (+ 74%) par rapport à 1994 (+ 41%).

Sous *Cassia* à Mayo Dadi, la masse de litière au sol présente une certaine stabilité dont les variations semblent liées à celles des feuilles qui constituent plus de la moitié du stock (figure 39c). Il est remarquable d'observer très peu de matériel végétal fragmenté sous cette espèce malgré l'absence d'accumulation apparente de litière. Cela signifie que les feuilles disparaissent rapidement après leur première fragmentation. On constate également que la part du bois augmente avec le temps.

La litière sous *Acacia* présente la plus forte proportion de matériel organique dit "fragmenté" (54%) ; il s'agit de matériel très fin constitué essentiellement de folioles.

Le plus faible stock observé sous jachère herbacée dégradée est dû aux prélèvements de la biomasse et de la litière par le pâturage. L'augmentation rapide du stock de 1994 à 1995 s'explique par une mise en défens de la zone au cours des saisons des pluies 94 et 95 ayant favorisé la production de biomasse et le dépôt de litière.

152. Composition chimique et évolution des stocks de bioéléments de la litière au sol

Le tableau 28 résume la composition chimique des différentes fractions de litière au sol en septembre-octobre 1995. Sous les peuplements ligneux, les fractions se classent dans l'ordre suivant en fonction de leur concentration en bioéléments :

- pour N, P et K : bois < herbe < feuilles < matériel organique restant,
- pour Ca et Mg : herbe < bois < feuilles ≤ matériel organique restant.

Le matériel organique restant, essentiellement constitué de débris végétaux relativement dégradés, est plus riche en N et P que les autres fractions. Ses concentrations en K, Ca et Mg sont souvent équivalentes à celles de la fraction feuilles. Ces observations indiquent que la litière, voie

de circulation des éléments dans l'écosystème, agit de façon discriminante dans la cinétique de ces éléments (RAPP et LEONARDI, 1988). Ainsi, au cours des processus biologiques de décomposition, il apparaît que certains éléments sont immobilisés alors que d'autres sont éliminés plus ou moins rapidement.

Hormis le cas de l'*Acacia* où l'azote est l'élément accumulé en plus grande quantité dans la litière, dans les autres situations c'est le calcium qui est le plus important. Il est suivi dans l'ordre par l'azote, le potassium, le magnésium et le phosphore.

La comparaison des différentes situations fait ressortir que la litière la plus concentrée en N, P et Mg se trouve sous *Acacia*, alors que la litière la moins riche en éléments minéraux se rencontre dans la jachère herbacée protégée en liaison avec les plus faibles concentrations de sa matière vivante (voir chapitre 133). La litière sous *Eucalyptus* présente également de très faibles teneurs en éléments minéraux sauf en calcium.

Le tableau 29 fait état des stocks de bioéléments dans la litière au sol en septembre-octobre 1995. Les plus faibles teneurs en éléments minéraux des litières sous JHP et *Eucalyptus* à Ngong sont largement compensées par la grande quantité de MO accumulée, si bien que l'*Eucalyptus* présente les stocks de bioéléments dans la litière les plus élevés. Il est suivi dans l'ordre par l'*Acacia* et la jachère herbacée protégée à Ngong, le *Cassia* et les autres jachères herbacées arrivant en dernier lieu.

L'annexe 7 indique que sous *Eucalyptus* et *Acacia* la fraction matériel organique restant constitue 45 à 60 % des stocks de bioéléments de la litière totale, alors que sous *Cassia* ce sont les feuilles qui présentent la plus forte contribution avec 60 à 70% des stocks. On constate également qu'il y a peu de variations interannuelles des concentrations si bien que l'évolution des stocks de bioéléments dans la litière au sol suit sensiblement celle de la matière organique durant la période 1993-1995.

16. Conclusion partielle sur le stockage des bioéléments

Même si les bilans écosystémiques et l'importance relative des différents compartiments de minéralomasse des jachères seront étudiés au chapitre V, on peut retenir de ce chapitre quelques points essentiels caractérisant le stockage des bioéléments.

A 7 ans, les productions ligneuses aériennes moyennes de l'*Acacia* (5,3 t MS /ha/an) et de l'*Eucalyptus* (5,7 t MS /ha/an) sont compararables alors que le peuplement de *Cassia* se

montre moins productif (3,8 t MS /ha/an).

De toutes les espèces ligneuses étudiées, l'*Acacia* présente dans tous ses compartiments de phytomasse la plus forte accumulation de N et de Mg. Le très fort développement racinaire de l'*Acacia* dans l'horizon 0-10 cm correspond à la plus forte capacité de cette espèce à reconstituer un horizon organique de surface.

En stockant de fortes quantités de N et de K dans sa biomasse ligneuse, le *Cassia* montre une mauvaise efficience d'utilisation de ces éléments. Le fort rapport phytomasse racinaire / phytomasse aérienne de cette espèce correspond vraisemblablement à une faible capacité d'absorption racinaire mais aussi à une forte accumulation relative des éléments minéraux dans les parties souterraines.

De toutes les espèces étudiées, l'*Eucalyptus* présente la meilleure efficience d'utilisation de l'azote et du potassium mais montre une forte accumulation de Ca et de P dans tous les compartiments de sa phytomasse totale aérienne. La faible efficience d'utilisation du phosphore de l'*Eucalyptus* à 7 ans confirme les résultats de travaux plus anciens (RAISON et CRANE, 1980). De toutes les jachères arborées, cette espèce présente la plus faible phytomasse racinaire et le plus faible rapport phytomasse racinaire / phytomasse aérienne ainsi que les plus fortes productions aériennes ligneuse et herbacée. Ce comportement correspond à une bonne efficience d'utilisation de l'azote mais suppose aussi une bonne capacité d'absorption racinaire et un fort développement racinaire vertical favorisant des prélèvements en profondeur. L'*Eucalyptus* présente également le plus fort stockage de bioéléments dans la litière au sol en rapport avec le rythme lent de décomposition de cette litière.

Avec l'exploitation du bois de diamètre supérieur à 3 cm, l'*Eucalyptus* présente les plus fortes exportations de Ca et P et l'*Acacia* les plus fortes exportations de Mg de tous les peuplements ligneux. L'écorce du tronc de ces espèces contient 50% à 80% des éléments Ca et Mg exportés.

La jachère herbacée à base d'*A. gayanus* présente en 1995 une production annuelle de l'ordre de 8 t MS/ha. On observe dans cette zone climatique avec 1100 mm de pluie une forte diminution de la production herbacée sous l'influence du couvert ligneux. L'*Eucalyptus* se montre le moins dépressif en permettant l'installation d'*A. gayanus* grâce à un ensoleillement suffisant (3,4 t MS/ha). Le *Cassia* élimine progressivement la strate herbacée sous son couvert.

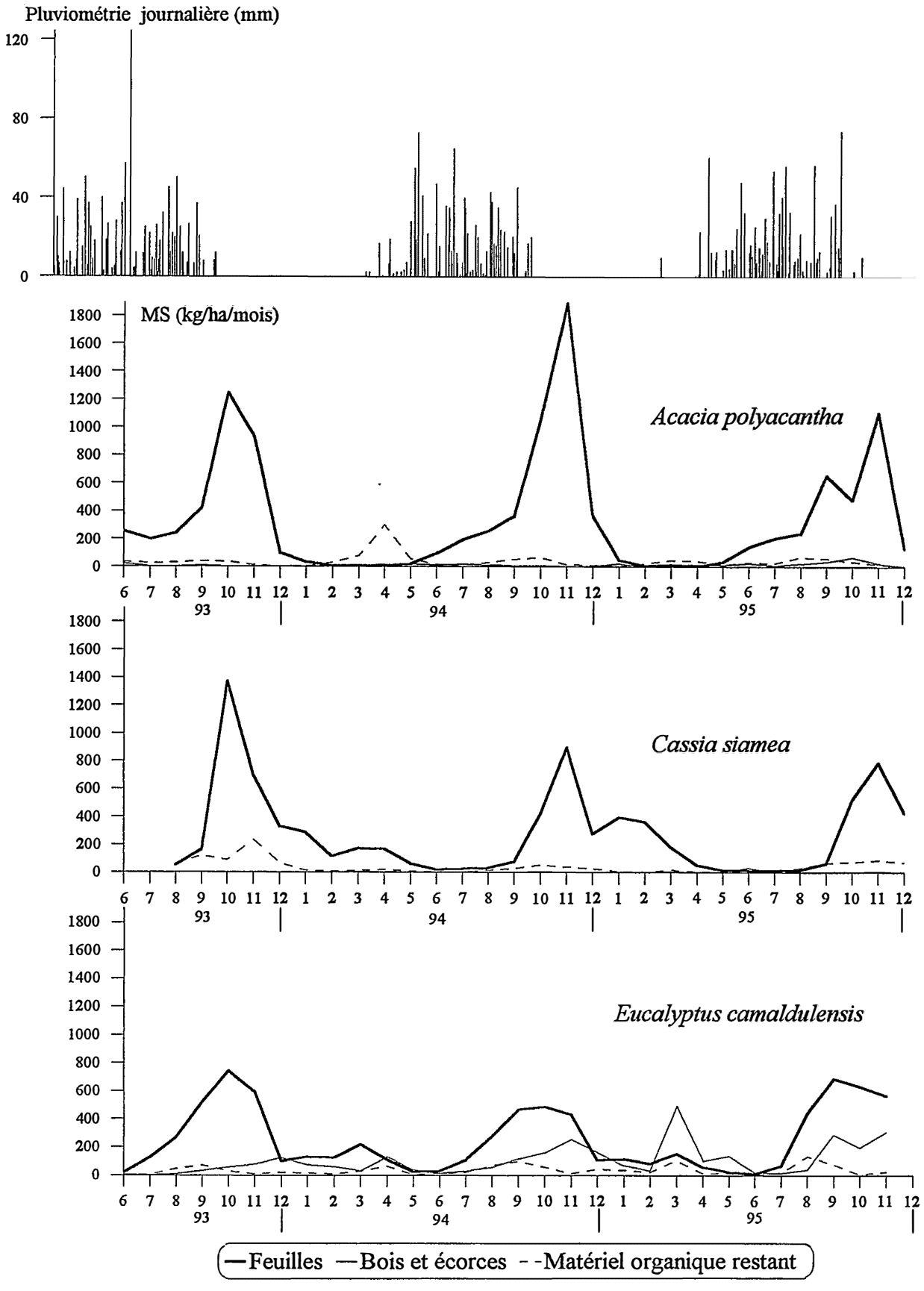


Figure 40 : Variations saisonnières de la chute de litière des arbres à Ngong.

2. LES FLUX DE BIOELEMENTS

21. Apports au sol par la litière des arbres

211. Production de litière par les arbres

La figure 40 donne les variations saisonnières de chute de litière des arbres à Ngong pendant deux ans et demi. Le compartiment feuilles des *Acacia* comprend les fleurs, dont la production se situe en juin-juillet, et qu'il n'a pas été possible de séparer des folioles. Pour toutes les espèces, la chute des feuilles commence au milieu ou à la fin de la saison des pluies, avec un pic de production en début de saison sèche. Contrairement aux *Acacia* qui perdent toutes leurs feuilles de septembre à décembre avec un maximum de retombée en octobre - novembre, les espèces sempervirentes présentent un étalement de la chute des feuilles jusqu'en mars. Chez l'*Eucalyptus*, la période de chute élevée est plus longue que chez le *Cassia*. BERNHARD-REVERSAT (1987b) mentionne des rythmes phénologiques comparables de chute des feuilles d'*Acacia seyal* et *Eucalyptus camaldulensis* en zone sahélienne au Sénégal (500 mm de pluviométrie annuelle).

Le tableau 30 récapitule les quantités de litière récoltées au cours des deux cycles annuels ayant fait l'objet d'un suivi complet. Chez *Acacia* et *Cassia* les feuilles représentent 83% à 97% des retombées de litière. Chez *Eucalyptus*, la proportion moins élevée en 1ère année (76%) tend à diminuer au cours des années suivantes avec l'augmentation des restitutions de bois et d'écorces liée au vieillissement du peuplement. Le coefficient de variation de la litière totale annuelle varie selon l'espèce : 6% sous *Acacia*, 12% sous *Eucalyptus* et 30% sous *Cassia*. La forte variabilité spatiale du dépôt de litière sous *Cassia* s'explique par l'hétérogénéité de développement de l'espèce à l'échelle de la parcelle, vraisemblablement liée à des effets de concurrence entre les arbres dès l'âge de 3 ans. Dans nos conditions stationnelles, l'écartement de plantation de 4 m x 4 m est certainement trop faible pour un développement régulier de cette espèce .

En première année d'observation (juin 1993 à mai 1994), la chute de litière sous les différentes espèces est équivalente au sein de chaque site. La production est beaucoup plus faible à Mayo Dadi qu'à Ngong en liaison avec le moindre développement des espèces dû à la plus faible potentialité édaphique du milieu. En deuxième année d'observation (juin 1994 à mai 1995), les productions de litière totale des *Acacia* et *Eucalyptus* à Ngong sont élevées et comparables. Celle

Tableau 30 : Production annuelle de litière des arbres (t MS/ha). L'ANOVA effectuée pour les compartiments feuilles et litière totale a montré un seuil de signification P = 0,0001. Pour chaque année, deux valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles.

Année	Lieu	Espèce	Feuilles			Bois et écorces		Reste		Total	
1	Ngong	*Acacia*	3,45	a	83%	0,06	2%	0,63	15%	4,14	a
		Cassia	3,40	a	84%	0,02	0%	0,63	16%	4,05	a
		Eucalyptus	2,95	a	76%	0,64	16%	0,30	8%	3,89	a
	Mayo Dadi	*Acacia*	1,03	b	92%	0,00	0%	0,08	7%	1,12	b
		Cassia	1,56	b	91%	0,01	0%	0,14	8%	1,71	b
2	Ngong	*Acacia*	4,30	a	91%	0,11	1%	0,32	7%	4,73	a
		Cassia	2,73	b	92%	0,03	1%	0,20	7%	2,96	b
		Eucalyptus	2,31	b	52%	1,61	36%	0,51	12%	4,43	a
	Mayo Dadi	*Acacia*	2,05	b	97%	0,01	0%	0,06	3%	2,12	b
		Cassia	2,24	b	94%	0,01	0%	0,13	6%	2,38	b
3*	Ngong	*Acacia*	(3,23)							(3,76)	
		Cassia	(1,82)							(3,27)	
		Eucalyptus	(2,38)							(4,85)	
	Mayo Dadi	*Acacia*	(2,05)							(2,23)	
		Cassia	(2,35)							(2,49)	

Année 1 : juin 1993 à mai 1994 ; Année 2 : juin 1994 à mai 1995,
* Année 3 : juin 1995 à mai 1996 (données obtenues par extrapolation à partir de 8 à 9 mois de récolte de litière).

Tableau 31 : Analyse des variations de production de litière (t MS/ha) de l'année 1 à l'année 2 selon le test t de Student.

		Feuilles		Total	
Lieu	Espèce	Variation de production	P	Variation de production	P
Ngong	*Acacia*	+0,85	0,0001	+0,59	0,005
	Cassia	-0,68	0,025	-1,10	0,0069
	Eucalyptus	-0,64	0,0011	+0,54	0,4 (ns)
Mayo Dadi	*Acacia*	+ 1,02	0,0007	+ 1,00	0,0003
	Cassia	+0,67	0,038	+0,67	0,04

P : niveau de signification du test t

de *Cassia*, ayant fortement chuté (tableau 31), est plus faible de 35% et se révèle statistiquement équivalente aux productions de Mayo Dadi. La diminution de production de litière du *Cassia* à Ngong correspond à un arrêt de développement de la plante qui présente en début de saison des pluies des signes de dépérissement caractérisés par le jaunissement des feuilles et la mortalité de portions de troncs et de branches.

L'analyse des variations de l'année 1 à l'année 2 indique également une augmentation significative de la litière totale à Mayo Dadi et de l'*Acacia* à Ngong.

Les variations interannuelles de production de litière totale correspondent à celles des feuilles, sauf pour l'*Eucalyptus* dont la diminution hautement significative de la litière de feuilles s'accompagne d'une augmentation des fractions bois et écorces. Même si le nombre de 3 années d'observation n'est pas suffisant pour établir des relations significatives, il est remarquable de constater que les productions annuelles de litières et les biomasses herbacées maximales varient en sens inverse pour l'*Acacia* à Ngong et Mayo Dadi et pour le *Cassia* à Mayo Dadi (tableau 22). On assiste alors à un phénomène de compétition entre l'arbre et la strate herbacée vis à vis des réserves en eau et en éléments disponibles du sol. Par contre, on constate une relation positive pour le *Cassia* à Ngong en liaison avec la diminution de la production globale du système et pas de relation chez l'*Eucalyptus*.

Globalement, on observe pour la station de Ngong, la plus fertile, et pour les espèces les plus productives, une retombée annuelle de litière comprise entre 3,8 t et 4,9 t/ha. La production du *Cassia*, souvent inférieure est comprise entre 3 et 4 t/ha. Pour la station moins fertile de Mayo Dadi, les retombées sont comprises entre 2 t et 2,5 t/ha, ce qui montre l'importance du milieu édaphique dans la production végétale en particulier la production de litière. Ces productions sont bien inférieures à celles données par les relations établies par COLLINS (1977) et VITOUSEK (1984) utilisant la pluviométrie annuelle dans le premier cas, et la température et la pluviométrie annuelle dans le second cas. Néanmoins, ces relations ne tiennent pas compte de la durée de la saison sèche et s'appuient en général sur des situations à sécheresse climatique moins marquée que celle de la zone soudanienne du Cameroun. Si à Ngong, le niveau de pluviométrie annuelle (1100 mm) est peu éloigné de celui de la zone de savane humide du Congo (1250 mm), le plus fort déficit de saturation : ETP = 1960 mm/an au lieu de 1180 mm au Congo, diminue la production végétale. Pour l'*Eucalyptus*, la retombée de litière annuelle à Ngong (4,6 t/ha) est intermédiaire entre la valeur de 2,9 t/ha mesurée par BERNHARD-REVERSAT (1987b) au sahel sénégalais à 500 mm de pluviométrie annuelle et les productions de litière d'*Eucalyptus* hybride au Congo s'élevant à 6-7 t/ha (BERNHARD-REVERSAT, 1993). Au Nigéria, en savane guinéenne avec 1430 mm de pluie et une saison sèche marquée d'une durée de 5 mois, MUOGHALU et al. (1993) donnent une production de litière du recru forestier à 7 ans de 4 à 6 t/ha. En forêt tropicale humide avec 1500 à 2100 mm de pluie, la production de litière est plus forte et atteint 8 à 15 t/ha (BERNHARD,1970).

Tableau 32 : Teneurs moyennes des litières de feuilles en éléments minéraux (% de MS). L'ANOVA effectuée pour chaque élément a montré un seuil de signification P = 0,0001. Pour chaque année, deux valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles.

Année	Lieu	Espèce	N	P	K	Ca	Mg	P/N*100
1	Ngong	*Acacia*	2,12 a	0,091 a	0,46 c	1,69 d	0,33 b	4,3 d
		Cassia	1,04 c	0,047 d	0,56 b	2,47 c	0,19 e	4,5 cd
		Eucalyptus	0,71 e	0,033 e	0,63 a	3,46 b	0,21 d	4,6 c
	Mayo Dadi	*Acacia*	1,32 b	0,073 b	0,57 b	1,55 e	0,38 a	5,5 b
		Cassia	0,83 d	0,057 c	0,31 d	3,56 a	0,29 c	6,8 a
2	Ngong	*Acacia*	2,15 a	0,099 a	0,84 a	1,68 d	0,34 a	4,6 c
		Cassia	0,99 c	0,048 d	0,66 c	2,47 c	0,16 d	4,8 b
		Eucalyptus	0,71 e	0,034 e	0,60 d	3,04 b	0,21 c	4,7 bc
	Mayo Dadi	*Acacia*	1,80 b	0,069 b	0,72 b	1,49 e	0,34 a	3,8 d
		Cassia	0,87 d	0,061 c	0,37 e	3,49 a	0,24 b	7,0 a
3*	Ngong	*Acacia*	2,34	0,103	0,64	1,57	0,32	4,2
		Cassia	0,97	0,065	0,55	2,76	0,15	6,7
		Eucalyptus	0,71	0,034	0,60	3,04	0,21	4,7
	Mayo Dadi	*Acacia*	2,01	0,084	0,70	1,43	0,33	4,2
		Cassia	0,94	0,080	0,40	3,78	0,25	8,5

* Année 3 : données obtenues par extrapolation

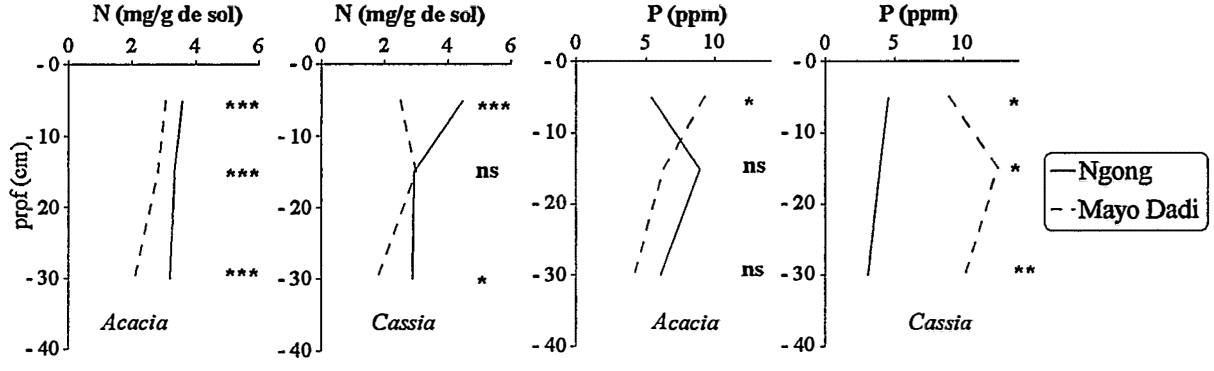


Figure 41 : Teneurs en azote total et phosphore assimilable du sol sous *Acacia* et *Cassia* en 1995. Le seuil de signification de l'ANOVA pour chaque horizon est précisé (*, **, *** ou ns).

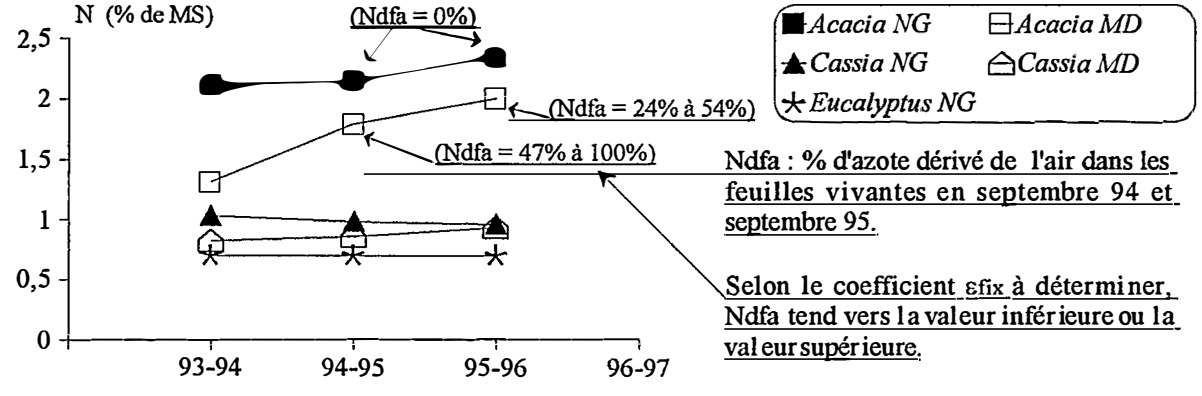


Figure 42 : Evolution interannuelle des concentrations en azote des litières de feuilles.

212. Teneurs en éléments minéraux des litières de feuilles

Le tableau 32 donne les valeurs moyennes des litières de feuilles. Il existe de fortes différences entre les espèces. L'*Acacia* présente en général les plus fortes teneurs en N, P, Mg et secondairement K et les plus faibles teneurs en Ca. A Ngong, les teneurs en N et P de l'*Acacia* représentent 2 fois celles du *Cassia* et 3 fois celles de l'*Eucalyptus*.

La comparaison des sites indique une plus faible teneur en N des litières à Mayo Dadi qu'à Ngong en accord avec un statut azoté du sol moins bon représenté sur la figure 41. De plus, les rapports P/N des litières en année 1 confirment la plus faible disponibilité en azote mais peut-être aussi la plus forte teneur en phosphore du sol à Mayo Dadi (tableau 32 et figure 41).

La faible teneur en azote de la litière d'*Acacia* à Mayo Dadi à l'année 1 (1,32%), s'accompagnant d'une teinte jaunâtre du feuillage, suggère une mauvaise activité fixatrice de la plante au départ, pouvant être liée à un déficit d'alimentation en P, Ca ou en oligoéléments. Il faut rappeler que le site de Mayo Dadi présente une réserve minérale, en particulier en Ca^{2+} et Mg^{2+} moins élevée qu'à Ngong en dessous de 40 cm de profondeur. A partir de 1993, la teneur en N de la litière d'*Acacia* à Mayo Dadi augmente de façon spectaculaire : + 36% de l'année 1 à l'année 2 et + 11% de l'année 2 à l'année 3, se rapprochant alors de celle de Ngong (figure 42). Ce phénomène suggère l'augmentation progressive des capacités de l'arbre à fixer l'azote de l'air et à améliorer son statut azoté. L'augmentation de la fixation est probablement due à l'accès du système racinaire de la plante à des réserves minérales en profondeur. D'autre part il apparaît, d'après les pourcentages tout à fait indicatifs d'azote fixé contenu dans les feuilles d'*Acacia* (Ndfa%) mentionnés sur la figure 42, qu'avec l'amélioration progressive du statut azoté de la plante, son potentiel fixateur d'azote diminue. Pour expliquer ce phénomène, il faut rappeler que la teneur en azote total du sol augmente de façon significative sous *Acacia* dès l'age de 4 ans (chapitre III) et comme nous le verrons au chapitre V, cet azote est fortement minéralisé. En accord avec DOMMERGUES (1995), la forte production d'azote minéral dans le sol serait alors le facteur inhibiteur de la fixation. L'augmentation de teneur en N des litières s'accompagne en année 2 d'une diminution significative de teneur en P et Ca en raison de leur dilution par augmentation de la production. Cela confirme que le développement des espèces fixatrices d'azote peut être limité par la disponibilité en phosphore (DOMMERGUES et al., 1984 ; HÖGBERG, 1986) et en calcium (VITOUSEK et SANFORD, 1986).

Concernant le *Cassia*, la forte baisse de production de litière à Ngong en année 2 s'accompagne d'une diminution légère mais significative de sa teneur en N. Le rapport P/N de sa

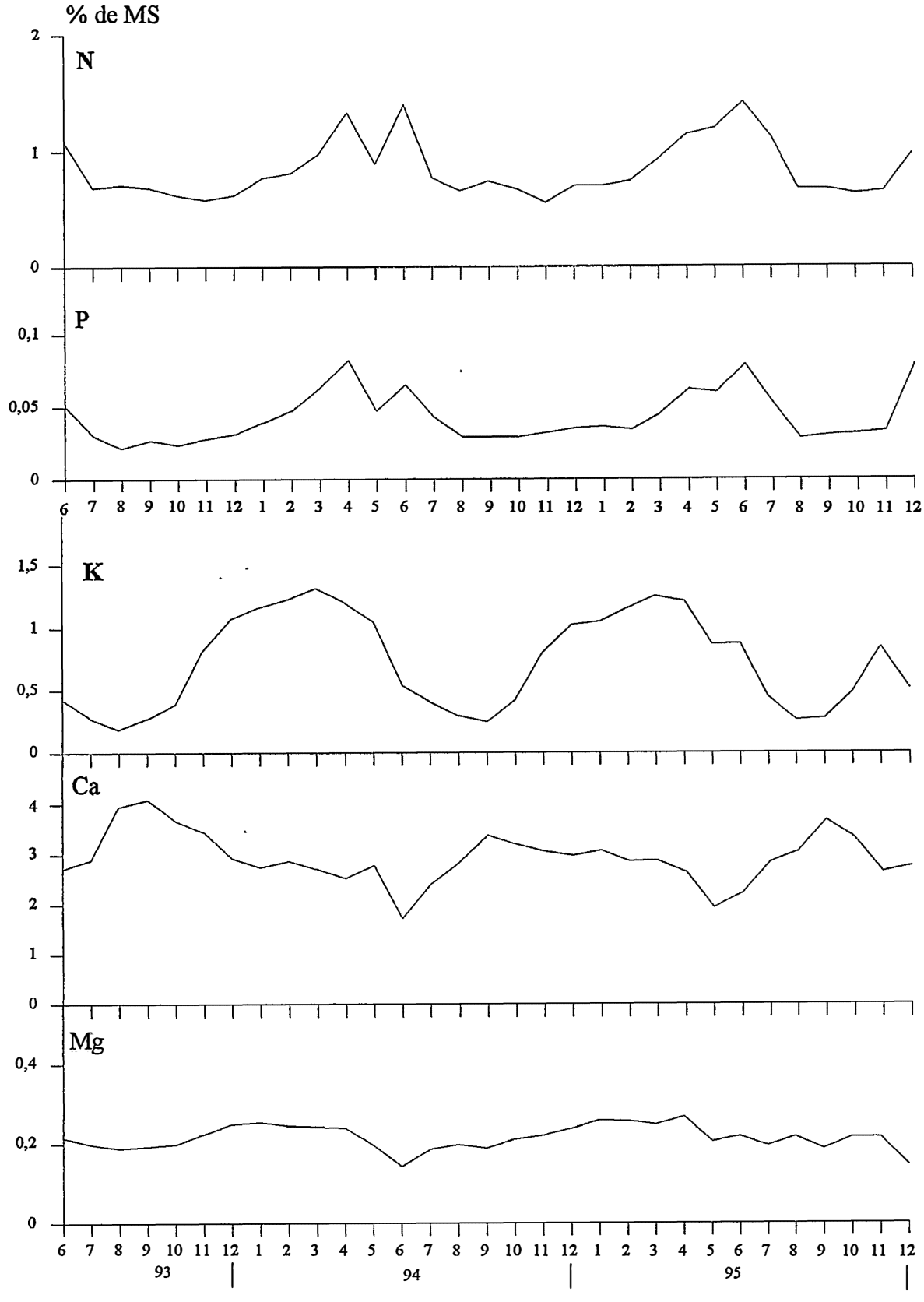


Figure 43 : Variations saisonnières des teneurs en éléments minéraux de la litière de feuilles d'*Eucalyptus* à Ngong.

litière augmente à Ngong et Mayo Dadi au cours des 3 années indiquant vraisemblablement une baisse progressive de disponibilité en N liée à un problème de recyclage de N par le *Cassia*. D'autre part, ce ratio est très différent du rapport P/N de l'*Acacia* en année 3. Selon HÖGBERG (1986), une grande différence entre les rapports P/N d'espèces fixatrices et non fixatrices indique que la faible disponibilité en azote du sol est le facteur limitant le développement des plantes non fixatrices. En revanche, si la différence entre les rapports P/N des espèces fixatrices et non fixatrices d'azote est faible (*Eucalyptus* et *Acacia* à Ngong et *Cassia* en année 1), cela peut signifier que la disponibilité en P du sol limite prioritairement le développement des espèces.

Les variations interannuelles montrent également que la baisse de production de litière de feuilles d'*Eucalyptus* de l'année 1 à l'année 2 s'accompagne d'une diminution significative de la teneur en Ca. Cette diminution, ne correspondant pas à une augmentation de l'immobilisation du Ca dans la strate herbacée, peut être mise en relation avec la désaturation du complexe absorbant et la moindre disponibilité en Ca échangeable du sol sous *Eucalyptus* liée aux prélèvements importants.

Les variations saisonnières des teneurs en éléments minéraux de la litière de feuilles d'*Eucalyptus* sont représentées sur la figure 43. A l'annexe 8, figurent les teneurs des litières des autres espèces qui montrent des variations saisonnières analogues. On remarque une diminution importante des teneurs en N et P juste avant le maximum de défoliation suggérant le retour de ces éléments vers les parties pérennes de la plante. La teneur en K diminue très fortement également en saison des pluies. Cette variation est liée en partie au lessivage de cet élément très mobile. Le Ca montre une variation saisonnière inverse de celle des éléments N, P et K avec une teneur maximale au moment de la forte défoliation suggérant une immobilisation de Ca dans la litière. Pour toutes les espèces, les variations des teneurs en P sont liées positivement à celles de N ($0,88 < r < 0,95$; $P = 0,0001$) alors que les variations de Ca sont corrélées négativement avec celles de N, P et K ($-0,32 < r < -0,75$; $0,0001 < P < 0,04$). Les plus fortes corrélations existent chez les espèces non fixatrices d'azote (voir annexe 8).

Le phénomène de transfert des éléments vers les parties pérennes de la plante au moment de la sénescence des feuilles ne peut pas être évalué simplement en comparant les concentrations dans les litières et dans les feuilles vivantes car il s'accompagne d'un retour de substances nutritives. En considérant que le calcium présent dans les feuilles est en très grande partie immobilisé au moment de la sénescence de celles-ci, le taux de translocation des éléments peut

Tableau 33 : Comparaison des teneurs en bioéléments des feuilles (des arbres et des retombées de litière) en novembre 1994 et pourcentage de translocation avant abscission.

Espèce	compartiments prélevés en novembre 94	Concentration en bioéléments					Taux de translocation des éléments			
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Mg
Acacia	feuilles vertes	2,57	0,162	1,25	1,79	0,40	23%	40%	15%	4%
	litière de feuilles	1,92	0,095	1,04	1,73	0,37				
Eucalyptus	feuilles vertes	1,56	0,098	1,22	2,86	0,27	67%	69%	38%	22%
	litière de feuilles	0,55	0,032	0,81	3,05	0,22				
Cassia	feuilles vertes	2,19	0,125	0,88	2,09	0,19	59%	64%	30%	29%
	litière de feuilles	0,97	0,049	0,67	2,25	0,15				

Tableau 34 : Apports annuels de MS et d'éléments minéraux au sol par la litière d'arbre (kg/ha).
L'ANOVA effectuée pour chaque élément a montré un niveau de signification P = 0,0001. Pour chaque année, deux valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes entre elles.

Année	Lieu	Espèce	MS		N		P		K		Ca		Mg	
1	Ngong	*Acacia*	4140	a	87	a	4,1	a	22	b	68	c	13	a
		Cassia	4050	a	49	b	2,9	b	29	a	89	b	8	b
		Eucalyptus	3890	a	26	c	1,3	c	25	b	115	a	7	b
	Mayo Dadi	*Acacia*	1120	b	16	d	0,9	c	7	c	17	d	4	c
		Cassia	1710	b	16	d	1,2	c	7	c	57	c	5	c
2	Ngong	*Acacia*	4730	a	100	a	4,8	a	38	a	80	b	16	a
		Cassia	2960	b	31	bc	1,7	b	21	b	69	b	5	c
		Eucalyptus	4430	a	28	cd	1,5	b	29	b	109	a	9	b
	Mayo Dadi	*Acacia*	2120	b	39	b	1,5	b	15	c	31	c	7	b
		Cassia	2380	b	22	d	1,6	b	10	c	79	b	6	bc
3 *	Ngong	*Acacia*			84		3,5		22		57		11	
		Cassia			36		2,5		22		79		5	
		Eucalyptus			28		1,4		26		125		8	
	Mayo Dadi	*Acacia*			45		1,9		16		33		7	
		Cassia			25		2,2		12		88		6	

* Année 3 : données obtenues par extrapolation

être donné par la formule de VITOUSEK et SANFORD (1986) :

$$\text{taux de translocation (\%)} = (1 - \frac{X}{Y}) \times 100$$

X = (teneur en élément de la litière) / (teneur en Ca de la litière)

Y = (teneur en élément des feuilles sur l'arbre) / (teneur en Ca des feuilles sur l'arbre)

Les taux de transfert donnés par le tableau 33 ne sont qu'indicatifs car ils reposent sur un

seul prélèvement de feuilles et de chute mensuelle de litière collecté en novembre 1994, au maximum de défoliation. Cependant, l'évaluation de la translocation durant un mois sec n'est pas perturbée par le pluviolessivage en particulier du K. Le phosphore présente la plus forte migration interne, viennent ensuite l'azote, puis le potassium et enfin le magnésium. Chez l'*Eucalytus* les 2/3 de N et P sont concernés et chez le *Cassia* les transferts sont presque aussi élevés. Les données de NJOUKAM (1995) permettent d'évaluer des taux comparables chez *Pinus kesiya* et *Eucalyptus saligna* sur sol ferralitique en savane humide d'altitude au Cameroun. De même, VITOUSEK et SANFORD (1986) donnent des taux semblables de translocation du P sur les sols peu fertiles d'Amérique du Sud. En revanche les transferts internes d'éléments sont beaucoup plus faibles chez l'*Acacia*.

Ces processus correspondent à une aptitude différente des espèces à recycler les éléments minéraux (HOBBIE, 1992). Selon CHAPIN (1980) les espèces à feuilles persistantes comme le *Cassia* ou l'*Eucalyptus* ont des litières relativement pauvres en éléments minéraux, et des taux de translocation élevés afin de s'adapter à des milieux pauvres et le recyclage d'éléments minéraux par la litière est assez faible. A l'inverse, l'*Acacia* présenterait des caractéristiques d'adaptation aux sols riches avec une litière riche en éléments minéraux favorisant le recyclage des éléments par le sol.

213. Apports annuels de bioéléments au sol par la litière des arbres

Les résultats figurent sur le tableau 34. Ils montrent une variabilité interannuelle liée essentiellement à celle de la matière organique. A Ngong, les restitutions de N, P et Mg par la litière d'*Âcacia* correspondent respectivement en moyenne à 2,3 - 1,8 - 2,2 fois celles de *Cassia* et 3,3 - 2,9 - 1,5 fois celles de l'*Eucalyptus*. Les restitutions de Ca par la litière d'*Eucalyptus* sont les plus importantes.

22. Apports au sol par la strate herbacée

Dans l'évaluation des apports au sol par la strate herbacée, il est nécessaire de séparer les situations où les plantes herbacés pérennes dominent (jachère herbacée protégée et *Eucalyptus*) de celles à plantes annuelles (*Acacia*, jachère herbacée dégradée).

Pour les plantes herbacées pérennes, il est indispensable de distinguer la part d'éléments minéraux qui retournent aux racines au moment de la maturation et du dessèchement des plantes

Tableau 35 : Apports annuels de matière sèche (MS) et d'éléments minéraux au sol par la litière herbacée (kg/ha).

	Matière sèche							
	Ngong					Mayo Dadi		
Année	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	Jachère dégradée	Jachère protégée	*Acacia*	*Cassia*	Jachère protégée
1993	3020	2750	2570	3520	3750	4450	1310	3730
1994	740	300	2680	5090	5150	3170	1050	3810
1995	2510	150	2930	4950	6620	3940	840	3570
	Azote							
1993	27	14	10	29	15	26	6	17
1994	8	2	11	28	17	17	5	12
1995	32	1	14	36	21	30	3	16
	Phosphore							
1993	3,7	1,6	5,5	3,4	4,9	7,6	3,0	6,3
1994	0,9	0,3	5,2	3,7	6,2	4,9	2,3	5,4
1995	2,8	0,2	5,2	4,6	5,8	5,6	1,7	5,4
	Potassium							
1993	68	41	44	45	42	68	20	49
1994	23	9	44	57	57	57	17	57
1995	62	3	50	65	59	91	10	73
	Calcium							
1993	10	9	12	35	33	18	7	44
1994	2	1	12	33	20	8	6	24
1995	8	1	15	50	23	12	6	51
	Magnésium							
1993	6,4	4,8	5,6	10,0	11,4	7,5	3,1	13,5
1994	1,5	1,0	5,9	10,7	11,5	5,0	2,9	8,5
1995	5,4	0,5	7,1	12,8	11,6	7,3	2,2	12,2

Tableau 36 : Comparaison des teneurs en bioéléments d'*Andropogon gayanus* en octobre et décembre 95 et pourcentage de translocation au moment du séchage.

Situation	Compartiments	Concentration en bioéléments					Taux de translocation des éléments			
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Mg
Eucalyptus	biomasse verte	0,74	0,171	1,39	0,40	0,19	56%	15%	5%	0%
		(0,03)*	(0,020)	(0,07)	(0,02)	(0,01)				
	biomasse sèche	0,22	0,098	0,89	0,27	0,14				
		(0,01)	(0,007)	(0,02)	(0,02)	(0,01)				
Jachère herbacée	biomasse verte	0,44	0,083	0,70	0,26	0,12	61%	33%	25%	0%
		(0,04)	(0,006)	(0,05)	(0,02)	(0,01)				
	biomasse sèche	0,16	0,053	0,50	0,25	0,11				
		(0,02)	(0,004)	(0,05)	(0,02)	(0,01)				

* erreur standard entre parenthèses

(VILLECOURT et al., 1979) et la part restant dans la biomasse aérienne qui sera recyclée sous forme de litière. Cette distinction est faite en évaluant un taux de translocation des éléments par comparaison des concentrations des biomasses vertes mesurées au maximum de végétation à celles des biomasses sèches, selon la formule de VITOUSEK et SANFORD (1986). Les incertitudes concernent, d'une part la quantité de matériel aérien qui ne reste pas dressé et qui retourne au sol en tant que litière avant les mesures de biomasse, d'autre part la masse de racines qui meurent et recyclent les éléments minéraux. Dans notre étude la perte par chute de litière est estimée à 10-15% de la biomasse mesurée et les taux de translocation des éléments évalués à partir des mesures de concentrations des herbacées d'octobre et décembre 1995 figurent sur le tableau 36. Le taux de transfert de N évalué à 55% en considérant le Ca constant est supérieur aux taux de transfert des substances nutritives évalués par photométrie par CESAR (1992) pour les savanes de Lamto (39 à 50 %). Cela s'explique par la nature des compartiments mis en comparaison. En effet, les échantillons prélevés en décembre 1995 sont vraisemblablement plus pauvres en feuilles que ceux prélevés en octobre et par conséquent moins riches en certains éléments minéraux en particulier le Ca. CESAR (1992) donne des teneurs en N des feuilles correspondant à 3 fois celles des tiges et des teneurs en P et K sensiblement équivalentes pour les deux compartiments. On retiendra par conséquent le taux de translocation de 50% pour les substances nutritives et l'azote et ceux donnés par le tableau 36 pour P et K.

A propos des plantes herbacées annuelles, on peut considérer que toute la biomasse maximale aérienne et souterraine est recyclée comme litière, le transfert vers les racines n'interférant pas. Les parties qui retournent au sol comme litière avant la mesure de biomasse aérienne sont estimées à 10-15% de cette valeur.

Tableau 37 : Flux de MO et de bioéléments dans la litière sous *Eucalyptus* et % de disparition entre octobre 1993 et octobre 1994 à Ngong.

	MO	N	P	K	Ca	Mg
L_1 : stock au sol en octobre 93 (kg/ha)	5170	41	2,7	14	130	7,4
L_2 : stock au sol en octobre 94 (kg/ha)	7270	72	4,2	21	201	10,2
$L_2 - L_1$: accroissement du stock au sol (kg/ha)	2100	31	1,5	7	71	2,8
A : apport au sol entre octobre 93 et 94 (kg/ha)	6710	39	7,0	72	129	13,6
$Xd = A + L_1 - L_2$: pertes réelles = disparition (kg/ha)	4610	8	5,5	65	57	10,8
kr : % de disparition	39	10	57	76	22	51

Tableau 38 : Flux de MO et de bioéléments dans les différentes fractions de litière sous *Eucalyptus* et % de disparition entre octobre 1993 et octobre 1995 à Ngong. Légendes : voir tableau 37.

		Année 1 *					Année 2 *				
		Feuilles	Herbe	Bois + écorce	Reste	Total	Feuilles	Herbe	Bois + écorce	Reste	Total
MO	A (kg/ha)	2980	2490	830	410	6710	2620	2600	1740	470	7430
	% Total apports	44	37	12	6	100	35	35	23	6	100
	Xd (kg/ha)	1580	2200	560	270	4610	1990	1440	250	-1740	1950
	kr (%)	35	47	32		39	46	28	9		13
N	A (kg/ha)	22	10	3	4	39	19	11	6	4	40
	% Total apports	57	26	6	10	100	48	27	15	10	100
	Xd (kg/ha)	4	5	0,3	-1	8	15	13	2	-27	2
	kr (%)	9	23	5		10	41	44	15		2
P	A (kg/ha)	1,1	5,5	0,1	0,3	7,0	0,9	5,2	0,3	0,4	6,8
	% Total apports	15	78	2	5	100	13	77	4	6	100
	Xd (kg/ha)	0,00	5,3	0,03	0,2	5,5	0,8	4,8	0,05	-1,5	4,1
	kr (%)	-1	81	9		57	45	73	9		37
K	A (kg/ha)	20	44	4	4	72	16	44	7	6	72
	% Total apports	27	61	6	6	100	22	60	9	9	100
	Xd (kg/ha)	15	44	4	2	65	13	42	5	1	62
	kr (%)	64	91	68		76	70	88	56		66
Ca	A (kg/ha)	99	12	12	5	129	88	12	29	5	134
	% Total apports	77	10	9	4	100	66	9	21	4	100
	Xd (kg/ha)	57	7	-5	-2	57	71	17	9	-78	19
	kr (%)	33	19	-16		22	45	41	14		6
Mg	A (kg/ha)	6,6	5,6	0,8	0,6	13,6	5,9	5,9	2,2	0,7	14,6
	% Total apports	49	41	6	5	100	40	40	15	5	100
	Xd (kg/ha)	4,7	5,4	0,3	0,4	10,8	4,2	4,6	0,4	-4,4	4,8
	kr (%)	48	67	18		51	48	54	11		19

* Année 1 : octobre 93 à octobre 94 , Année 2 : octobre 94 à octobre 95.

A partir des données du tableau 22 et en utilisant les critères précédents, il est possible d'évaluer les quantités de MS et de bioéléments restituées au sol chaque année par l'intermédiaire de la biomasse herbacée aérienne. Ces quantités figurent sur le tableau 35.

Les jachères herbacées présentent en général les plus forts niveaux de restitution et le *Cassia* les plus faibles. On note également des apports importants de P et K sous *Eucalyptus* et de N et K sous l'espèce fixatrice d'azote.

Sous *Eucalyptus*, les apports par la strate herbacée représentent respectivement 50%, 300%, 200%, 11% et 80% des apports de N, P, K, Ca et Mg par la litière d'arbres. Sous *Acacia* à Ngong, la part de la strate herbacée au recyclage des éléments minéraux est plus faible et les proportions mentionnées plus haut sont alors de 20%, 62%, 200%, 11% et 50%. A Mayo Dadi, la production de litière des arbres est plus faible qu'à Ngong et les apports au sol de P et K par la strate herbacée sous *Acacia* sont trois fois plus élevés que par la litière d'arbres ; sous *Cassia* ils sont sensiblement équivalents à ceux de la litière d'arbres.

23. Décomposition des litières et recyclage des éléments minéraux

La décomposition de la litière et les variations concomitantes de bioéléments ont été étudiées sur la base d'une comparaison du stock de litière au sol à un an d'intervalle et de la retombée de litière au cours de la même période. Cette approche se situe au niveau stationnel et global et prend en compte les apports au sol de la strate herbacée. Elle concerne les situations jachère herbacée, *Eucalyptus* à Ngong et *Cassia* à Mayo Dadi. Pour les situations *Acacia* et *Cassia* à Ngong, l'étude s'appuie sur un seul prélèvement de litière au sol en fin de saison des pluies 95.

Afin de mieux décrire les flux de bioéléments dans la litière, dans ce sous chapitre, le terme accumulation désignera une augmentation du stock de bioéléments dans la litière, alors que rétention ou immobilisation désigneront une augmentation de la concentration en bioéléments.

231. Décomposition de la litière d'*Eucalyptus* à Ngong

Le tableau 37 présente les flux de bioéléments au niveau de la litière en terme de pertes réelles. Le tableau 38 présente l'évolution de chaque fraction. En liaison avec l'augmentation du stock de litière au sol, on observe une accumulation de tous les éléments dans la litière. Les vitesses de disparition de la matière organique et de libération des éléments suivent l'ordre

décroissant suivant : K > P > Mg > MO > Ca > N.

On assiste à la rétention de N et Ca dans la litière alors que les pertes des autres éléments sont plus rapides que la perte de poids. Le potassium est de loin, l'élément le plus mobile. L'analyse séparée de l'évolution de chaque fraction de litière présentée sur le tableau 38 met en évidence des comportements sensiblement différents. La fraction "reste" contient les fleurs, les fruits et surtout des débris. En année 1 (1993-1994) on a pu séparer une fraction "débris grossiers" de taille supérieure à 4 mm essentiellement constituée de résidus de feuilles ; cette fraction a été incluse dans la fraction feuilles. En fin d'année 2, cette fraction contenait une part importante d'herbe et d'écorces issues de la fragmentation du matériel végétal en cours de décomposition si bien qu'elle a été maintenue dans la fraction "reste". Par conséquent, la comparaison des fractions ne peut être faite qu'en année 1. En année 2, les coefficients de décomposition des feuilles et de l'herbe sont très surestimés car ils ne prennent pas en compte les débris.

En année 1, on observe que la décomposition des feuilles d'arbres et du bois est moins rapide que celle des graminées plus riches en cellulose et deux à trois fois plus pauvres en lignine selon UGUEN (1996). COUTEAUX et al. (1995) montrent que, dans les climats chauds, la teneur en lignine est un facteur prépondérant de la dynamique de décomposition de la litière. En effet, la première phase de décomposition concerne les parties non lignifiées et la deuxième, les parties lignifiées. D'autre part, la disparition de l'herbe peut être favorisée par l'activité de la macrofaune, car si les termites n'attaquent pas de façon visible la litière de feuilles d'arbre, elles consomment les graminées. Ceci a déjà été constaté au Sénégal par BERNHARD-REVERSAT (1981).

Dans la litière herbacée, l'ordre de libération des éléments est le suivant : K > P > Mg > MO = N > Ca. Ca est retenu dans la litière alors que K, P et Mg sont libérés plus rapidement que la perte de poids.

Dans les feuilles d'arbre, l'ordre de libération des éléments est le suivant : K > Mg > MO = Ca > N > P. On assiste à une rétention de N et P et à une forte libération de K et Mg, le flux de Ca suit sensiblement la perte de poids. Cet ordre correspond à celui donné par TOKY et SINGH (1993) pour *Eucalyptus tereticornis* en zone aride de l'Inde et par MUOGHALU et al. (1993) en forêt secondaire au Nigéria. L'immobilisation de N et de P dans les feuilles sur le sol est aussi mentionnée par VITOUSEK et SANFORD (1986) pour les sols tropicaux peu fertiles, par LISANEWORK et MICHELSEN (1994) pour *Eucalyptus globulus*, par BARGALI et al.

(1993) pour *Eucalyptus sp.* en Inde, par MONTAGNINI et al. (1993) pour *Vochysia sp.* sur la côte atlantique du Costa Rica, par TRIPATHI et SINGH (1994) pour le bambou en zone sèche de l'Inde.

Pour le bois et l'écorce, on constate toujours une forte libération du potassium et une rétention des autres éléments avec dans l'ordre décroissant de mobilité : Mg > P > N > Ca. La richesse en fibres (cellulose + lignine) et la pauvreté en composés "cytoplasmiques" ainsi que les ratios C/N et N/P élevés expliqueraient la plus grande résistance de ces fractions à la décomposition et les augmentations de teneurs en éléments minéraux au cours du processus de décomposition. TOKY et SINGH (1993) mentionnent également une forte immobilisation des éléments minéraux dans le bois. Néanmoins, la consommation du bois par la macrofaune peut accélérer sa disparition. BERNHARD-REVERSAT (1981) mentionne que les fractions de bois placées dans des sacs disparaissent complètement dès qu'elles sont attaquées par les termites.

Au niveau global, l'azote est l'élément le plus immobilisé avec augmentation des concentrations dans toutes les fractions.

Le phosphore est essentiellement mis en circulation par la strate herbacée qui fournit 79% des restitutions au sol et présente un taux de libération très élevé de 81%. Etant donné la très faible teneur en P de la litière d'arbre et la forte rétention de P dans ce compartiment au moment de la décomposition, la strate herbacée joue un rôle important dans le recyclage du phosphore. Cependant, l'accumulation temporaire de P dans la strate herbacée au cours de la saison des pluies peut conduire à une concurrence arbres-graminées défavorable aux arbres.

Le potassium, élément le plus mobile, est libéré rapidement de tous les compartiments.

Concernant le calcium, les feuilles d'arbres fournissent 77% des restitutions au sol et libèrent cet élément au même rythme que la perte de poids. Par contre, on constate une immobilisation forte dans le bois et l'écorce et moindre dans la strate herbacée.

Concernant le magnésium, hormis le bois pour lequel on constate une immobilisation dans la litière au sol, cet élément est libéré des autres fractions de litière plus rapidement que la perte de poids.

Les processus de rétention des éléments dans les fractions de litière au sol, entraînant une augmentation des concentrations, peuvent être dus à la perte de MO sous forme de CO_2 et au transfert microbien d'éléments libérés par d'autres fractions vers les fractions en question. Ce dernier phénomène évoqué par LODGE et al. (1994) peut alors conduire à des taux négatifs de libération des éléments (cas de P dans les feuilles et de Ca dans le bois).

Tableau 39 : % de disparition de la MO et des bioéléments dans la litière de feuilles d'*Eucalyptus* et de *Cassia* au cours d'une année selon la méthode d'étude utilisée (évolution du stock réel au sol ou décomposition en sacs).

Situation	méthode d'étude de la décomposition	MO	N	P	K	Ca	Mg
Eucalyptus à Ngong	sacs à mailles fines (1mm x1mm)	46	22	18	85	29	59
	sacs à mailles larges (7 mm x 7 mm)	50	27	24	86	34	62
	comparaison de l'apport et des stocks au sol (93-94)	35	9	-1	64	33	48
Cassia à Mayo Dadi	sacs à mailles fines (1mm x1mm)	49	9	28	83	19	59
	comparaison de l'apport et des stocks au sol (93-94)	72	64	67	77	66	79
	comparaison de l'apport et des stocks au sol (94-95)	63	45	49	70	53	72

Tableau 40 : Flux de MO et de bioéléments dans les différentes fractions de litière de *Cassia* et % de disparition entre octobre 1993 et octobre 1995.

		Année 1					Année 2				
		Feuilles	Herbe	Bois + écorce	Reste	Total	Feuilles	Herbe	Bois + écorce	Reste	Total
MO	A (kg/ha)	1800	1270	8	130	3210	2270	1010	150	190	3630
	% Total apports	56,0	39,6	0,2	4,1	100,0	62,5	28,0	4,2	5,3	100,0
	Xd (kg/ha)	2090	1170	5	80	3340	1940	1150	8	240	3340
	kr (%)	72	61	13		65	63	65	4		62
N	A (kg/ha)	16,2	5,7	0,1	2,7	24,7	20,7	4,7	3,0	3,8	32,1
	% Total apports	65,6	23,1	0,3	11,0	100	64,3	14,6	9,2	11,9	100
	Xd (kg/ha)	19,3	3,0	0,0	1,6	24,0	14,1	6,1	2,0	4,6	26,8
	kr (%)	64	33	10		54	45	57	63		51
P	A (kg/ha)	1,1	3,0	0,00	0,3	4,5	1,6	2,3	0,1	0,4	4,4
	% Total apports	25,4	67,7	0,09	6,8	100	35,7	53,6	1,8	9,0	100
	Xd (kg/ha)	1,3	2,9	0,00	0,3	4,4	1,1	2,4	0,0	0,4	3,9
	kr (%)	67	86	-14		78	49	85	27		69
K	A (kg/ha)	5,9	20,0	0,03	1,9	27,9	8,7	16,6	0,4	2,6	28,3
	% Total apports	21,3	71,7	0,09	6,9	100	30,7	58,8	1,4	9,1	100
	Xd (kg/ha)	7,0	19,7	0,03	2,7	29,4	7,5	17,0	0,1	3,2	27,9
	kr (%)	77	91	28		85	70	92	22		83
Ca	A (kg/ha)	67,6	7,4	0,1	1,3	76,4	86,3	6,0	3,3	1,9	97,4
	% Total apports	88,5	9,7	0,1	1,7	100	88,6	6,2	3,3	1,9	100
	Xd (kg/ha)	75,1	3,1	0,5	-1,8	76,8	65,9	8,8	1,2	3,3	79,2
	kr (%)	66	26	52		58	53	60	32		52
Mg	A (kg/ha)	5,1	3,1	0,01	0,2	8,4	5,8	2,9	0,2	0,3	9,2
	% Total apports	60,1	36,8	0,2	2,9	100	62,3	31,7	2,3	3,8	100
	Xd (kg/ha)	5,8	3,0	0,1	0,2	9,1	5,3	3,1	0,1	0,4	8,8
	kr (%)	79	80	62		77	72	84	38		74

Si on considère que la présence d'herbe dans les débris grossiers de litière au sol en année 1 a pour conséquence de sous-estimer légèrement la vitesse de disparition réelle des feuilles et de surestimer celle des herbes, les coefficients de décomposition des feuilles sont comparables aux pertes de MO observées lors de la décomposition des feuilles en sacs (tableau 39). On observe cependant une plus forte immobilisation du Ca et une plus forte libération du K dans les sacs en première année de décomposition qu'en milieu réel. Cela s'explique par la nature du substrat. En effet, la décomposition en sacs concerne des litières fraîches alors qu'en milieu réel le stock de litière comprend tous les stades de décomposition. Le carbone est libéré plus rapidement dans les litières fraîches. Le potassium, constituant des vacuoles des cellules est libéré rapidement par voie soluble dans la première phase de décomposition alors que le calcium inclus dans les composants résistants des végétaux est libéré de façon plus importante en deuxième phase de décomposition. Enfin l'azote et le phosphore, constituants spécifiques des protéines, sont soit recyclés dans la biomasse microbienne ou dans des composés néoformés de la litière en voie de décomposition soit minéralisés (RAPP et LEONARDI, 1988).

En année 2, les coefficients de minéralisation relatifs aux feuilles sont surestimés car ils ne prennent pas en compte les débris de feuilles (tableau 38). L'accumulation importante de litière au sol en année 2 en particulier de débris végétaux va de pair avec une diminution des taux de disparition des bioéléments de la litière totale. On observe d'ailleurs une forte accumulation de tous les éléments et une forte rétention de N et Ca.

232. Décomposition de la litière de *Cassia* à Mayo Dadi

Sous *Cassia*, contrairement à ce que l'on observe sous *Eucalyptus*, on assiste à une certaine stabilité du stock de litière au sol entre 93 et 95 et à une constance dans les apports (tableau 40). Cela correspond à des pertes réelles de la litière sensiblement constantes d'une année à l'autre. Les vitesses de disparition de la matière organique totale et de libération des éléments suivent le même ordre décroissant que l'*Eucalyptus* : K > P > Mg > MO > Ca > N. Dans les feuilles de *Cassia*, l'ordre de libération des éléments est le suivant : K > Mg > MO > Ca > P > N. Lors de la décomposition des feuilles en sacs (tableau 39), on observe, comme chez l'*Eucalyptus*, une plus forte libération de K et une plus forte rétention de Ca qu'en conditions réelles. Cependant, les feuilles disparaissent beaucoup plus lentement et les processus d'immobilisation des éléments en particulier de N et P sont plus marqués qu'en conditions réelles. Les sacs utilisés, à maille fine de 1 mm^2, excluent la macrofaune et pour des raisons pratiques, il n'a pas été possible

de tester la maille de 7 mm^2. Par conséquent, contrairement à l'*Eucalyptus*, la macrofaune pourrait jouer un rôle important dans le processus de disparition des feuilles mais il n'a pas été possible de le vérifier.

233. Décomposition de la litière des jachères herbacées

Le tableau 41 donnent les taux de disparition de la MO et des bioéléments des litières des jachères herbacées protégées. A Ngong, les coefficients de disparition sont faibles en raison du foisonnement important d'*Andropogon gayanus* au dessus du sol. La vitesse de libération des

Tableau 41 : % de disparition de la MO et des bioéléments dans la litière des jachères herbacées protégées entre octobre 93 et octobre 95.

Lieu	Situation	Période concernée	MO	N	P	K	Ca	Mg
Ngong	jachère herbacée protégée	octobre 93- octobre 94	29	28	68	83	50	65
		octobre 94- octobre 95	22	6	58	75	14	47
Mayo Dadi	jachère herbacée protégée	octobre 93- octobre 94	27	4	58	69	50	68
		octobre 94- octobre 95	68	50	77	83	48	69

éléments correspond à l'ordre décroissant suivant : K > P > Mg > MO > Ca > N. On assiste à une forte libération de P et à une immobilisation de N et Ca. Cet ordre est conforme à celui observé dans la litière d'herbe sous les arbres, où cependant la décomposition se montre en général plus rapide, peut-être en raison d'un microclimat plus favorable.

234. Bilan et discussion sur la décomposition des litières et la libération des éléments minéraux

Afin de comparer tous les types de jachère, un coefficient théorique de décomposition des litières (k) a été calculé à partir du stock de litière au sol en septembre-octobre 95 (L) et de l'apport annuel de litière en année 2 (A). Les coefficients k (A/A+L) figurent en annexe 9. Ils correspondent à la réalité à condition d'une certaine stabilité du stock de litière au sol. Ainsi le coefficient k correspond au coefficient kr pour le *Cassia* à Mayo Dadi et surestime la vitesse réelle de décomposition dans le cas de l'*Eucalyptus* et de la jachère protégée à Ngong pour lesquels on observe une forte accumulation de litière au sol. Par conséquent, les coefficients kr du *Cassia* à Mayo Dadi, de l'*Eucalyptus* et des jachères herbacées sont mis en comparaison avec les

Tableau 42 : Coefficients de décomposition théorique (k) de la litière, coefficients de décomposition réelle (kr), pertes annuelles réelles moyennes d'octobre 93 à octobre 95 (Xd) et apports annuels moyens de litière au sol de 1993 à 1995.

Variable	Lieu	Situation		MO	N	P	K	Ca	Mg
k = A/(A+L) *	Ngong	*Acacia*	k	0,61	0,54	0,63	0,86	0,50	0,57
		Cassia	k	0,54	0,46	0,53	0,78	0,47	0,59
kr moyen	Ngong	*Eucalyptus*	kr	0,26	0,06	0,47	0,70	0,14	0,35
		jachère herbacée protégée	kr	0,25	0,17	0,63	0,79	0,32	0,56
	Mayo Dadi	*Cassia*	kr	0,63	0,52	0,73	0,84	0,56	0,76
		jachère herbacée protégée	kr	0,47	0,28	0,68	0,76	0,49	0,68
Xd (kg/ha/an)	Ngong	*Eucalyptus*	Xd	3280	6,0	4,8	64,0	39,0	8,0
		jachère herbacée protégée	Xd	2182	10,0	4,7	45,1	17,7	9,1
	Mayo Dadi	*Cassia*	Xd	3340	25,4	4,2	28,6	78,0	9,0
		jachère herbacée protégée	Xd	3223	10,7	5,4	49,5	26,8	9,9
Apport moyen de litière totale de 1993 à 1995 (kg/ha/an)	Ngong	*Acacia*		6000	113	6,6	78	75	17
		Cassia		4320	45	3,1	41	83	8
		Eucalyptus		6770	39	6,7	73	129	14
		jachère herbacée protégée		5050	18	5,6	52	26	11
	Mayo Dadi	*Cassia*		3260	26	4,0	26	81	9
		jachère herbacée protégée		3600	15	5,7	60	40	11

A : apport annuel de litière en 94 - 95
L : litière au sol en 1995

coefficients k du *Cassia* et de l'*Acacia* à Ngong (tableau 42), ce dernier étant le plus incertain. Néanmoins, ce changement de coefficients ne change pas la hiérarchie des traitements. Les plus forts coefficients de décomposition se rencontrent sous *Acacia* et *Cassia* et les plus faibles sous *Eucalyptus* et jachère herbacée protégée à *A. gayanus* où l'accumulation de litière au sol est importante.

Les apports d'azote au sol par la litière d'*Acacia* représentent 3 fois ceux sous *Cassia* et *Eucalyptus* et 6 fois ceux sous jachère herbacée (tableau 42). Le rythme de libération étant sensiblement équivalent sous *Acacia* et *Cassia*, le recyclage est proportionnel aux différents apports. Par contre sous *Eucalyptus* la faible vitesse de libération de N indique une forte accumulation de N dans la litière au sol, de même que dans la jachère herbacée.

Concernant le phosphore, la litière d'arbre joue un rôle important dans son recyclage chez l'*Acacia* puisqu'elle représente 60% des apports au sol alors que sous *Eucalyptus* à Ngong et *Cassia* à Mayo Dadi, la strate herbacée est la principale voie de circulation et représente respectivement 80% et 70% des apports. Les vitesses de disparition étant peu différentes, les quantités de P libérées par la litière sont proportionnelles aux quantités apportées. En fait, elles sont les plus faibles sous *Cassia* en raison d'un mauvais développement de la strate herbacée et

Tableau 43 : Caractéristiques biochimiques des litières fraîches de feuilles des espèces ligneuses de Ngong (Source : BERNHARD-REVERSAT, 1996b).

Espèce	N %	C/N	Lignine ADL %	C soluble %	Polyphénols totaux %	Tannins précipitants %	Polyphénols solubles %	Pps/N *
Herbe (Sénégal)	0,56	89,1	10,9	2	0,89	0,02	0,8	1,43
Acacia	2,2	22,7	35,5	4,5	6,81	1,25	1,6	0,72
Cassia	1,18	41,5	12,5	6,8	1,97	0,02	2,1	1,78
Eucalyptus	0,70	74,6	12,5	8,6	9,45	2,42	6,2	8,8

* Pps : Polyphénols solubles

Tableau 44 : Caractéristiques biologiques des litières fraîches de feuilles des espèces ligneuses de Ngong (Source : BERNHARD-REVERSAT, 1996b).

Espèce	C s		Pp s		C s / C - CO_2			Pp s / C -$C0_2$			Percolats
	mg/g	%	mg/g	%	r	P	a	r	P	a	pH
Herbe (Sénégal)					0,98	0,0006	1,24	0,896	0,006	5,43	7,2
Acacia	7,6	17	1,6	10	0,89	0,02	1,98	0,999	0,0001	5,53	7,5
Cassia	33,3	49	5,9	28	0,89	0,008	0,18	0,98	0,0001	2,04	6,4
Eucalyptus	25	29	11,2	18	0,78	0,04	0,58	0,75	0,05	0,78	5,4

C s : Carbone soluble percolé après 21 jours d'incubation sur sable humide en mg/g de litière et en % du C s de la litière;
Pp s : Polyphénols solubles percolés après 21 jours d'incubation sur sable humide en mg/g de litière et en % du C s de la litière;
C s / C-CO_2 : relations entre le C minéralisable et le C soluble percolé, r : coefficient de corrélation, P : seuil de signification, a : pente de la corrélation ;
Pp s / C-CO_2 : relations entre les polyphénols solubles et le C minéralisable ;
Percolats , pH : pH moyens des percolats au cours des 21 jours d'incubation ;

diffèrent peu entre les autres traitements.

Les vitesses de libération du potassium étant peu différentes, le recyclage est proportionnel aux apports par la litière et se montre le plus faible dans les peuplements de *Cassia*.

Le Ca apporté par la litière en quantité plus importante sous les arbres que dans les jachères herbacées y est également libéré plus abondamment. On constate toutefois sous *Eucalyptus* une très faible vitesse de libération ayant pour conséquence une forte accumulation de Ca dans la litière au sol.

Enfin, la perte de Mg est la plus forte dans la litière d'*Acacia* en raison du plus fort apport

par la litière et d'un fort coefficient de disparition.

Les résultats des caractérisations biochimique et biologique des litières de feuilles fraîches provenant de nos sites ont été effectuées par BERNHARD-REVERSAT (1996b) (tableaux 43 et 44). Les incubations des litières indiquent une faible libération de C soluble par la litière d'*Acacia* et une forte libération chez *Eucalyptus* et *Cassia* (tableau 44). L'auteur considérant que c'est principalement le C soluble qui est minéralisé lors d'incubations in vitro, utilise la pente de la corrélation entre le C percolé et le C minéralisé comme indicateur de l'aptitude à la dégradation des substances solubles. On peut en déduire que les hydrosolubles les plus facilement dégradables sont ceux d'*Acacia* et des herbes et les moins dégradables ceux de *Cassia* et *Eucalyptus*. Il en est de même des polyphénols solubles. En fait, il apparaît que les litières ayant les composés solubles les moins dégradables sont celles qui en contiennent le plus. Le pH des percolats distingue l'*Eucalyptus* avec des pH acides (5,4), les herbes et l'*Acacia* avec des pH supérieurs à 7 et le *Cassia* aux pH intermédiaires (6,3). Selon SWIFT et al. (1979) et différents auteurs rapportés par UGUEN (1996), les polyphénols solubles exerceraient un blocage de minéralisation de l'azote dans les litières. Le dernier auteur observe une influence négative significative des polyphénols sur la minéralisation de l'azote dans les litières et dans le sol. Il constate également que les débris, plus riches en azote conformément au tableau 28 et plus pauvres en C et polyphénols solubles, montrent une minéralisation d'azote plus importante que les litières fraîches. Cela signifie que l'action des polyphénols serait précoce et temporaire, ceux-ci diffusant rapidement hors des litières (UGUEN, 1996).

Pour conclure, la disparition rapide de la litière et de son azote sous *Acacia* est en accord avec CONSTANTINIDES et FOWNES (1994) selon lesquels la disparition de la litière d'arbres est principalement liée à sa teneur initiale en azote. D'autre part, la faible teneur en polyphénols solubles de l'*Acacia* se traduit par une aptitude élevée à la dégradation du carbone soluble (BERNHARD-REVERSAT, 1996b). Néanmoins la dégradation de la litière d'*Acacia* par voie soluble serait accessoire et son incorporation à la MO du sol se ferait par minéralisation de la MO sous forme de CO_2, fragmentation et humification du reste (BERNHARD-REVERSAT, 1987a, 1988 ; HARMAND, cette étude). Cette espèce se montre apte à un recyclage rapide et important des éléments minéraux, pouvant favoriser ainsi la régénération du sol.

A l'inverse, comme cela a pu être observé lors de l'étude des fractions organiques du sol (paragraphe 23 du chapitre III), la litière d'*Eucalyptus* ne s'incorpore pas au sol sous forme de débris végétaux, au moins au cours des 7 premières années. BERNHARD-REVERSAT (1987a,

1993) a montré que cette litière présentait de nombreux caractères de décomposition lente et d'incorporation au sol, pour une part, sous forme de composés hydrosolubles peu dégradables. Le taux de minéralisation du C est moyen dans la litière fraîche et se maintient dans la litière ancienne, pouvant limiter ainsi les processus d'humification. La teneur en azote de la litière est faible et sa teneur en C et en polyphénols solubles est élevée. La forte acidité des percolats peut contribuer à désaturer le complexe absorbant du sol.

La litière de *Cassia* présente des caractères de décomposition intermédiaires des deux espèces précédentes. Elle est pauvre en N, mais sa faible teneur en polyphénols solubles irait de pair avec une disparition rapide. La disparition de la litière sous forme de composés hydrosolubles peu dégradables est aussi importante que chez l'*Eucalyptus*, au moins dans un premier temps (tableau 44). Alors qu'on observe sur le terrain à Ngong, dans des sacs à mailles fines excluant la macrofaune, une vitesse de disparition de la litière comparable à celle de l'*Eucalyptus*, à Mayo Dadi le rythme de décomposition de la litière de feuilles de *Cassia* en conditions réelles, est beaucoup plus élevé, comparable à celui de l'*Acacia*. Selon SWIFT et al. (1979), la fragmentation des feuilles par la macrofaune permettrait un accroissement de la colonisation par des microorganismes et pourrait accélérer considérablement la vitesse de disparition de cette litière. D'ailleurs, les fractionnements de MO du sol (chapitre III) montrent une incorporation sous forme de débris végétaux, beaucoup plus importante que dans le cas de l'*Eucalyptus*, au moins équivalente à celle de la jachère herbacée.

Concernant la strate herbacée, on observe en général un recyclage plus rapide des éléments P, K et Mg par sa litière que par les litières d'arbres. Le rythme de décomposition des litières d'herbe semble plus rapide sous les arbres qu'hors couvert, vraisemblablement en raison de conditions microclimatiques plus favorables liées à l'ombrage. YOUNG (1989) rapporte que le recyclage des éléments minéraux par la strate herbacée d'une savane à *Burkea africana* est plus rapide que dans la litière de la strate ligneuse. Cependant, dans notre étude, les litières herbacées ont des faibles teneurs en N et présentent en général, au cours de leur décomposition, des taux de rétention de N et Ca plus élevés que ceux des litières d'arbres. Ces derniers résultats sont en accord avec ceux obtenus par UGUEN (1996) pour la minéralisation de l'azote de nos litières mises en incubation. ISICHEI et MUOGHALU (1992) constatent également qu'en savane au Nigéria, les résidus herbacés de la litière immobilisent fortement l'azote.

24. Les transferts d'éléments par l'eau

Seule l'année 1994 ayant fait l'objet d'un suivi analytique complet des eaux, sera étudiée en détail dans ce chapitre.

241. Les composantes du bilan hydrique

Les résultats sur les composantes du bilan hydrique présentés et commentés en annexe 2 sont résumés ci-dessous.

La mise en jachère entraîne, dès la deuxième année, une forte limitation du ruissellement qui demeure inférieur à 1% de la pluie incidente (Pi) pour les 3 années d'observation. Ce phénomène serait dû à la couverture totale du terrain par la litière et à l'aération du sol par l'activité faunistique et par la décomposition des débris végétaux incorporés au sol. Dans ces conditions, l'érosion hydrique, est également pratiquement arrêtée.

La plantation d'arbres dans la jachère provoque une réduction de l'apport d'eau au sol par interception de la pluie incidente. Il existe une corrélation positive entre l'interception et la biomasse des feuilles, alors que l'écoulement le long des troncs est surtout lié à l'architecture de l'arbre. Pour les espèces *Acacia* et *Eucalyptus* à Ngong et *Cassia* à Mayo Dadi, les taux moyens respectifs d'interception (% Pi) pour les 3 années d'observation sont de 10,5%, 7,7% et 5,1% et les taux moyens respectifs d'écoulement (% Pi) sont de 4%, 4,6% et 3%.

L'étude conduite par MILLET (1994) prouve que l'introduction d'arbres à croissance rapide dans la jachère modifie les facteurs hydriques en particulier le stock d'eau du sol dans le sens d'un plus fort assèchement. Cette modification est induite par l'augmentation de l'ETR liée à la plus forte production de biomasse primaire des jachères arborées. Ce dernier aspect sera débattu au chapitre V. De façon générale, la reconstitution plus lente de la réserve hydrique du sol dans les jachères arborées par rapport aux situations culture continue et jachère herbacée a pour conséquence de réduire le drainage profond et donc les éventuelles pertes d'éléments minéraux par lixiviation. A l'échelle annuelle, l'*Eucalyptus*, prolongeant son activité végétative en saison sèche, se montre supérieur à l'*Acacia* dans sa capacité à transpirer et à épuiser les réserves hydriques du sol (EYOG MATIG et DREYER, 1991 ; EYOG MATIG, 1993). Cependant, en début de saison des pluies, la recharge de la réserve hydrique sous *Acacia* est plus faible que sous *Eucalyptus*, car l'*Acacia*, espèce décidue, présente à ce moment là une plus forte

Tableau 45 : Concentrations moyennes annuelles (mg/l) des éléments minéraux dans les eaux, valeurs pondérées pour l'année 1994.

Situation et niveau	Ca	Mg	K	P	N_NH4	N_NO3	N organique
Pluie externe à Ngong	0,50	0,10	0,78	0,017	0,18	0,21	0,64 (0,26 - 1,5)*
Pluie externe à Mayo Dadi	0,32	0,05	0,72	0,047	0,49	0,19	0,54 (0,28 - 1,3)*
Acacia à Ngong							
Egouttement	1,12	0,37	2,62	0,032	0,14	0,09	2,32
Ecoulement	2,03	0,83	7,95	0,147	0,36	0,07	4,77
Pluviolessivat total	1,16	0,39	2,85	0,037	0,15	0,09	2,43
Ruissellement	2,08	0,80	9,98	0,503	0,49	0,15	-
Drainage à 60 cm	12,17	4,17	4,36	0,071	0,13	7,36	-
Eucalyptus à Ngong							
Egouttement	0,57	0,17	1,28	0,036	0,31	0,17	1,43
Ecoulement	0,87	0,31	6,49	0,294	0,70	0,07	0,82
Pluviolessivat total	0,59	0,17	1,54	0,049	0,33	0,17	1,40
Ruissellement	3,01	1,13	7,17	0,898	2,07	0,09	-
Drainage à 60 cm	4,64	1,56	5,07	0,142	0,35	0,35	-
Jachère herb. à Ngong							
Ruissellement	3,51	1,51	21,10	5,721	1,96	1,92	-
Drainage à 60 cm	4,62	1,36	2,52	0,059	0,13	0,89	-
Culture à Ngong							
Ruissellement	0,80	0,26	1,92	0,100	0,06	0,06	-
Drainage à 60 cm	14,60	3,60	11,60	0,497	2,00	10,10	-
Cassia à Mayo Dadi							
Egouttement	0,64	0,10	1,16	0,063	0,52	0,16	0,60
Ecoulement	1,05	0,23	8,69	0,315	0,39	0,13	0,82
Pluviolessivat total	0,65	0,10	1,40	0,071	0,51	0,16	0,61
Ruissellement	2,92	0,99	7,79	3,413	3,12	0,60	-
Drainage à 1m	2,28	1,59	16,84	2,470	1,09	0,24	-

* (min - max) : valeurs moyennes minimale et maximale possibles de la concentration en N organique.

Tableau 46 : Concentrations moyennes annuelles (mg/l) des eaux de drainage, valeurs pondérées pour l'année 1993.

Situation	Ca	Mg	K	Na	Al	N-NH_4	N-NO_3	S-SO_4	P	Cl
Ngong										
Acacia	2,59	0,95	1,64	2,33	1,34	0,12	1,11	0,85	0,07	2,47
Eucalyptus	1,87	0,93	2,92	2,43	10,10	0,32	0,57	1,54	0,18	3,10
Jachère herb.	3,29	1,47	6,30	8,50	3,08	6,20	0,83	2,19	0,81	1,73
Mayo Dadi										
Cassia	1,20	0,42	3,01	2,06	4,40	4,28	0,85	0,84	1,59	15,18
Jachère herb.	4,36	1,17	6,79	7,13	5,12	3,30	2,78	1,17	0,45	9,45
Culture	3,64	1,21	5,07	5,57	6,05	1,77	4,55	1,00	0,49	5,36

Tableau 47 : Flux annuels d'éléments minéraux dans les eaux en 1994 (kg/ha/an).

Situation et niveau	Ca	K	Mg	P	N_NH4	N_NO3	N organique
Pluie externe à Ngong	5,53	8,62	1,07	0,13	1,57	2,03	(6,45)
Pluie externe à Mayo Dadi	3,49	7,79	0,49	0,50	5,26	2,04	(5,83)
Acacia à Ngong							
Pluviolessivats totaux	5,71	18,77	2,68	0,19	-0,09	-1,12	(16,47)
Egouttement (% Pt)*	93,7%	87,6%	90,4%	82,5%			91,2%
Ecoulement (% Pt)	6,3 %	12,4%	9,6%	17,5%			8,8%
Ruissellement	0,040	0,192	0,015	0,010	0,009	0,003	0,029
Eucalyptus à Ngong							
Pluviolessivats totaux	0,43	7,06	0,69	0,33	1,63	-0,33	(6,45)
Egouttement (% Pt)	92,7%	79,2%	91,3%	70,1%	89,5%		97,1%
Ecoulement (% Pt)	7,3%	20,8%	8,7%	29,9%	10,5%		2,9%
Ruissellement	0,132	0,314	0,050	0,039	0,091	0,004	0,105
Cassia à Mayo Dadi							
Pluviolessivats totaux	3,38	6,98	0,58	0,25	0,15	-0,34	(0,54)
Egouttement (% Pt)	94,9%	83,3%	92,9%	86%	97,6%		95,7%
Ecoulement (% Pt)	5,1%	19,7%	7,1%	14%	2,4%		4,3%
Ruissellement	0,046	0,122	0,016	0,053	0,048	0,009	0,061
Jachère herb. à Ngong							
Ruissellement	0,045	0,270	0,019	0,073	0,025	0,024	0,033
Culture à Ngong							
Ruissellement	0,975	2,356	0,312	0,123	0,078	0,079	0,735

* ( ) : valeurs peu précises ; Pt : pluviolessivats totaux : égouttement + écoulement - pluie incidente.

activité photosynthétique et respiratoire lui permettant d'exploiter rapidement l'eau des premières pluies.

Enfin, sans calcul de l'ETR dans les différentes situations, le drainage n'a pas pu être quantifié précisément.

242. Les apports atmosphériques

a) Les concentrations en éléments minéraux de la pluie incidente

Les eaux de la pluie incidente sont faiblement acides (PH = 5,5 à Mayo Dadi en 1994). Tous les ions Ca, K, Mg, N-NO_3 et N-NH_4 sont significativement corrélés entre eux. Les apports

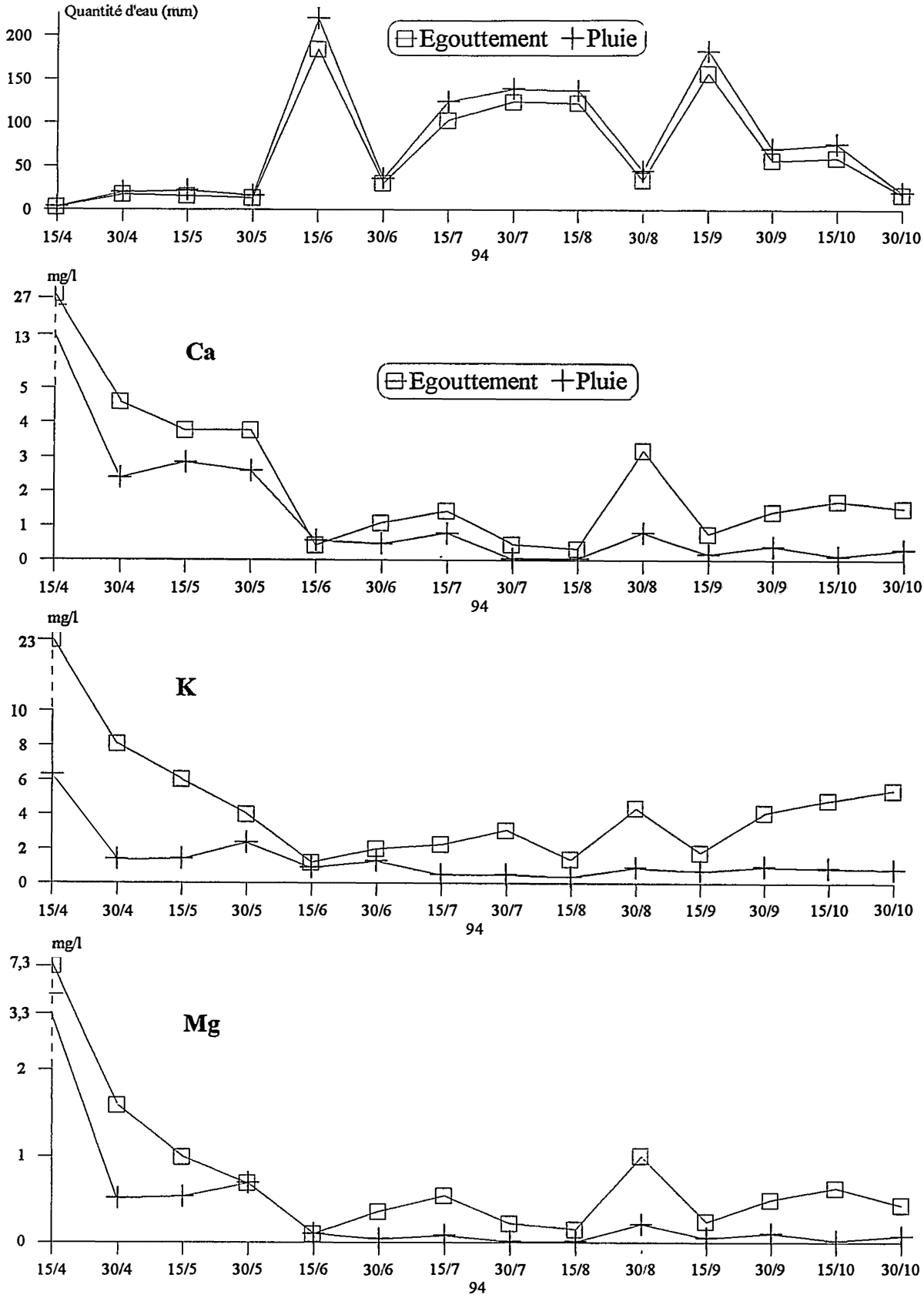


Figure 44 : Evolution des concentrations en éléments dans la pluie incidente et les eaux d'égouttement sous *Acacia*, à Ngong en 1994.

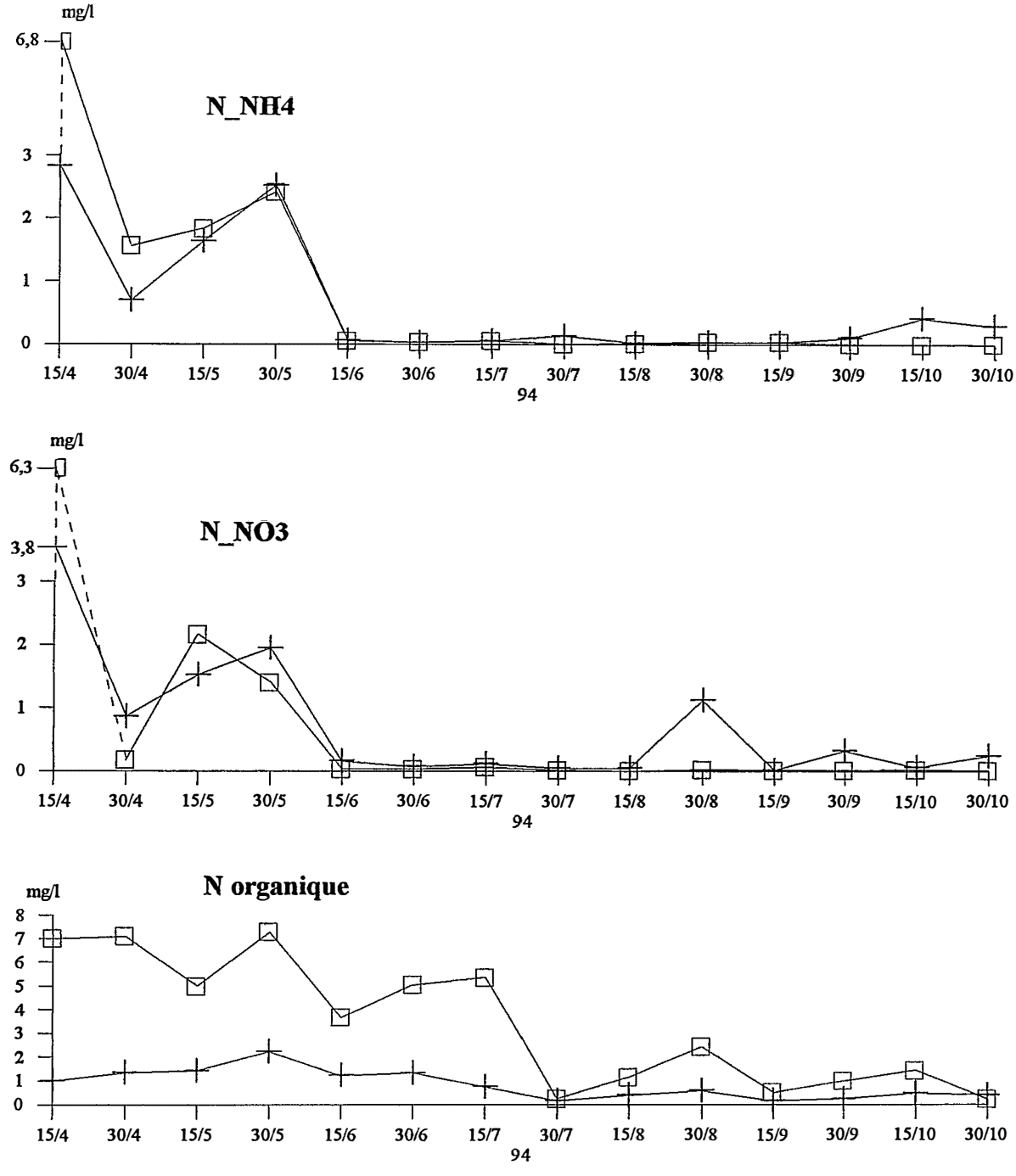


Figure 44 (suite) : Evolution des concentrations en éléments dans la pluie incidente et les eaux d'égouttement sous *Acacia*, à Ngong en 1994.

Tableau 48 : Apports par la pluie et le pluviolessivage dans différents sites d'Afrique tropicale (kg/ha/an).

Référence	Situation	Période	Précipitation (mm)	Ca	K	Mg	P	$N\text{-}NH_4$	$N\text{-}NO_3$	N organique	N total
Apports par la pluie											
[1] ROOSE dans [3]	Abidjan (Côte d'Ivoire)	1970-1972	2100					3,8	4,6	19,7	28,1
[2] OKEKE et OMALIKO (1991)	Ozala (Nigéria)	1985-1986	1600	11	2,1	5,5	-	-	-	-	29,9
[3] VILLECOURT et ROOSE (1978)	Lamto (Côte d'Ivoire)	1975	1084	26,5	3,4	4,8	-	2,8	1,6	13,8	18,2
[4] BERNHARD-REVERSAT (1987b)	Keur Maktar (Sénégal)	1981-1983	510	9	3	2	0,3	2 (N minéral)		-	-
[5] BERNHARD-REVERSAT (1977)	Yapo (Côte d'Ivoire)		2000	16	5,5	7	0,5				21
[6] MODI et al. (1995)	Niamey (Niger)	1989	535	9,6	3,5	4,8	-	1,8	3,1	-	-
[7] HARMAND (cette étude)	Ngong (Cameroun)	1994	1110	5,5	8,6	1,1	0,1	1,6	2	6,5	10,1
	Mayo Dadi (")	1994	1078	3,5	7,8	0,5	0,5	5,2	2	5,8	13
Pluviolessivage											
BERNHARD -REVERSAT (1977)	Yapo (Côte d'Ivoire)		1800	19	82	16	5,5				13
	Banco (")		2000	23	60	34	1,5				60
OKEKE et OMALIKO (1991)	Ozala : *Acioa barteri*	1985-1986	1600	1,9	2,4	-0,4	-	-		-	13,6
VILLECOURT et ROOSE (1978)	Lamto : savane boisée	1975	1084	1,3	26	5,1	-	-0,3 (N minéral)			
BERNHARD-REVERSAT (1987b)	*Acacia seyal*	1981-1983	510	12	12	4	0,2	3 (N minéral)		-	-
	Eucalyptus camaldulensis	"	"	9	4	1	0,1	2 (N minéral)			
HARMAND (cette étude)	*Acacia polyacantha*	1994	1110	5,7	18,8	2,7	0,2	-0,1	-1,1	16,5	15,3
	Eucalyptus camaldulensis	1994	1110	0,4	7,1	0,7	0,3	1,6	-0,3	6,4	7,7
	Cassia siamea	1994	1078	3,4	7	0,6	0,2	0,15	-0,34	0,5	0,36

de P sont faibles (tableau 45) et dans notre cas, leur détermination par analyse chimique est très imprécise. K est l'ion le plus abondant avec des concentrations voisines pour les deux stations pouvant indiquer l'origine marine de cet ion. En rapport avec leur origine terrigène commune (MODI et al., 1995), Ca et Mg sont les éléments les plus fortement corrélés (r = 0,998 à Ngong et r = 0,93 à Mayo Dadi). Ils sont plus abondants à Ngong qu'à Mayo Dadi. L'azote organique provient également des poussières telluriques en suspension stable dans l'atmosphère et de la microflore qui l'accompagne (VILLECOURT et ROOSE, 1978). L'origine de l'azote minéral est encore mal connue (MODI et al., 1995). Les ions $N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3$ sont contenus dans des particules et des gaz pouvant provenir de différentes sources. L'origine anthropique agro-pastorale et surtout les feux de brousse présentés souvent comme la source principale (VILLECOURT et ROOSE, 1978) constituent de faibles apports au sahel nigérien (MODI et al., 1995). Les apports par les aérosols terrigènes en saison des pluies et les émissions biogéniques des sols (volatilisation de NH_3) sont également faibles au Niger. VILLECOURT et ROOSE (1978) évoquent également divers processus électriques chimiques et photochimiques de transformation de N libre atmosphérique.

La forte différence de teneur en $N\text{-}NH_4$ entre les pluies de Ngong et Mayo Dadi est difficile à expliquer. Cette différence existe également en 1993 avec 0,09 ppm à Ngong et 0,45 ppm à Mayo Dadi pour la période du 15/07 au 30/10/93. Elle peut être due à la plus forte densité de pâturage existant au voisinage de l'essai de Mayo Dadi. Il faut souligner qu'en l'absence d'un pluviomètre à ouverture automatique au moment des pluies, les eaux comprennent les dépôts secs et occultes (brouillard, rosée) se produisant entre deux pluies et peuvent contenir également des débris et insectes à l'origine de diverses pollutions. Néanmoins les chiffres que nous avons coïncident avec les valeurs de $N\text{-}NH_4$ comprises entre 0,26 et 0,53 ppm de la revue bibliographique effectuée par VILLECOURT et ROOSE (1978).

Les variations saisonnières des concentrations à Ngong sont mentionnées sur la figure 44. Celles de Mayo Dadi sont tout à fait comparables et figurent en annexe 5. Elles indiquent globalement de fortes valeurs en début de saison des pluies liées à la forte charge de l'atmosphère. A partir du 30 mai (après 60 mm de pluie à Ngong et 72 mm à Mayo Dadi) on constate de faibles teneurs en particulier d'azote minéral indiquant que l'atmosphère est vite lavé de sa charge alimentée en saison sèche (VILLECOURT, 1975) et en début de saison des pluies par les tornades soulevant de la poussière (VILLECOURT et ROOSE, 1978). La teneur en éléments minéraux semble inversement liée à l'importance des précipitations, également en raison de la dilution des charges atmosphériques. Néanmoins il est difficile de vérifier ce phénomène déjà observé par

VILLECOURT (1975) car nos analyses portent sur des cumuls pluviométriques de 15 jours et non pas sur des événements journaliers.

b) Les apports annuels d'éléments minéraux par la pluie incidente

Les apports annuels d'éléments par la pluie incidente sont mentionnés sur le tableau 47. Ils sont en général plus faibles en Ca et Mg que dans les sites d'Afrique tropicale mentionnés sur le tableau 48. Par contre, ils correspondent au double des apports en K des situations précédentes en raison d'une concentration équivalente à celle du sahel. Les apports de P sont faibles, voisins de ceux donnés par BERNHARD-REVERSAT (1987b). Les apports de nitrates (2 kg/ha/an) sont comparables à ceux donnés par VILLECOURT et ROOSE (1978) dans leur revue bibliographique pour la zone d'Afrique tropicale. L'apport d'azote ammoniacal semble faible et peut-être un peu sous-estimé à Ngong et élevé à Mayo Dadi. La détermination au laboratoire de l'azote organique étant très peu précise, la quantité de 6 kg/ha/an n'est qu'indicative. A Lamto, VILLECOURT et ROOSE (1978) trouvent un apport de 14 kg/ha/an.

243. Le pluviolessivage

a) Les concentrations des pluviolessivats (égouttement + écoulement)

Les solutions collectées sous les peuplements sont en général plus concentrées que les eaux de pluie incidente (tableau 45). C'est le cas de Ca, K, Mg, P et de l'azote organique. Par contre, il y a appauvrissement des pluviolessivats en $N\text{-}NO_3$ chez toutes les espèces et en $N\text{-}NH_4$ chez l'*Acacia*. Cette situation est le résultat global de processus complexes tels que : (1) la concentration sur la végétation des éléments de la pluie incidente par évaporation de l'eau interceptée, (2) le lessivage des dépôts secs et occultes, (3) la récrétion et enfin (4) l'absorption. La récrétion est un phénomène physico-chimique de libération d'éléments par la végétation ou la microflore associée.

Les facteurs d'enrichissement des pluviolessivats en éléments minéraux donnés par le rapport de la concentration des pluviolessivats à la concentration de la pluie incidente figurent sur le tableau 49. On observe sous *Acacia* les plus forts coefficients d'enrichissement en cations et les plus faibles sous *Eucalyptus*. BERNHARD-REVERSAT (1987b) observe également sous *Acacia seyal* des pluviolessivats plus concentrés en cations par rapport à l'*Eucalyptus* lors des fortes

Tableau 49 : Facteurs d'enrichissement des eaux de pluviolessivage au cours de l'année 1994.

Situation et niveau	Ca	K	Mg	P	N_NH4	N_NO3	N organique
Acacia à Ngong							
Egouttement	2,2	3,4	3,8	1,9	0,8	0,4	3,6
Ecoulement	4,1	10,2	8,7	8,8	2,0	0,3	7,5
Pluviolessivats totaux	2,3	3,7	4,0	2,3	0,9	0,4	3,8
Eucalyptus à Ngong							
Egouttement	1,1	1,7	1,7	2,2	1,7	0,8	2,3
Ecoulement	1,8	8,4	3,2	17,7	3,9	0,4	1,3
Pluviolessivats totaux	1,2	2,0	1,8	2,9	1,8	0,8	2,2
Cassia à Mayo Dadi							
Egouttement	2,0	1,6	2,1	1,4	1,1	0,9	1,1
Ecoulement	3,2	12,0	5,0	6,7	0,8	0,7	1,5
Pluviolessivats totaux	2,0	1,9	2,2	1,5	1,1	0,9	1,1

pluies.

Les facteurs d'enrichissement de l'écoulement sont plus élevés que ceux de l'égouttement. Ils varient en fonction de l'espèce et de l'élément considérés. Ils sont très élevés pour P et K et plus proches de ceux de l'égouttement pour Ca et Mg. Cet enrichissement est attribué au lavage du dépôt sec accumulé sur le tronc et les lichens mais aussi à la récrétion par le tronc et la microflore épiphyte. Ce dernier processus semble important dans le cas du potassium.

Pour chacune des espèces les coefficients d'enrichissement des pluviolessivats totaux se classent dans l'ordre décroissant suivant :

- *Acacia* : Mg > K > P= Ca > N-NH_4 > N-NO_3
- *Cassia* : Mg > Ca > K > P > N-NH_4 > N-NO_3
- *Eucalyptus* : P > K > Mg > N-NH_4 > Ca > N-NO_3.

Les facteurs de concentration moyens des pluviolessivats dus à l'évaporation de l'eau interceptée par la végétation sont donnés par le rapport : quantité d'eau hors couvert / quantité d'eau sous couvert, hors écoulement. Ils sont pour chacune des espèces respectives *Acacia, Eucalyptus* et *Cassia* de 1,13 - 1,1 et 1,02. La comparaison de ces facteurs avec les coefficients d'enrichissement du tableau 49 montre qu'il n'y a pratiquement pas d'échange de Ca avec

l'*Eucalyptus* au niveau du feuillage.

En fonction de leur concentration, les pluviolessivats se classent dans l'ordre décroissant suivant:

- *Acacia* : K > Ca > Mg > N-NH_4 > N-NO_3 > P
- *Cassia* et *Eucalyptus* : K > Ca > N-NH_4 > N-NO_3 > Mg > P.

Les variations saisonnières des concentrations (figure 44 et annexe 5) indiquent de fortes charges en éléments minéraux des pluviolessivats au début de la saison des pluies. Cela s'explique par les dépôts formés sur la végétation par les poussières atmosphériques en saison sèche et en début de saison des pluies. On observe comme BERNHARD-REVERSAT (1987b) une relation de type exponentielle décroissante entre la pluie incidente (cumuls de 15 jours) et les teneurs en éléments minéraux des pluviolessivats.

Le passage de la pluie au travers des houppiers entraîne le plus fort accroissement de teneur pour le potassium. Cette constatation a été faite par tous les chercheurs ayant travaillé sur cet élément. RAPP (1971) explique, pour le chêne vert, que le potassium est libéré plus facilement des feuilles sénescentes que les autres éléments et récrété de façon plus importante à partir des jeunes feuilles. On constate également un fort enrichissement en K au niveau des troncs dû au lessivage des poussières et à la libération par l'écorce.

Le calcium montre un enrichissement variable en fonction de l'espèce. Chez *Eucalyptus*, son faible coefficient d'enrichissement est lié au faible dépôt de poussières atmosphériques riches en Ca sur la végétation et à l'absence de récrétion de cet élément par les feuilles d'*Eucalyptus*. HANCHI (1994) constate le même phénomène pour le hêtre en France. Etant donné le faible dépôt de Ca sur la végétation, les forts coefficients d'enrichissement observés sous *Acacia* et *Cassia* seraient dus à une récrétion de Ca par le feuillage et vraisemblablement aussi par le tronc des arbres.

Le magnésium est libéré de la végétation à cause de sa présence en quantité soluble dans les feuilles. Sa libération est forte chez l'*Acacia*.

Le plus fort coefficient d'enrichissement en phosphore, dont une part est due à la libération par le tronc se rencontre chez l'*Eucalyptus*.

Les teneurs en N-NO_3 sont toujours plus faibles dans les eaux d'égouttement et d'écoulement que dans la pluie incidente. Il en est de même pour N-NH4 dans les eaux

d'égouttement sous *Acacia* et d'écoulement sous *Eucalyptus*. En fait le seul enrichissement en azote sous forme de N-NH_4 s'observe sous *Eucalyptus*. De nombreux auteurs rapportés par HANCHI (1994) ont constaté cette diminution des teneurs en azote après passage à travers le couvert forestier et certains l'expliquent par l'absorption de l'azote au niveau des feuilles. BONNEAU et al. (1991) indiquent que l'absorption de N-NH_4 par le feuillage provoque une récrétion de K, Mg et Ca par simple phénomène d'échange d'ions. Ce processus constitue une hypothèse plausible dans le cas de l'*Acacia*. Inversement, on pourrait penser que la libération de N-NH_4 par le feuillage d'*Eucalyptus* soit l'objet d'échange de protons avec la pluie incidente limitant ainsi les pertes de cations.

L'enrichissement en azote organique s'est montré beaucoup plus important sous *Acacia* que sous les autres espèces ligneuses.

b) Les flux annuels d'éléments minéraux dans le pluviolessivage en 1994

Les transferts de cations basiques (Ca, Mg et K) et d'azote organique de la végétation vers le sol par le pluviolessivage (égouttement + écoulement - pluie incidente) sont plus importants chez l'*Acacia* que chez les autres espèces (tableau 47). Par contre les flux d'azote minéral et de P sont plus élevés sous *Eucalyptus*. L'écoulement le long des troncs représente une proportion importante des apports en K et P. Par rapport à la litière d'arbres le pluviolessivage total représente moins de 10% des apports de Ca et Mg. Alors qu'en zone forestière humide, le pluviolessivage est le mode de transfert majeur du K de la végétation au sol (BERNHARD-REVERSAT, 1977 ; VITOUSEK et SANFORD, 1986), dans nos conditions il s'avère moins important que la litière d'arbre et représente respectivement 50%, 24% et 70% des apports par la litière pour les espèces *Acacia*, *Eucalyptus* et *Cassia*. Par rapport aux résultats de BERNHARD-REVERSAT (1987b) au Sénégal, les pluviolessivats de Ngong et Mayo Dadi se différencient par moins de Ca et Mg essentiellement d'origine terrigène et par une absorption d'azote minéral chez l'*Acacia*.

ROOSE et VILLECOURT (1978) ne constatent pas d'enrichissement en azote total dans le pluviolessivage sous savane arborée à Lamto. On fait la même observation pour le *Cassia* à Mayo Dadi. A Ngong, il existerait un transfert d'azote organique de la végétation au sol par cette voie. Etant donnée l'imprécision dans le dosage de cette forme d'azote, il est toutefois difficile de l'affirmer pour l'*Eucalyptus*.

244. Le ruissellement

Dans la culture, on observe un faible enrichissement en ions et même un appauvrissement en N minéral des eaux de ruissellement par rapport à la pluie incidente (tableau 45). Dans les jachères, le transfert à travers la litière se traduit par un fort enrichissement en éléments minéraux des eaux de ruissellement par rapport à l'égouttement, en particulier en K et P. Cependant la qualité des eaux de ruissellement ne reflète pas exactement celle des eaux ayant circulé à travers la litière. Une très faible proportion des eaux traversant la litière a ruisselé (de l'ordre de 1%) et par conséquent les échantillons collectés uniquement en cas de forte pluie sont plus dilués que

Tableau 50 : Coefficients de corrélations entre les cations et les anions dans les eaux de drainage.

Situation		anions	cations					
Année 1993			Ca	Mg	K	Na	Al	$N\text{-}NH_4$
Ngong	*Acacia*	$N\text{-}NO_3$	0,97	0,94	0,87	0,45	-0,36	0,05
		$S\text{-}SO_4$	0,30	0,38	0,61	0,51	-0,41	0,93
		Cl	0,98	0,98	0,97	0,43	-0,41	0,30
	Eucalyptus	$N\text{-}NO_3$	0,91	0,80	0,58	0,13	-0,34	0,22
		$S\text{-}SO_4$	0,18	0,17	0,82	0,98	0,12	0,81
		Cl	0,63	0,58	0,90	0,68	-0,16	0,77
Mayo Dadi	*Cassia*	$N\text{-}NO_3$	0,64	0,71	0,77	0,68	0,72	0,58
		$S\text{-}SO_4$	0,91	0,93	0,83	0,95	0,71	0,88
		Cl	0,39	0,38	0,54	0,09	-0,59	-0,03
	jachère herb.	$N\text{-}NO_3$	0,90	0,85	0,49	0,77	-0,19	-0,54
		$S\text{-}SO_4$	0,47	0,55	0,25	0,95	-0,05	-0,08
		Cl	0,80	0,83	0,97	0,29	-0,55	0,24
	culture	$N\text{-}NO_3$	0,94	0,92	0,59	-0,19	-0,78	-0,12
		$S\text{-}SO_4$	0,10	0,04	0,40	0,88	0,55	0,77
		Cl	0,02	-0,1	-0,05	0,37	-0,38	-0,47
Année 1994			Ca	Mg	K	Na	Al	$N\text{-}NH_4$
Ngong	*Acacia*	$N\text{-}NO_3$	0,96	0,89	0,36	nd*	nd	-0,11
	Eucalyptus	$N\text{-}NO_3$	0,60	0,63	0,82	nd	nd	0,96
	jachère herb.	$N\text{-}NO_3$	0,75	0,73	-0,03	nd	nd	-0,07
	culture	$N\text{-}NO_3$	0,98	0,89	0,47	nd	nd	-0,13
Mayo Dadi	*Cassia*	$N\text{-}NO_3$	0,22	-0,03	0,24	nd	nd	0,46
	jachère herb.	$N\text{-}NO_3$	0,71	0,84	0,47	nd	nd	0,64
	culture	$N\text{-}NO_3$	0,77	0,87	0,33	nd	nd	0,91

* nd : non disponible

l'échantillon moyen représentatif du transfert à travers la litière. D'ailleurs, des lois se dégagent difficilement quant au comportement des ions pouvant être inféodé au cycle biologique lié à la récrétion de la végétation ligneuse et herbacée et à la minéralisation des litières. De bonnes relations statistiques existent tout de même entre Ca, Mg et P sous *Acacia* et entre les éléments précédents et K sous jachère herbacée.

Les très faibles quantités d'eau ruisselée dans les jachères entraînent des pertes négligeables en éléments minéraux pour ces agrosystèmes (tableau 47).

245. La lixiviation

Pour des raisons méthodologiques, les flux hydriques à travers les horizons organo-minéraux n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette étude. Seuls les flux plus profonds à 60 cm à Ngong et à 1 m à Mayo Dadi ont fait l'objet de relevés. Malgré le mauvais fonctionnement des plaques lysimétriques mentionné à l'annexe 2 (volumes récoltés faibles et aléatoires), on a constaté que les concentrations moyennes annuelles pondérées par les volumes d'eau drainés étaient proches des concentrations moyennes annuelles pondérées par les hauteurs d'eau de pluviolessivage arrivant au sol. Par conséquent, les valeurs pondérées par les quantités d'eau drainées rendraient assez bien compte de la qualité réelle du flux.

Le tableau 45 montre que les eaux de drainage à 60 cm de profondeur dans les jachères arborées à Ngong sont plus concentrées en Ca, Mg et N-NO_3 que les eaux de ruissellement en surface. Par contre, N-NH_4, P et K sont plus dilués qu'en surface. Dans la jachère herbacée et sous *Cassia* à Mayo Dadi, N-NO_3 est plus dilué en profondeur et la seule augmentation concerne K sous *Cassia*. Il semble que le sol de Mayo Dadi plus filtrant que le sol de Ngong favorise un lessivage profond de K et P.

En 1994, les eaux de drainage sont plus riches en N-NO_3, Ca et Mg sous culture et *Acacia* que dans les autres situations (tableau 45). En favorisant la lixiviation des cations, ces flux de nitrates montrent l'importance de la minéralisation de la matière organique et de la nitrification de NH_3. Dans le cas de la culture, ce dernier processsus a pu intervenir de façon marquante en raison des apports d'engrais azoté pratiqués au cours des années antérieures à 1994 et de la forte minéralisation de l'azote observée dans cette situation (voir chapitre V).

On sait que la production de nitrates à partir de la MO et de N-NH_4 s'accompagne d'une libération de protons. Dans un écosystème stable, l'acidité est neutralisée par d'autres processus relatifs au cycle de l'azote comme l'absorption par les plantes (BONNEAU et al., 1987 ;

DALDOUM, 1992). Si l'absorption de nitrates ne se fait pas, les protons sont maintenus dans le milieu et l'anion extrêmement mobile est lessivé et entraîne avec lui le cation le plus disponible selon la loi du maintien de l'électroneutralité des solutions. Les processus intervenant afin de neutraliser la solution, sont l'échange de protons avec des cations du complexe absorbant et l'altération des minéraux du sol.

Le tableau 50 donnant les liaisons entre les ions indique une bonne relation entre le nitrate et les ions Ca et Mg pour toutes les situations de Ngong en 1994, l'*Eucalyptus* présentant la moins bonne relation. Les analyses chimiques plus complètes réalisées sur les eaux de drainage de 1993 confirment, dans les mêmes situations, la préférence de relation pour le maintien de l'électroneutralité des solutions, entre le nitrate et les ions alcalino-terreux. Le sulfate accompagnerait d'autres ions comme K, Na et même N-NH_4 ou serait plus ubiquiste dans ses associations. Ces phénomènes ont déjà été constatés par DALDOUM (1992) dans les pessières vosgiennes. Par contre sous *Cassia*, la plus faible relation observée en 1993 entre le nitrate et les cations Ca et Mg et l'absence de relation en 1994 confère au sulfate un rôle plus important dans le transport des ions alcalino-terreux. Ceci est à relier à la faible minéralisation de l'azote du sol sous *Cassia*, présentée au chapitre V.

La qualité des flux observée à 60 cm ou 1 m de profondeur ne doit pas faire oublier des processus très importants. Les nitrates sont essentiellement produits en surface et peuvent être prélevés et immobilisés lors de leur migration dans le profil. Notre dispositif ne nous a pas permis d'évaluer les changements intervenant lors du passage à travers les horizons superficiels et d'apprécier une dynamique. L'entraînement de Ca et Mg peut être bénéfique au peuplement en plaçant le système racinaire complet dans des conditions améliorées d'alimentation en cations. Sous l'*Acacia*, il semble que 50% du flux de nitrates et de cations se soient produits en début de saison des pluies avant le 7 juillet 1994, pendant la période de forte activité végétative, au cours de laquelle la recharge de la réserve utile du sol n'a pas été réalisée complètement sur la profondeur 150 cm (MILLET, 1994 et annexe 2). Par conséquent, le faible drainage profond au cours de cette période, a pu favoriser le prélèvement par la plante à une profondeur comprise entre 60 cm et 150 cm. En revanche, la forte circulation des nitrates dans le sol sous culture, à des périodes de faible prélèvement par la plante cultivée, peut être le principal facteur de désaturation du complexe absorbant et d'acidification du profil.

Enfin, concernant la lixiviation des cations et des nitrates à Ngong, les analyses des eaux de drainage de 1993 (tableau 46) n'indiquent pas de différence entre les jachères, mettant en avant l'importance de l'absorption par les plantes. Par contre, en 1995, on observe que les teneurs

moyennes pondérées en cations des eaux de drainage sont 2,5 fois plus fortes sous *Acacia* (Ca = 4,3 ppm ; Mg = 2 ppm) que sous *Eucalyptus* et jachère herbacée (Ca = 1,7 ppm ; Mg = 0,8 ppm). Ces valeurs sont toutefois plus proches de celles de 93 que de celles de 94. Par conséquent, le très fort flux de cations Ca et Mg, associé à celui des nitrates, observé à 60 cm de profondeur sous *Acacia* en 1994, pourrait être lié à l'absence de développement de la strate herbacée sous cette espèce en 94. Il faut ajouter que le plus fort flux de nitrates et de cations, observé en profondeur sous *Acacia,* ne correspond pas à une baisse de teneur en azote et en cations échangeables du sol, mais au contraire à une amélioration du statut organominéral des couches supérieures du sol.

On remarque sous *Eucalyptus* en 1993, une plus forte présence d'Al que dans les autres situations, pouvant être liée à la légère désaturation du complexe absorbant sous cette espèce.

25. Conclusion partielle sur les flux de bioéléments

Nous retiendrons de ce chapitre quelques points essentiels pouvant caractériser les flux des éléments minéraux dans nos jachères.

La production annuelle de litière des arbres varie entre 2 et 5 t MS /ha en fonction de l'espèce et de la fertilité de la station. Celle du *Cassia* limitée par la disponibilité en azote du sol ne dépasse pas 4 t MS /ha alors que celles de l'*Acacia* et de l'*Eucalyptus* peuvent atteindre des valeurs proches de 5 t MS /ha.

Le *Cassia* et l'*Eucalyptus* présentent une bonne efficience de rétention des éléments minéraux des feuilles avant la défoliation et les litières sont pauvres en nutriments en particulier N et P. L'*Acacia*, espèce fixatrice d'azote, montre au contraire une faible translocation des éléments minéraux des feuilles vers les parties pérennes de l'arbre et fournit une litière riche en N, P et Mg, favorisant ainsi le recyclage de ces éléments par le sol.

Les quantités de P et K libérées par les litières des jachères herbacées et arborées sont comparables. Hormis le cas de l'*Acacia* où le phosphore est principalement recyclé par la litière de l'arbre, dans les autres jachères arborées, lorsque la strate herbacée est bien développée, elle joue un rôle prépondérant dans le recyclage de cet élément. C'est le cas de l'*Eucalyptus* à Ngong et du *Cassia* à Mayo Dadi. La strate herbacée est responsable aussi, pour une grande partie, du recyclage du K sous *Eucalyptus* et *Acacia*.

Les quantités de Ca apportées et libérées par les litières des arbres sont plus importantes que celles recyclées par les herbacées.

Si au cours du processus de décomposition des litières de feuilles d'arbres, on observe une rétention de l'azote et du phosphore, dans les litières totales des jachères arborées, l'influence de la strate herbacée et du bois fait que ce sont l'azote et le calcium qui sont retenus comme dans les litières herbacées.

Les quantités d'azote recyclées par la litière sont les plus importantes chez l'*Acacia*, en raison d'un plus fort apport et d'un fort coefficient de libération. Elles représentent trois fois celles sous *Cassia*. Elles sont les plus faibles chez l'*Eucalyptus* à cause d'une faible vitesse de décomposition et d'une forte rétention dans la litière. Dans les jachères herbacées le recyclage de N est également faible en raison d'un faible apport et d'une forte rétention au moment de la décomposition de la litière.

Si le pluviolessivage contribue faiblement au recyclage de Ca et Mg, il représente 25% à 70% des apports de K par la litière d'arbre selon l'espèce. Si pour les éléments K et P, l'écoulement le long des troncs représente 12% à 21% du pluviolessivage, pour les éléments Ca et Mg cette proportion est toujours inférieure à 10%. Le flux d'azote organique par le pluviolessivage chez l'*Acacia* est relativement important ; il représente 20% de l'azote de la litière de l'arbre.

Sous *Acacia* et encore davantage sous culture, les eaux de drainage circulant dans le sol à 60 cm de profondeur sont en général plus riches en nitrates et en ions alcalino-terreux que dans les autres situations. Ceci est à mettre en relation avec la forte minéralisation de l'azote observée dans ces situations (voir chapitre V). Ce processus est lié à l'appauvrissement chimique du sol sous culture alors qu'il accompagne une amélioration du statut organominéral du sol sous *Acacia*.

CHAPITRE V

LES CYCLES ET BILANS ECOSYSTEMIQUES

LES CYCLES ET BILANS ECOSYSTEMIQUES

1. INTRODUCTION

Dans cette étude, le cycle des éléments minéraux dans le système sol-plante est présenté en trois parties : (1) le cycle biochimique interne, (2) les restitutions au sol par les plantes et (3) l'accumulation dans la phytomasse pérenne.

Le cycle biochimique interne correspond aux transferts internes à la plante d'éléments minéraux nécessaires à l'élaboration des différents organes (ATTIWILL, 1980). Mis en évidence par SWITZER et NELSON (1972), le recyclage nécessaire à l'élaboration des feuilles d'arbres a été calculé. Les graminées pérennes, dont les facteurs de translocation des éléments minéraux avant la sénescence des parties aériennes ont été évalués, sont aussi prises en compte dans le cycle biochimique interne des plantes de la jachère.

Les restitutions au sol par les plantes, appelées également cycle externe des éléments minéraux (BALLINI et BONIN, 1994) comprennent les litières et le pluviolessivage.

L'accumulation dans la phytomasse pérenne comprend à la fois la croissance racinaire et la croissance ligneuse aérienne.

Dans les études classiques sur les cycles des éléments minéraux dans les peuplements forestiers, très souvent le délai entre le dépôt d'un élément dans la litière et sa libération au cours du processus de minéralisation n'est pas pris en compte, considérant qu'à long terme un élément apporté au sol sera à nouveau disponible pour la plante (ATTIWILL, 1980). On considère alors que l'immobilisation dans les parties pérennes des plantes est due à la fixation atmosphérique, aux apports par la pluie et aux réserves du sol, et correspond ainsi au flux géochimique.

Cependant, dans les jeunes plantations forestières pouvant être exploitées avant l'équilibre du stock de litière au sol, le rythme de décomposition de la litière influence le niveau de prélèvement des éléments minéraux du sol et des conséquences sont à prévoir sur les propriétés chimiques du sol. C'est pourquoi, notre bilan au niveau du sol a été élaboré en s'appuyant sur les quantités d'éléments libérés par la litière.

Tableau 51 : Dynamique du carbone dans les différents agrosystèmes (t/ha/an). Pour une même variable, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil d'erreur de 5%.

	Bilans moyens (1989-1995)								Année 1995							
	Ngong					Mayo Dadi			Ngong					Mayo Dadi		
	ACP	CAS	EUC	JHP	CULT	ACP	CAS	JHP	ACP	CAS	EUC	JHP	CULT	ACP	CAS	JHP
(1) Restitutions au sol																
Litière d'arbre	2,2 a	1,8 b	2,2 a			1,0 c	1,1 c		1,9	1,7	2,5			1,2	1,3	
Litière herbacée	0,9 cd	0,5 d	1,2 c	2,3 a		1,7 b	0,5 d	1,6 b	1,1	0,1	1,3	3,0		1,8	0,4	1,6
Total	**3,1**	**2,3**	**3,4**	**2,3**	**nd**	**2,7**	**1,6**	**1,6**	**3,0**	**1,8**	**3,8**	**3,0**	**nd**	**2,9**	**1,7**	**1,6**
(2) Fixation dans la phytomasse pérenne																
Phytomasse racinaire	2,0	1,7	1,3	0,4	0,1	1,1	1,0	0,5	1,2	0,2	1,4	0,6	0,1	1,1	1,0	0,5
Phytomasse ligneuse aérienne	2,6	1,8	2,7			nd	nd		1,5	0,3	2,9			nd	nd	
Total	**4,6**	**3,5**	**4,1**	**0,4**	**0,1**	**nd**	**nd**	**0,5**	**2,7**	**0,5**	**4,2**	**0,6**	**0,1**	**nd**	**nd**	**0,5**
Fixation totale annuelle (1 + 2)	**7,7**	**5,8**	**7,5**	**2,7**	**0,1**	**nd**	**nd**	**2,1**	**5,7**	**2,2**	**8,0**	**3,6**	**0,1**	**nd**	**nd**	**2,1**
(3) Libération de la litière vers le sol	(2,5)	1,8	1,6	1,0			1,7	1,4	(2,5)	1,7	0,7	0,9			1,6	2,3
(4) Stock du sol en 1995 (horizon 0-40 cm)	19,1 a	hd *	14,5 bc	16,4 b	13,6 c	15,5	13,4	14,5	19,1	hd *	14,5	16,4	13,6	15,5	13,4	14,5

* hd : hors dispositif ; nd : non déterminé

Le stock de litière au sol en décembre 1995 a été calculé à partir du stock mesuré en octobre 1995 ajouté de la chute de litière d'octobre à décembre.

Concernant la litière de *Cassia*, les valeurs des stocks au sol en 1995 et des chutes à partir de 1994 n'étant pas statistiquement différentes entre les sites de Ngong et Mayo Dadi (chapitre IV), le coefficient de disparition de la litière mesuré à Mayo Dadi sera appliqué au cas de Ngong.

Chez l'*Acacia*, la disparition réelle de la litière n'a pas été mesurée, cependant les rythmes théoriques de disparition de la MO et des bioéléments (coefficients k) sont proches de ceux du *Cassia*. Cela suggère un niveau de transfert des bioéléments de la litière au sol (X) un peu inférieur à l'apport au sol (A).

Afin de tenir compte de l'évolution interannuelle, les flux moyens des restitutions des années 1993 à 1995 et ceux de l'accumulation dans la phytomasse pérenne de 1989 à 1995 ont été mis en parallèle avec les flux de l'année 1995.

Les flux d'éléments ne prennent pas en compte le renouvellement racinaire mais seulement l'accroissement de la phytomasse totale souterraine. Dans les bilans écosystémiques de C et N, on considérera qu'une proportion de 30% de la phytomasse de racines fines triée au tamis de maille 1 mm ne serait pas récupérée sur un tamis de maille 2 mm (CESAR rapporté par MITJA et PUIG, 1990). Par conséquent cette proportion est déjà prise en compte dans le dosage de la MO du sol de taille inférieure à 2 mm et les quantités de C et N correspondantes seront retirées des stocks de C et N totaux du sol.

En 1995, l'accroissement en biomasse racinaire a été estimé approximativement en supposant, comme le suggère DOMMERGUES (1963), que dans une formation parvenue à maturité, les quantités de MO produite en dessous et au dessus du sol sont dans les mêmes rapports que les poids des parties aérienne et souterraine, ce qui reste une hypothèse.

Les apports par la pluie et le pluviolessivage sont ceux mesurés en 1994. Ne sont pas intégrés dans les bilans au niveau du sol, les pertes par lixiviation ni les apports par altération de la roche mère.

2. LA DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

La fixation moyenne annuelle du carbone dans les jachères arborées est supérieure à celle

des jachères herbacées (tableau 51). Ce phénomène est directement lié à la modification des facteurs hydriques induite par les arbres : les espèces ligneuses à croissance rapide introduites dans la jachère améliorent la productivité du système et ralentissent la recharge de la réserve hydrique en profondeur en augmentant l'évapotranspiration réelle (MILLET, 1994 et annexe 2). Ces phénomènes permettent de limiter le drainage et la lixiviation des éléments minéraux de l'écosystème.

A Ngong, à partir de 1993, on constate une baisse significative de chute de litière et une diminution de l'accroissement courant en bois du *Cassia* ainsi qu'une augmentation de la productivité de la jachère herbacée à *Andropogon gayanus* (chapitre IV), si bien qu'en 1995, seules les jachères arborées à *Acacia* et *Eucalyptus* se montrent plus productives que la jachère herbacée (tableau 51). La production de bois de l'*Acacia* a également diminué, en revanche la productivité de l'*Eucalyptus* s'est maintenue. Cette dernière espèce à croissance rapide et au système racinaire relativement pivotant présente une forte capacité à prélever les éléments minéraux du sol et une bonne efficience d'utilisation de certains de ces éléments en particulier l'azote.

Par rapport à Ngong, la plus faible fertilité du milieu à Mayo Dadi, a engendré un moindre

Tableau 52 : Fixation du carbone dans les agrosystèmes de Ngong en décembre 1995 (t/ha). Pour une même variable, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil d'erreur de 5%.

Compartiment / Age des peuplements **	*Acacia* 7 ans	*Cassia* 6 ans	*Eucalyptus* 7 ans	JHP 5 ans	JHD 8-10 ans	Culture
(1) Racines fines (Ø < 2 mm)	4,3 b	5,7 a	2,5 c	2,0 cd	1,8 d	0,5 e
(2) Grosses racines + souches	9,4	4,5	6,6			
(3) Litière au sol	3,3	2,2	7,0	4,0	1,2	nég.
(4) Herbe	1,0 c	0,1 d	1,6 bc	3,6 a	2,0 b	1,2 c
(5) Biomasse ligneuse aérienne	18,2 a	10,9 b	19,2 a			
(6) Feuilles des arbres	-	0,5	1,5			
Phytomasse souterraine (1+2)	13,7	10,2	9,1	2,0	1,8	0,5
Phytomasse aérienne (3 + 4 + 5 + 6)	22,5	13,7	29,4	7,6	3,2	1,2
Phytomasse totale (1+ 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	**36,2**	**23,9**	**38,5**	**9,6**	**5,0**	**1,7**
(7) Sol (0-40 cm)	18 a	hd *	13,7 bc	15,9 b	15,8 b	13,5 c
Carbone total de l'agrosystème (1+2+3+4+5+6+7)	**54,2**		**52,2**	**25,5**	**20,8**	**15,2**
Carbone souterrain (1 + 2 + 7)	31,7		22,8	17,9	17,6	14,0

** : Durant une phase d'établissement de 2 ans, les arbres sont associés aux cultures ; la mise en jachère intervient à l'issue de cette période.
* hd : hors dispositif ; nég. : négligeable

développement des peuplements ligneux et de plus faibles chutes de litière ayant pour conséquence un effet moins marqué sur le stock de C du sol (chapitre III).

Les pertes de C de la litière sont voisines des apports dans le cas du *Cassia* et de l'*Acacia*. Sous *Eucalyptus* les pertes sont faibles par rapport aux apports, ce qui a pour conséquence une forte accumulation de C dans la litière au sol (tableau 52).

Les fortes pertes de C de la litière d'*Acacia* par rapport aux autres traitements coïncident avec la meilleure incorporation de la litière à la MO du sol. Pour mémoire, à Ngong, la quantité de carbone du sol a augmenté significativement de 0,1% en 4 ans (chapitre III) soit de 3 t/ha dans l'horizon 0-20 cm.

Sous *Eucalyptus*, le faible stock de C du sol (intermédiaire entre la culture continue et la jachère herbacée) est dû à la fois à la très faible incorporation de la litière au sol (chapitre III) et à la minéralisation assez forte de la MOS étudiée au paragraphe 31 de ce chapitre.

A Mayo Dadi, le *Cassia* et la jachère herbacée présentent des apports de litière au sol et des niveaux de décomposition comparables, ce qui a pour conséquence un effet équivalent sur le stock de carbone du sol. L'étude des fractions organiques du sol présentée au chapitre III indiquait également une incorporation comparable de MO au sol de ces deux types de jachère à Ngong.

Sur le tableau 52, il apparaît que les agrosystèmes plantés d'arbres de 7 ans contiennent deux fois plus de carbone que la jachère herbacée et la proportion de C qui se trouve dans le sol diffère selon l'espèce d'arbre. Ainsi, malgré l'équivalence en 1995 des phytomasses totales des espèces *Eucalyptus* et *Acacia*, chez cette dernière espèce, l'accumulation de C dans le sol et le plus fort rapport racine/tige donnent un stock de C souterrain (MOS + phytomasse de l'horizon 0-60 cm) de 40% plus élevé que chez l'*Eucalyptus*. Cette MO souterraine subsiste après l'exploitation des peuplements et constitue une source de nutriments pour les cultures suivantes.

3. LE CYCLE DE L'AZOTE

31. La minéralisation de l'azote du sol

Les réserves du sol en azote se présentent essentiellement sous forme organique. L'azote

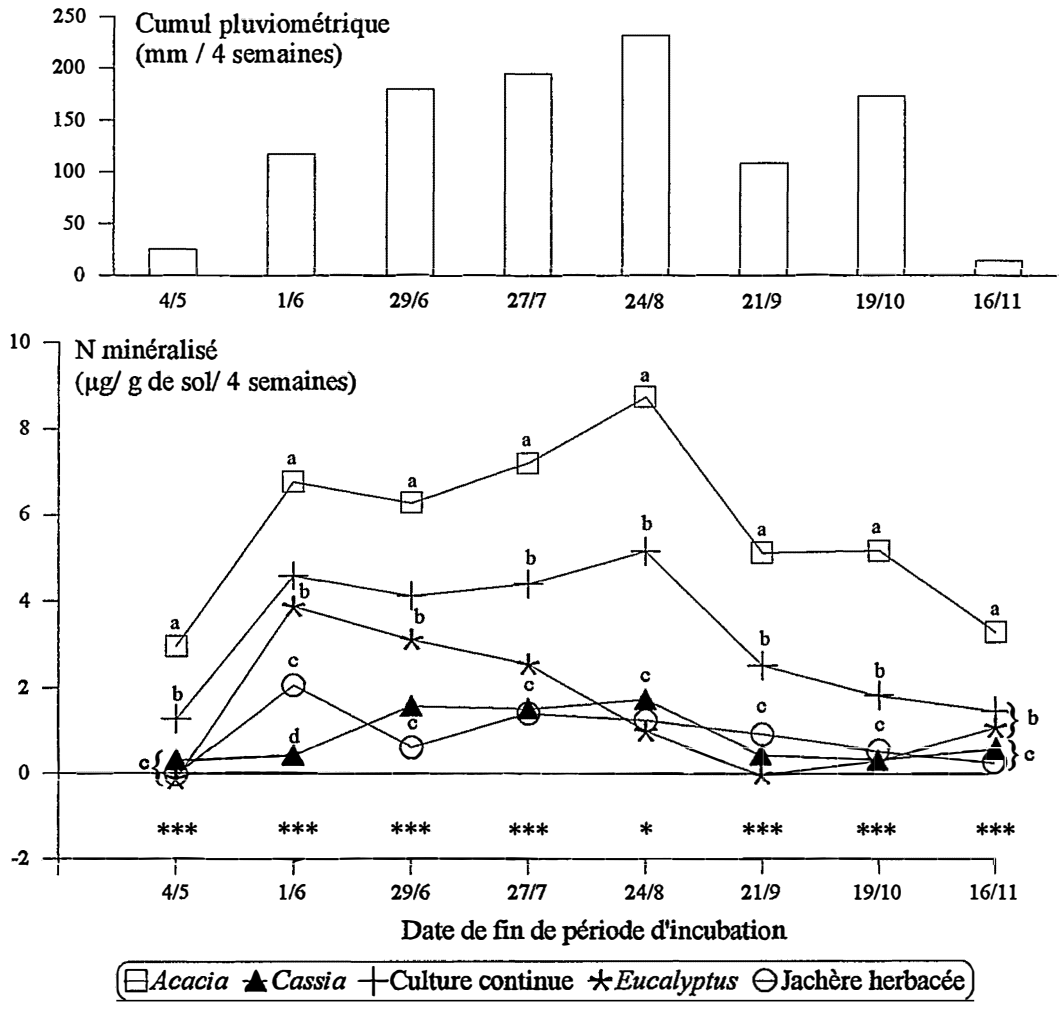


Figure 45 : Minéralisation nette in situ de l'azote de l'horizon 0-20 cm du sol de Ngong en 1995.
Pour chaque période de 4 semaines, le seuil de signification de l'ANOVA est précisé. Les lettres a, b, c et d indiquent les groupes homogènes.

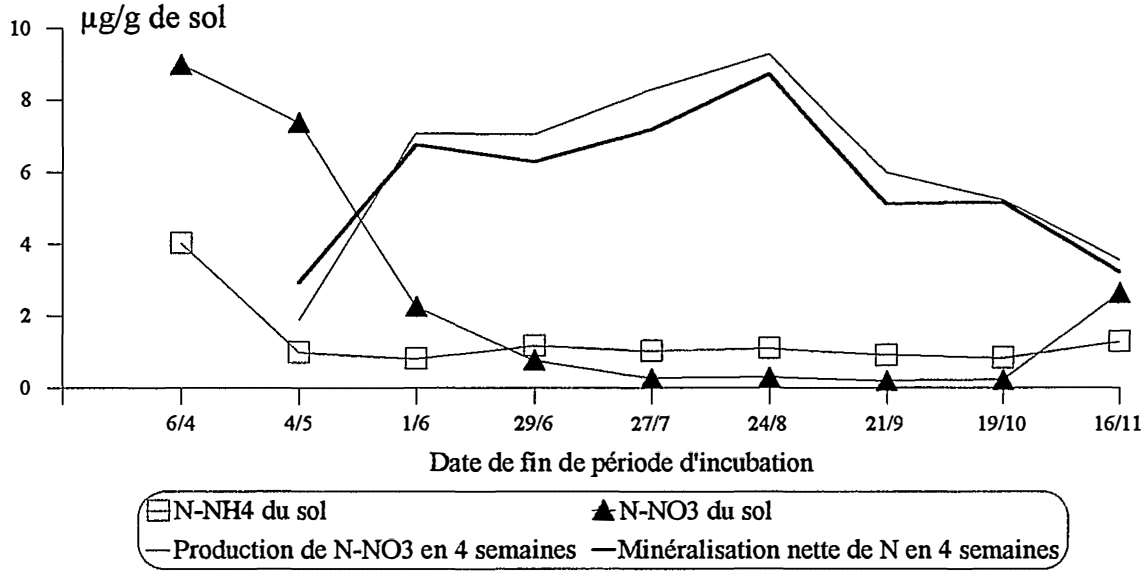


Figure 46 : Evolution des différentes formes de N minéral du sol et part des nitrates dans la minéralisation nette de l'azote du sol sous *Acacia* en 1995.

Tableau 53 : Minéralisation *in situ* de l'azote de l'horizon 0-20 cm des sols des différents agrosystèmes de Ngong. Pour chaque variable, il existe des différences très hautement significatives entre les traitements.

	Agrosystème				
	Acacia	*Cassia*	*Eucalyptus*	Jachère herbacée	Culture continue
Minéralisation de N en 1995					
µg N / g de sol / an	51,7 a	6,8 d	11,6 c	6,9 d	26,3 b
% N total / an	17,0 a	3,1 d	6,1 c	3,6 d	12,8 b
kg N / ha / an	157,7 a	20,9 d	36,0 c	21,8 d	83,3 b
Pertes de N minéral par le sol kg N / ha /an	166 a	25 d	40 c	26 d	89 b
Minéralisation de N entre juillet et novembre1994					
kg N-NO_3 / ha / an	85 a	32 c	31 c	28 c	54 b

Deux valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil de 5 %

minéral (ammoniaque, nitrites et nitrates), ne représente qu'une très faible fraction de l'azote total, souvent inférieure à 5%. Les principales formes d'azote assimilables par les plantes supérieures autotrophes étant les ions NO_3^- et NH_4^+, le processus de minéralisation de l'azote constitue alors un facteur écologique extrêmement important pour la production primaire des écosystèmes en particulier les écosystèmes forestiers (DE RHAM, 1973 ; POWERS, 1980 ; ADAMS et ATTIWILL, 1986).

La minéralisation de l'azote du sol a été étudiée dans les différentes parcelles du bloc 3b à Ngong au cours de la saison des pluies 1995. Seul l'horizon superficiel 0-20 cm, siège préférentiel des processus biologiques (BERNHARD-REVERSAT, 1982 ; ABBADIE et LENSI, 1990) a été pris en compte dans ce travail.

La figure 45 donne les productions successives d'azote minéral après 4 semaines d'incubation et le tableau 53 donne les cumuls annuels. L'immobilisation nette de l'azote (valeur de minéralisation négative) s'est produite très rarement et avec des valeurs très faibles (cas de la jachère herbacée le 04/05 et de l'*Eucalyptus* les 04/05 et 21/09.

Les plus fortes quantités d'azote minéralisé se rencontrent sous *Acacia* et les plus faibles sous jachère herbacée et *Cassia*. La minéralisation de l'azote se produisant sous *Acacia* et culture continue est assez importante pendant toute la saison des pluies et suit sensiblement l'évolution de la pluviométrie avec des coefficients de corrélation respectifs de 0,9 (P = 0,003) et

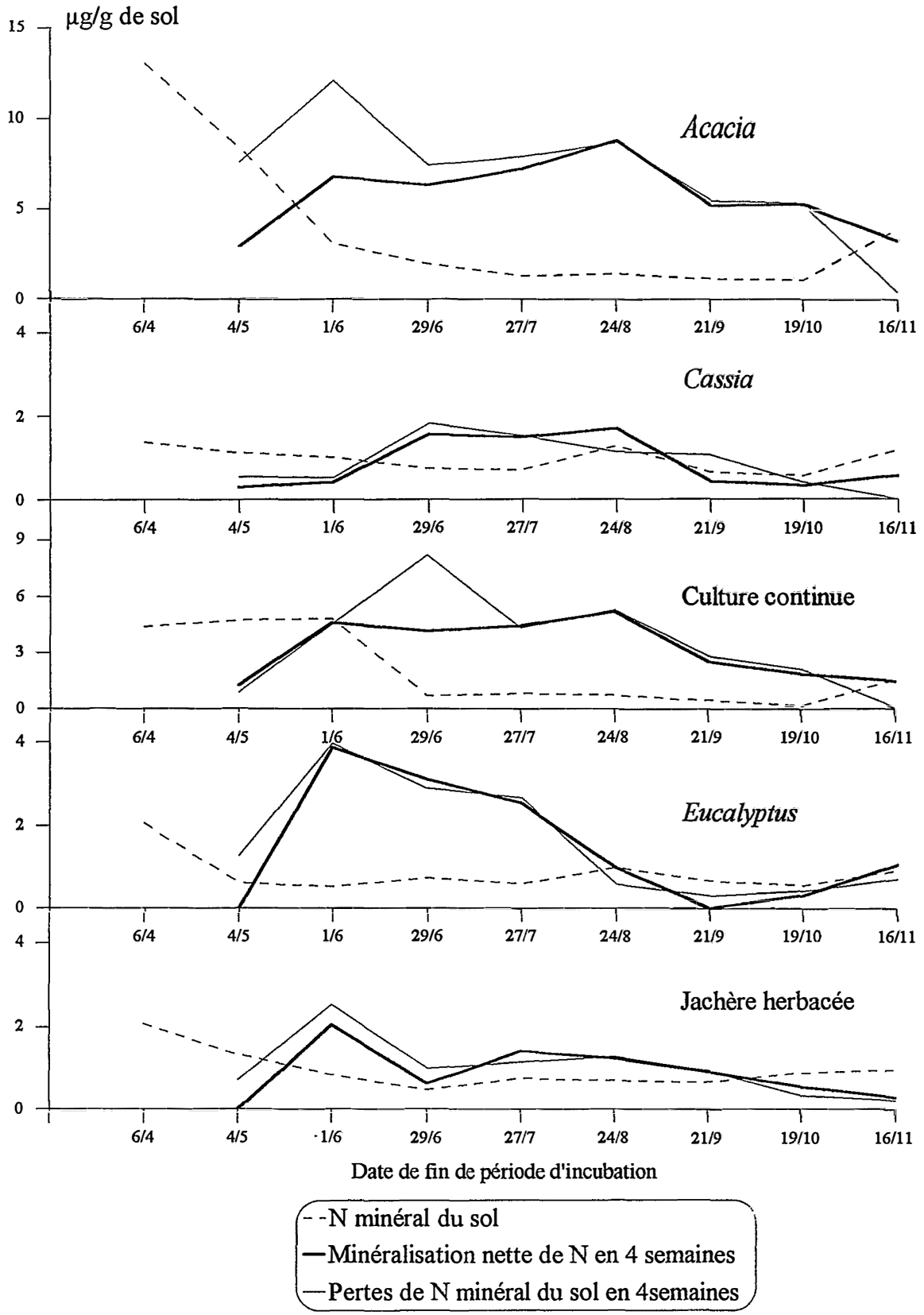


Figure 47 : Evolution de N minéral du sol en relation avec la minéralisation nette de l'azote et les pertes de N minéral par le sol dans les différents agrosystèmes de Ngong au cours de la saison des pluies 1995.

0,76 (P = 0,03).

La figure 46 illustre pour le cas de l'*Acacia*, un phénomène général à toutes les situations, à savoir que la production de nitrates est pratiquement confondue avec la minéralisation nette. On n'observe pas d'accumulation d'ammonium ou très rarement alors que les valeurs négatives ou nulles sont courantes. Ce processus a également été constaté en zone tropicale par DE RHAM (1973) dans les écosystèmes forestiers, BERNHARD-REVERSAT (1982, 1988) dans les steppes, les peuplements forestiers naturels et les plantations ligneuses au Sahel.

Les pertes d'azote du sol au cours de la période d'incubation sont la résultante de l'évolution de N minéral du sol et de la minéralisation nette. Si on néglige les pertes par lixiviation, la perte d'azote du sol peut être confondue avec le prélèvement par les plantes. On observe en général (figure 47) en début de saison des pluies, un prélèvement supérieur à la minéralisation entraînant une baisse de teneur en azote minéral du sol alors qu'en fin de saison, le prélèvement devient nul favorisant une accumulation de N minéral dans le sol. Au cours de la saison des pluies, l'absence d'accumulation d'azote minéral dans le sol sous jachère, en particulier de nitrates, est due au prélèvement par les plantes et à l'immobilisation dans la biomasse microbienne. Ce dernier processus peut être important dans le milieu naturel car les apports de C au sol sont élevés et l'azote devient l'élément limitant de la décomposition (ADAMS et ATTIWILL, 1986).

La situation culture continue correspond à un sol pratiquement nu en 1995. La forte minéralisation de l'azote représentant 12,8% de N total/an (tableau 53) est à mettre en parallèle avec les fortes teneurs en nitrates des eaux de lessivage. L'absence de développement de la culture a donc favorisé les pertes d'azote par lixiviation.

L'abandon cultural et le développement de la végétation naturelle à base de graminées annuelles puis d'*Andropogon gayanus* a entraîné un blocage de minéralisation de l'azote (3,6% de N total/an). La faible minéralisation de l'azote dans les savanes graminéennes a déjà été évoquée par DE RHAM (1973), VILLECOURT et ROOSE (1978), ABBADIE et al. (1992) pour la savane de Lamto. Néanmoins, on observe dans notre cas une production de nitrates qui n'est pas constaté par les auteurs précédents dans les savanes humides. LENSI et al. (1992) mettent en évidence un effet inhibiteur des graminées du genre *Hyparrhenia* sur les bactéries nitrifiantes. Cela confirme les observations de BERLIER (1956) rapportées par DE RHAM (1973) selon lesquelles la suppression des andropogonées entraînerait une augmentation progressive du nombre de germes bactériens. Ainsi, à Lamto, la savane présenterait une série de mécanismes extrêmement

efficaces de conservation et de recyclage de l'azote autorisant une forte production primaire. La fixation non symbiotique assurerait 15% des besoins (BALANDREAU, 1976 ; ABBADIE et al., 1992). Le circuit court entre racines mortes et racines vivantes permettrait l'absorption des molécules d'ammonium sans qu'il y ait solubilisation dans le sol (ABBADIE et al., 1996).

Sous *Eucalyptus* on remarque une augmentation de la production d'azote minéral (6,1% N total/an) par rapport à la jachère herbacée. OHTA (1990) mentionne également que l'afforestation des zones à graminées aux Philippines favorise la minéralisation de l'azote. Au début de la saison des pluies, le niveau de minéralisation de l'azote sous *Eucalyptus* est proche de celui d'un sol dénudé. Il diminue rapidement ensuite, sans liaison avec la pluviométrie contrairement à l'*Acacia* et à la culture, et prend des valeurs presque nulles en septembre et octobre. Ce phénomène peut être mis en relation avec le développement important de la strate herbacée à *Andropogon gayanus* sous *Eucalyptus* à partir du mois de juillet.

BERNHARD-REVERSAT (1984, 1988) observe le même phénomène dans les plantations d'*Eucalyptus* au Sénégal et montre l'effet dépressif de l'*Andropogon gayanus* sur la minéralisation de l'azote. HARMAND et al. (1995) ont constaté, après seulement deux ans de jachère à Ngong, un arrêt de croissance en surface terrière et un dépérissement progressif de certains peuplements d'*Eucalyptus*. La raison invoquée était le fort développement d'*Andropogon gayanus* (+ de 6 t de MS/ha au lieu de 2,5 t de MS/ha dans les peuplements voisins toujours en croissance). L'effet inhibiteur des andropogonées sur la production d'azote minéral a pu perturber le développement de l'arbre et favoriser la reconstitution de l'écosystème savane. Il apparaît alors nécessaire de contrôler la strate herbacée par le pâturage si on veut pérenniser le boisement et encourager la production ligneuse.

Sous *Acacia*, la présence d'azote facilement minéralisable a pu favoriser la minéralisation juste avant la mise en place de l'expérimentation, lors de la première pluie de 10 mm du 20 mars 1995. Ainsi cela expliquerait les plus fortes teneurs en N minéral du sol le 06/04/95 (figure 47). Dans les autres traitements, le phénomène est beaucoup moins marqué.

Sous *Acacia*, la perte d'azote minéral du sol au début de la saison des pluies correspond à un prélèvement important lié à la reprise du cycle végétatif de l'arbre. A ce moment là, la forte activité photosynthétique et respiratoire de cette espèce par rapport aux autres se traduit par une recharge moins rapide de la réserve hydrique du sol (voir annexe 2). Le système radiculaire, fortement développé en surface, utilise au maximum à la fois l'eau des premières pluies et l'azote

minéralisé, pour reconstituer le feuillage de l'*Acacia*. Cette synchronisation entre la grande disponibilité en azote minéral et le prélèvement par la plante favorise une conservation de l'azote dans l'écosystème en limitant sa lixiviation et réduit les possibilités de compétition entre la plante et la biomasse microbienne (LODGE et al., 1994). La plus forte production d'azote minéral par rapport aux autres traitements, tout au long de l'année, montre que l'activité microbienne est favorisée sous *Acacia*. Différents facteurs peuvent intervenir comme la richesse en azote de la litière et de la MOS et des conditions microclimatiques favorables liées à l'ombrage. Contrairement aux andropogonées, les graminées du genre *Pennisetum* au développement important sous couvert de l'*Acacia* n'ont pas eu d'effet dépressif apparent sur la minéralisation de l'azote.

Chez le *Cassia*, au fonctionnement particulier, on observe à partir de 4 ans, des dépérissements d'individus et une baisse des restitutions de litière et de sa teneur en azote. Ces phénomènes s'expliquent par un faible taux de minéralisation de l'azote du sol (3,1% de N total /an) limitant sa disponibilité pour la plante. La cause de ce faible taux de minéralisation comparable à celui de la jachère herbacée à *Andropogon gayanus*, reste à élucider. L'hypothèse la plus plausible est un effet allélopathique de la part du *Cassia* qui, malgré la relative ouverture de son couvert, élimine presque complètement la strate herbacée graminéenne.

L'allélopathie a souvent été évoquée comme le processus essentiel inhibiteur de la minéralisation de l'azote (DE RHAM, 1973 ; BERNHARD-REVERSAT, 1988, 1996a ; LENSI et al., 1992 ; ATTIWILL et ADAMS, 1993 ; ABBADIE et al., 1996).

Les phénomènes d'arrêt de croissance du *Cassia*, suivis du dépérissement d'individus provoquant des trouées dans les peuplements à densité élevée (4 m x 4 m), sont à mettre en parallèle avec le comportement de *Terminalia ivorensis* (framiré) en plantation à forte densité en Côte d'Ivoire. Chez cette dernière espèce, DIDIER DE SAINT AMAND et MALLET (1981) ont montré que les extraits de litières agissaient favorablement sur la croissance des jeunes plants alors que les extraits de racines entraînaient une inhibition du développement, se traduisant au niveau du sol par un blocage de minéralisation de l'azote.

Chez le *Cassia*, l'hypothèse d'une toxicité des racines en décomposition ou des exsudats racinaires, vis à vis des agents bactériens de minéralisation de l'azote, semble plus pertinente que celle d'une action perturbatrice due aux phénols de la litière. En effet, ces derniers sont moins abondants dans la litière de *Cassia* que chez l'*Eucalyptus* où la minéralisation de l'azote du sol est active et semble limitée par le développement des graminées.

Tableau 54 : Stockage de l'azote dans les différents agrosystèmes de Ngong en décembre 1995 (kg/ha). Pour une même variable, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil d'erreur de 5%.

Compartiment	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	JHD	Culture
(1) Racines fines (Ø < 2 mm)	190 a	130 b	52 c	55 c	67 c	11 d
(2) Grosses racines + souches	152	35	54			
(3) Litière au sol	157	55	111	42	21	nég.*
(4) Herbe	29 b	2 c	25 b	38 a	32 ab	exp.*
(5) Biomasse ligneuse aérienne	203 a	78 c	104 b			
(6) Feuilles des arbres	-	19	47			
Phytomasse souterraine (1+ 2)	342	165	106	55	67	11
Phytomasse aérienne (3 + 4 + 5 + 6)	389	154	287	80	53	
Phytomasse totale (1+ 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	**731**	**319**	**393**	**135**	**120**	**36**
(7) Sol (0-40 cm)	1920 a	hd *	1630 b	1730 b	1710 b	1560 b
Azote total de l'agrosystème (1+2+3+4+5+6+7)	**2650**		**2020**	**1860**	**1830**	**1600**
Azote souterrain (1 + 2 + 7)	2260		1740	1780	1780	1570
N/C de la phytomasse totale (*100)	2,02	1,33	1,02	1,40		

* hd : hors dispositif ; nég. : négligeable ; exp. : exporté

32. Le stockage de l'azote

Le faible stock d'azote total des parcelles en culture continue (tableau 54) est à rattacher à la forte minéralisation observée sous culture (90 kg de N/ha/an) occasionnant des pertes importantes. Elles correspondent à l'exportation par la culture ainsi qu'à la forte lixiviation mise en évidence au chapitre IV mais aussi peut-être à l'érosion et à la volatilisation qui n'ont pas été mesurées.

La fixation d'azote atmosphérique par l'*Acacia* a été calculée en faisant la différence entre les stocks des écosystèmes *Acacia* et *Eucalyptus*. Le résultat montre que 630 kg de N/ha ont été fixés au cours des 7 années de vie du peuplement soit environ 90 kg de N/ha/an.

Dans la plantation d'*Eucalyptus*, on observe une plus forte accumulation de N de 160 kg/ha que dans la jachère herbacée. Si on retire à cette valeur la quantité d'azote apportée aux plants et aux cultures au début de la plantation et ayant pu profiter aux arbres soit 50 kg/ha, la différence n'est plus que de 110 kg de N/ha, voisine de celle mentionnée par BERNHARD-

REVERSAT (1996a) au Congo. L'origine de cette accumulation peut être due à une absorption d'azote du sol minéralisée à une profondeur plus grande que 40 cm, mais aussi à la rétention de l'azote apporté par les pluies et à la fixation non symbiotique.

Si, chez l'*Acacia* et le *Cassia*, la moitié de l'azote de la phytomasse se trouve sous terre, chez l'*Eucalyptus*, les trois quarts sont contenus dans les parties aériennes et la litière au sol et seront perdus en grande partie lors de l'exploitation du peuplement et du brûlis au moment de la remise en culture. Néanmoins, l'azote souterrain (phytomasse racinaire + N total de l'horizon 0-40 cm) de l'*Eucalyptus* reste voisin de celui de la jachère herbacée en raison des processus évoqués ci-dessus.

33. Les flux annuels d'azote

Les bilans moyens figurant sur le tableau 55 montrent les flux les plus importants chez l'*Acacia* où la part du recyclage externe est prépondérante. Chez l'*Eucalyptus* et le *Cassia*, le cycle biochimique interne est le plus important. Pour toutes les espèces ligneuses, la litière d'arbre est le plus grand vecteur du recyclage externe.

Grâce à la fixation d'azote, le bilan au niveau du sol est positif pour l'*Acacia*. Par contre, chez le *Cassia* et l'*Eucalyptus*, le bilan est négatif dans la mesure où l'immobilisation dans la phytomasse pérenne n'est pas compensée par les apports extérieurs dus à la pluie ou à la fixation non symbiotique, trop faible si elle existe. L'année 1995 ne montre pas d'évolution des flux pour l'*Eucalyptus* et le bilan au niveau du sol reste négatif. En revanche, on observe une forte diminution de l'accumulation dans la phytomasse chez le *Cassia* et dans une moindre mesure chez l'*Acacia*. Pour ces deux espèces la part du recyclage externe augmente. La réduction des restitutions de litière chez le *Cassia* augmente encore la diminution des flux. Il s'en suit un bilan positif pour le sol sous *Cassia* dans la mesure ou l'immobilisation dans la phytomasse pérenne est compensée par les apports atmosphériques. Cette situation suggère une amélioration du statut azoté du sol en surface.

La minéralisation de l'azote mesurée en 1995 est bien corrélée avec le prélèvement par les plantes ($r = 0,98$; $P = 0,02$). Ce résultat est en accord avec ADAMS et al. (1989) selon lesquels les restitutions de N dans la litière de peuplements d'*Eucalyptus* d'âges variés sont bien corrélées

Tableau 55 : Flux annuels d'azote dans les jachères de Ngong (kg/ha/an) et importance relative des flux par rapport aux besoins (%).

		Bilans moyens (1989-1995)				Année 1995			
		Acacia	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP
(1) Cycle biochimique interne	Litière de feuilles	24 10%	43 33%	40 31%		22 11%	39 45%	43 31%	
	Herbe	0 0%	1 1%	12 9%	18 38%	0 0%	1 1%	14 10%	21 40%
	Total	**24 10%**	**44 34%**	**51 40%**	**18 38%**	**22 11%**	**40 47%**	**57 41%**	**21 40%**
(2) Restitutions au sol	$_1$ Litière d'arbre	90 39%	39 30%	27 21%		84 42%	36 41%	28 20%	
	$_2$ Litière herbacée	23 10%	6 4%	12 9%	18 38%	32 16%	1 1%	14 10%	21 41%
	$_3$ Pluviolessivage : N minéral	-1 -1%	-0 0%	1 1%		-1 -1%	0 0%	1 1%	
	$_4$ Pluviolessivage : N organique	16 7%	1 0%	6 5%		16 8%	1 1%	6 5%	
	Total	**128 56%**	**44 35%**	**47 36%**	**18 38%**	**132 66%**	**37 43%**	**50 36%**	**21 41%**
(3) Accumulation dans la phytomasse	Phytomasse racinaire	49 21%	27 21%	15 12%	11 24%	28 14%	6 7%	16 11%	10 19%
	Phytomasse ligneuse aérienne	29 13%	13 10%	15 12%		17 9%	3 4%	16 11%	
	Total	**78 34%**	**40 31%**	**30 23%**	**11 24%**	**45 23%**	**9 10%**	**31 23%**	**10 19%**
Besoins annuels (1 + 2 + 3)		230 100%	129 100%	128 100%	46 100%	199 100%	87 100%	138 100%	53 100%
Prélèvement annuel (2 + 3) α		**206**	**85**	**77**	**29**	**172**	**38**	**74**	**31**
(4) Minéralisation de l'azote du sol en 1995						166	25	40	26
(5) Apports par la pluie	$_1$ N minéral	4	4	4	4	4	4	4	4
	$_2$ N organique	6	6	6	6	6	6	6	6
N minéral disponible ($4 + 5_1 + 2_3$)						168	28	45	29
(6) Fixation symbiotique		90				(<90)			
(7) Libération de la litière vers le sol		95 δ	32	6	10	95 δ	32	5	7
Apports totaux au sol ($7 + 2_3 + 2_4 + 5$) χ		120	42	24	20	120	42	23	17
Bilan de N du sol : ($7 + 2_3 + 2_4 + 5$) - ($2 + 3 - 6$) χ		**(+4)**	**-43**	**-53**	**(-8)**	**(<39)**	**+4**	**-51**	**(-14)**
(8) Stock du sol en 1995 (0-40 cm) N total		1920	hd *	1630	1730	1920	hd *	1630	1730

α En 1995, le prélèvement ne concerne pas la litière de bois et écorces considérée comme une accumulation ancienne ;
χ Bilan réel s'appuyant sur la décomposition de la litière;
δ Quantité approximative libérée par la litière légèrement inférieure à l'apport ;
* hd : hors dispositif.

avec la minéralisation de l'azote.

Néanmoins, l'azote minéral disponible pour les plantes tel qu'il a été mesuré se montre inférieur au prélèvement annuel. Deux hypothèses peuvent expliquer cette situation : premièrement l'existence d'azote organique dans la pluie et le pluviolessivage pouvant être facilement minéralisé, deuxièmement la sous-estimation de la minéralisation de l'azote du sol. Cette sous-estimation pourrait être due à la durée d'incubation de 4 semaines trop longue selon ADAMS et al. (1989) et à la production non mesurée d'azote minéral à une profondeur inférieure à 20 cm. Enfin, dans le cas de l'*Acacia*, une partie des besoins a pu être couverte par la fixation symbiotique d'azote.

L'*Eucalyptus* montre, au cours de l'expérimentation, un fort prélèvement de l'azote du sol (bilan négatif élevé) correspondant à une forte accumulation dans la biomasse ligneuse et la litière au sol (tableau 54). Par rapport à la jachère herbacée, cette situation est due à la plus forte minéralisation de N sous *Eucalyptus* assurant les besoins de croissance ligneuse et au très faible niveau de libération d'azote par la litière (tableau 55). BERNHARD-REVERSAT (1996a) observe sous *Eucalyptus* hydrique au Congo une baisse significative du stock d'azote total du sol par rapport à la strate herbacée environnante. Dans notre situation climatique, si les flux d'azote correspondant au prélèvement par l'arbre sont aussi élevés qu'au Congo malgré une plus faible production de biomasse, les réserves d'azote total du sol ne montrent pas de baisse significative par rapport à la jachère herbacée, néanmoins la tendance observée est la même qu'au Congo. Enfin, le précédent auteur note, par rapport à la végétation naturelle herbacée, une augmentation du stock d'azote du sol dans les plantations de 15 ans. Il semble alors qu'il existe un temps de latence relativement long dans l'incorporation de la litière à la MO du sol.

Le *Cassia* et l'*Eucalyptus* présentent une dynamique de l'azote propre aux espèces non fixatrices. Au cours des premières années de croissance, la plantation retient la plus grande partie de l'azote disponible dans le sol, ensuite le renouvellement de cet azote se fait essentiellement par le recyclage lié à la décomposition de la litière de feuilles et de bois et aussi par les apports par la pluie et la fixation non symbiotique (POLGLASE et ATTIWILL, 1992). Ces mécanismes conservateurs de l'azote dans l'écosystème n'interviennent pas dans les mêmes délais chez les deux espèces. Le *Cassia* présente une masse de racines fines plus développée que l'*Eucalyptus* correspondant à la fois à une grande aptitude à prélever l'azote du sol et à le stocker (tableau 55) (GARRITY et MERCADO, 1994) et à une moindre efficience d'utilisation de cet élément. Le

peuplement de *Cassia* développe assez tôt une dynamique de conservation de l'azote du sol par une minéralisation limitée et un transfert de l'azote de la litière vers le sol. Le stock de litière au sol ne varie plus à partir de la 4ème année, alors que sous *Eucalyptus*, l'accumulation se poursuit en 7ème année de vie du peuplement. Ainsi, le *Cassia* arrive plus rapidement à maturité, rendant son alimentation en azote dépendante du recyclage par la litière et des apports par la pluie. Le phénomène de recyclage externe, correspondant à l'incorporation de la litière à la MOS (chapitre III), permet un maintien du statut azoté des horizons de surface du sol. Cet effet bénéfique progressif est cependant limité par la faiblesse des flux d'azote, elle même compensée par le cycle biochimique interne couvrant une grande partie des besoins de la plante.

Le faible taux de minéralisation de l'azote du sol sous *Cassia* dès l'âge de 4 ans, entraîne une diminution de production et des dépérissements d'individus par défaut de nutrition azotée. Ces mortalités occasionnent des trouées dans le peuplement dont le couvert se referme progressivement. Ces éclaircies naturelles favorisent probablement la minéralisation de l'azote et selon LODGE et al. (1994) ces apports épisodiques et importants de N minéral joueraient un rôle essentiel dans la pérennité et la production des écosystèmes.

SCHROTH et al. (1995) trouvent également que les Caesalpinacées, comparées à d'autres espèces ligneuses, présentent un système racinaire au moins aussi important que les espèces fixatrices d'azote et montrent des niveaux de minéralisation de l'azote parmi les plus faibles de toutes les espèces étudiées.

En limitant la minéralisation de l'azote du sol, la jachère herbacée favorise sa conservation dans l'écosystème. Le bilan négatif au niveau du sol présenté au tableau 55 correspond à la forte immobilisation de N dans la litière. Ce bilan mérite d'être nuancé car il ne tient pas compte du renouvellement racinaire, rendant les savanes à graminées relativement indépendantes de la MO du sol pour leur alimentation en azote (ABBADIE et al. 1992, 1996). Enfin, la fixation non symbiotique d'azote atmosphérique (de l'ordre de 12 kg/ha/an à Lamto d'après BALANDREAU, 1976) n'a pas été mesurée et pourrait compenser ce bilan négatif . De plus, ce bilan ne correspond pas aux phénomènes observés au chapitre III, à savoir le maintien du taux d'azote du sol au cours de la période de jachère et l'apport d'azote au sol par l'incorporation superficielle de la litière à la MOS.

Chez l'*Acacia*, la fixation d'azote atmosphérique et son recyclage augmentent son stockage dans les différents compartiments de l'écosystème, en particulier le sol par

l'intermédiaire de la litière. L'important recyclage externe de l'azote est permis par la grande quantité d'azote apportée par la litière, par la forte minéralisation de la MO (litière + MOS) et par le développement considérable en surface du système racinaire absorbant l'azote minéralisé. SCHROTH et al. (1995) montrent que chez les espèces fixatrices d'azote, la minéralisation de l'azote du sol est corrélée positivement avec la phytomasse racinaire. Cela les conduit à distinguer les espèces fixatrices "mobilisatrices" d'azote à fort développement racinaire (*Leucaena* spp.) des espèces fixatrices "accumulatrices" (*Albizzia* spp.). Par rapport à ces dernières, les espèces "mobilisatrices" favorisent une moindre accumulation d'azote dans la MOS et une plus forte accumulation dans la phytomasse racinaire. Elles fournissent également une MO plus facilement minéralisable. L'*A. polyacantha*, favorisant une forte minéralisation de l'azote du sol (17% de N total) peut être classé parmi les espèces "mobilisatrices".

Les flux moyens calculés sur plusieurs années suggèrent que la fixation symbiotique couvre 44% du prélèvement moyen annuel de la végétation. BERNHARD-REVERSAT (1996a) donne un taux d'environ 50% pour les *A. mangium* et *auriculiformis* au Congo. A part une faible valeur pour *Sesbania sesban*, DANSO et al. (1993) indiquent pour les arbres fixateurs une contribution de la fixation au prélèvement variant de 35% à 76% avec une moyenne de 55%.

Les propriétés particulières de la litière d'*Acacia* : sa finesse, sa richesse en azote et sa faible teneur en polyphénols solubles, favorisent d'une part sa forte minéralisation et d'autre part son incorporation rapide à la MOS par fragmentation et humification (BERNHARD-REVERSAT, 1987a). L'amélioration du statut azoté du sol augmente la production d'azote minéral assurant en grande partie la couverture des besoins de la plante, ce qui entraînerait progressivement une réduction de la fixation atmosphérique, conformément aux valeurs de Ndfa présentées au chapitre IV. Si tel est le cas, la fixation de N en 1995 serait inférieure à 90 kg/ha et les bilans d'azote du sol présentés sur le tableau 55 pour cette année seraient surestimés. Le ralentissement de la fixation correspond à une plus grande absorption des nitrates du sol produits par la minéralisation de la MO. Ce phénomène permet de limiter la lixiviation. Même si on a pu observer une lixiviation de nitrates et de cations associés plus importante que dans les autres jachères (chapitre IV), l'*Acacia* présente une stratégie d'enrichissement et de conservation de l'azote du sol liée aux processus de fixation atmosphérique et de recyclage, ce dernier processus exerçant un contrôle sur le premier. Ces caractéristiques propres aux espèces fixatrices d'azote, ont déjà été évoquées par DOMMERGUES (1995).

4. LES CYCLES DES ELEMENTS P, K, Ca ET Mg

41. Les flux annuels

D'une manière générale, les flux d'azote sont corrélés significativement avec les flux des autres éléments minéraux présentés sur le tableau 56 ($r > 0,97$ pour P et Ca ; $r > 0,85$ pour Mg et $0,8 < r < 0,9$ pour K).

Si pour l'azote, l'*Eucalyptus* présente le prélèvement moyen annuel le plus faible de toutes les espèces ligneuses étudiées en liaison avec une meilleure efficience d'utilisation de cet élément, pour les autres éléments minéraux, le *Cassia* présente les plus faibles prélèvements en rapport avec sa plus faible production de biomasse.

Les prélèvements moyens annuels de P sont les plus élevés et équivalents chez l'*Acacia* et l'*Eucalyptus*. Au chapitre IV, l'étude des teneurs en nutriments de l'herbe et de la litière d'arbres, en particulier le rapport P/N, suggérait que le phosphore était l'élément limitant du développement des espèces *Acacia* et *Eucalyptus*. Leurs niveaux de prélèvement de P, élevés et comparables, correspondant peut-être à un équilibre avec les potentialités du milieu, confortent cette hypothèse. Par contre, le plus faible prélèvement du *Cassia*, correspondant à des exigences plus modestes confirme que l'azote serait l'élément limitant du développement de cet arbre.

Pour tous les éléments minéraux, la part du recyclage externe dans les flux est généralement prépondérante. Le cas du P chez le *Cassia* en 1995, dont le cycle biochimique interne est le plus important, constitue une exception. Pour toutes les espèces ligneuses, la litière d'arbre est le principal vecteur du recyclage externe du Ca et du Mg. Il en est de même pour le P chez l'*Acacia* et le *Cassia* et pour le K chez le *Cassia*. Par contre la strate herbacée joue un rôle prépondérant dans le recyclage du P sous *Eucalyptus* et du K sous *Eucalyptus* et *Acacia*. Le pluviolessivage contribue faiblement au recyclage des éléments P, Ca et Mg. Le pluviolessivage du K représente 25 à 70% des apports par la litière d'arbre selon l'espèce en 1994. L'application des données de 1994 aux années 1993 et 1995 fait varier quelque peu ces proportions sans changer toutefois la tendance générale.

Les flux moyens annuels de chaque élément indiquent des bilans négatifs au niveau du sol liés au prélèvement et à l'immobilisation dans la phytomasse. Ces bilans se classent dans l'ordre

Tableau 56 : Flux annuels de phosphore dans les jachères de Ngong (kg/ha/an) et importance relative des flux par rapport aux besoins (%).

		Bilans moyens (1989-1995)				Année 1995			
		Acacia	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP
(1) Cycle biochimique interne	Litière de feuilles	2,3 18%	2,8 29%	2,0 15%		2,1 19%	3,3 47%	2,2 16%	
	Herbe	0,0 0%	0,2 2%	0,9 7%	2,8 30%	0,0 0%	0,1 1%	0,9 7%	2,8 31%
	Total	**2,3 18%**	**3,0 31%**	**3,0 22%**	**2,8 30%**	**2,1 19%**	**3,4 48%**	**3,1 23%**	**2,8 31%**
(2) Restitutions au sol	$_1$ Litière d'arbre	4,1 31%	2,4 25%	1,4 11%		3,5 32%	2,5 35%	1,4 11%	
	$_2$ Litière herbacée	2,5 19%	0,7 7%	5,3 40%	5,6 62%	2,8 25%	0,2 2%	5,2 39%	5,8 62%
	$_3$ Pluviolessivage	0,2 1%	0,3 3%	0,3 2%		0,2 2%	0,3 4%	0,3 2%	
	Total	**6,8 52%**	**3,3 35%**	**7,1 53%**	**5,6 62%**	**6,5 59%**	**2,9 41%**	**7,0 52%**	**5,8 62%**
(3) Accumulation dans la phytomasse	Phytomasse racinaire	2,3 17%	2,0 21%	1,0 7%	0,7 8%	1,3 12%	0,5 7%	1,0 7%	0,7 8%
	Phytomasse ligneuse aérienne	1,8 13%	1,3 14%	2,3 17%		1,0 9%	0,3 4%	2,4 18%	
	Total	**4,0 31%**	**3,3 35%**	**3,2 24%**	**0,7 8%**	**2,3 21%**	**0,8 11%**	**3,4 25%**	**0,7 8%**
Besoins annuels (1 + 2 + 3)		13,1 100%	9,6 100%	13,3 100%	9,1 100%	10,9 100%	7,0 100%	13,5 100%	9,3 100%
Prélèvement annuel (2 + 3)		**10,8**	**6,7**	**10,3**	**6,3**	**8,8**	**3,7**	**10,4**	**6,5**
(4) Apports par la pluie		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
(5) Libération de la litière vers le sol		5,5 δ	2,2	4,8	4,7	5,5 δ	2,2	4,1	4,8
Apports totaux au sol (5 + 2_3 + 4) χ		5,8	2,6	5,3	4,8	5,8	2,6	4,6	5,0
Bilan de phosphore du sol : (5 + 2_3 + 4) - (2 + 3) χ		**-5**	**-4,1**	**-5,0**	**-1,5**	**-3**	**-1,3**	**-5,8**	**-1,5**
(6) Stock du sol en 1995 (0-40 cm) P assimilable		**42**		**34**	**36**	**42**		**34**	**36**

χ Bilan réel s'appuyant sur la décomposition de la litière ;
δ Quantité approximative libérée par la litière inférieure à l'apport.

Suite du tableau 56 : Flux annuels de potassium dans les jachères de Ngong (kg/ha/an) et importance relative des flux par rapport aux besoins (%).

		Bilans moyens (1989-1995)								Année 1995							
		Acacia		*Cassia*		*Eucalyptus*		JHP		*Acacia*		*Cassia*		*Eucalyptus*		JHP	
(1) Cycle biochimique interne	Litière de feuilles	4	3%	8	8%	10	9%			3	3%	7	14%	11	9%		
	Herbe	0	0%	1	1%	2	2%	17	24%	0	0%	1	2%	3	2%	20	24%
	Total	**4**	**3%**	**9**	**10%**	**13**	**11%**	**17**	**24%**	**3**	**3%**	**8**	**16%**	**14**	**12%**	**20**	**24%**
(2) Restitutions au sol	$_1$ Litière d'arbre	27	21%	24	27%	27	24%			22	17%	22	46%	26	22%		
	$_2$ Litière herbacée	51	38%	17	19%	46	41%	52	72%	62	50%	3	6%	50	43%	59	73%
	$_3$ Pluviolessivage	19	14%	7	8%	7	6%			19	15%	7	15%	7	6%		
	Total	**97**	**73%**	**49**	**53%**	**80**	**71%**	**52**	**72%**	**103**	**83%**	**32**	**67%**	**83**	**71%**	**59**	**73%**
(3) Accumulation dans la phytomasse	Phytomasse racinaire	15	11%	17	19%	7	6%	2	3%	9	7%	4	8%	7	6%	2	3%
	Phytomasse ligneuse aérienne	17	13%	17	19%	13	12%			10	8%	4	8%	13	11%		
	Total	**31**	**24%**	**34**	**37%**	**20**	**18%**	**2**	**3%**	**18**	**15%**	**8**	**17%**	**21**	**17%**	**2**	**3%**
Besoins annuels (1 + 2 + 3)		133	100%	91	100%	112	100%	72	100%	125	100%	48	100%	117	100%	81	100%
Prélèvement annuel (2 + 3)		**129**		**82**		**100**		**55**		**121**		**40**		**104**		**61**	
(4) Apports par la pluie		9		9		9		9		9		9		9		9	
(5) Libération de la litière vers le sol		70	δ	42		64		45		74	δ	25		62		45	
Apports totaux au sol (5 + 2_3 + 4) χ		97		58		79		54		101		41		78		54	
Bilan de potassium du sol : (5 + 2_3 + 4) - (2 + 3) χ		**-31**		**-24**		**-20**		**-1**		**-20**		**1**		**-26**		**-7**	
(6) Stock du sol en 1995 (0-40 cm) K échangeable		**180**				**150**		**160**		**180**				**150**		**160**	

χ Bilan s'appuyant sur la décomposition de la litière ;
δ Quantité approximative libérée par la litière inférieure à l'apport.

Suite du tableau 56 : Flux annuels de calcium dans les jachères de Ngong (kg/ha/an) et importance relative des flux par rapport aux besoins (%).

		Bilans moyens (1989-1995)				Année 1995			
		Acacia	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP
(2) Restitutions au sol	$_1$ Litière d'arbre	68 47%	79 56%	116 56%		57 53%	79 82%	125 56%	
	$_2$ Litière herbacée	7 5%	4 3%	13 6%	26 81%	8 7%	1 1%	15 7%	23 80%
	$_3$ Pluviolessivage	6 4%	3 2%	0 0%		6 5%	3 4%	0 0%	
	Total	**81 56%**	**86 62%**	**130 62%**	**26 81%**	**71 65%**	**83 87%**	**141 63%**	**23 80%**
(3) Accumulation dans la phytomasse	Phytomasse racinaire	29 20%	30 21%	37 17%	6 19%	17 16%	7 7%	38 17%	6 20%
	Phytomasse ligneuse aérienne	35 24%	24 17%	43 20%		21 19%	6 6%	44 20%	
	Total	**65 44%**	**53 38%**	**79 38%**	**6 19%**	**38 35%**	**13 13%**	**82 37%**	**6 20%**
Prélèvement annuel (2 + 3)		**145 100%**	**140 100%**	**209 100%**	**31 100%**	**108 100%**	**96 100%**	**223 100%**	**29 100%**
(4) Apports par la pluie		6	6	6	6	6	6	6	6
(5) Libération de la litière vers le sol		65 δ	75	39	18	65 δ	75	19	13
Apports totaux au sol ($5 + 2_3 + 4$) χ		76	84	45	23	76	84	25	19
Bilan de calcium du sol : ($5 + 2_3 + 4$) - (2 + 3) χ		**-69**	**-56**	**-164**	**-8**	**-32**	**-12**	**-198**	**-10**
(6) Stock du sol en 1995 (0-40 cm) Ca échangeable		**1130**		**920**	**1080**	**1130**		**920**	**1080**

χ Bilan s'appuyant sur la décomposition de la litière ;
δ Quantité approximative libérée par la litière inférieure à l'apport.

Suite du tableau 56 : Flux annuels de magnésium dans les jachères de Ngong (kg/ha/an) et importance relative des flux par rapport aux besoins (%).

		Bilans moyens (1989-1995)								Année 1995							
		Acacia		*Cassia*		*Eucalyptus*		JHP		*Acacia*		*Cassia*		*Eucalyptus*		JHP	
(1) Cycle biochimique interne	Litière de feuilles	0,5	2%	2,1	14%	1,6	8%			0,4	2%	1,7	20%	1,8	8%		
	Herbe	0,0	0%	0,0	0%	0,1	1%	0,2	2%	0,0	0%	0,0	0%	0,1	1%	0,2	2%
	Total	**0,5**	**2%**	**2,1**	**14%**	**1,8**	**8%**	**0,2**	**2%**	**0,4**	**2%**	**1,7**	**20%**	**1,9**	**9%**	**0,2**	**2%**
(2) Restitutions au sol	$_1$ Litière d'arbre	13,1	43%	5,7	39%	8,0	38%			11,0	43%	4,9	56%	8,1	36%		
	$_2$ Litière herbacée	4,4	14%	2,1	14%	6,2	30%	11,5	92%	5,4	21%	0,5	6%	7,1	32%	11,6	92%
	$_3$ Pluviolessivage	2,7	9%	0,6	4%	0,7	3%			2,7	11%	0,6	7%	0,7	3%		
	Total	**20,2**	**66%**	**8,4**	**57%**	**14,9**	**71%**	**11,5**	**92%**	**19,1**	**75%**	**6,0**	**69%**	**15,9**	**71%**	**11,6**	**92%**
(3) Accumulation dans la phytomasse	Phytomasse racinaire	5	15%	3	18%	2	8%	1	7%	3	10%	1	7%	2	8%	1	6%
	Phytomasse ligneuse aérienne	6	18%	2	10%	3	12%			3	13%	0	4%	3	12%		
	Total	**10**	**33%**	**4**	**28%**	**4**	**21%**	**1**	**7%**	**6**	**23%**	**1**	**11%**	**4**	**20%**	**1**	**6%**
Besoins annuels (1 + 2 + 3)		31	100%	15	100%	21	100%	13	100%	25	100%	9	100%	22	100%	13	100%
Prélèvement annuel (2 + 3)		**30**		**13**		**19**		**12**		**25**		**7**		**20**		**12**	
(4) Apports par la pluie		1,1		1,1		1,1		1,1		1,1		1,1		1,1		1,1	
(5) Libération de la litière vers le sol		15	δ	6		8		9		15	δ	6		5		8	
Apports totaux au sol (5 + 2_3 + 4) χ		19		8		10		10		19		8		7		9	
Bilan de magnésium du sol : (5 + 2_3 + 4) - (2 + 3) χ		**-12**		**-5**		**-10**		**-2**		**-6**		**1**		**-14**		**-3**	
(6) Stock du sol en 1995 (0-40 cm) Mg échangeable		**190**				**160**		**160**		**190**				**160**		**160**	

χ Bilan s'appuyant sur la décomposition de la litière ;
δ Quantité approximative libérée par la litière inférieure à l'apport.

décroissant suivant : JHP > CAS > ACP > EUC. Cependant, ces bilans sont à relativiser car, hormis le cas de l'*Eucalyptus*, ils ne correspondent pas à une dépréciation significative des caractéristiques minérales du sol en particulier de la somme des cations et de la CEC. Au contraire, il existe une augmentation significative du taux de Mg échangeable sous *Acacia* et jachère herbacée durant la phase de jachère (chapitre III).

Les bilans tels qu'ils sont calculés à partir des besoins de la plante ne prennent pas en compte des transferts importants comme le prélèvement en profondeur et l'altération des minéraux primaires. Ces processus peuvent limiter fortement la contribution des réserves des horizons supérieurs du sol à la nutrition des plantes et ainsi le recyclage externe des éléments minéraux peut maintenir ou même améliorer les caractéristiques minérales des sols sous les peuplements. Ces restitutions de nutriments à la surface du sol sont les plus importantes sous *Acacia* en particulier pour P, K et Mg.

En rapport avec l'évolution des flux d'azote, on observe en 1995 une forte diminution de l'immobilisation des éléments minéraux chez le *Cassia* et dans une moindre mesure chez l'*Acacia*. Chez ces deux espèces la part du recyclage externe augmente. La libération importante des éléments par la litière réduit la contribution des réserves du sol au prélèvement. Sous *Cassia*, les bilans voisins de zéro pour P, K et Mg montrent que les apports par la pluie et la décomposition des litières compensent le prélèvement. Ils suggèrent une phase d'amélioration des caractéristiques minérales des horizons supérieurs du sol.

Chez l'*Eucalyptus*, l'année 1995 ne montre pas d'évolution des flux d'éléments minéraux, le prélèvement annuel se maintient et les faibles taux de libération des éléments par la litière limitent le retour au sol de Ca, Mg et K. Par rapport aux autres jachères, la plus forte contribution des réserves du sol au prélèvement résulte en une tendance à la baisse des stocks d'éléments minéraux échangeables en particulier de Ca et Mg. Ce phénomène se traduit par de plus faibles taux de saturation des horizons 10-20 cm et 20-30 cm et par une baisse significative de la CEC de l'horizon 0-20 cm au cours de la période 91-95.

42. Les stocks en 1995

Les stocks d'éléments minéraux des agrosystèmes de Ngong figurent sur le tableau 57. Les plus faibles stocks de Ca et Mg échangeables du sol sous culture continue s'expliquent par leur lessivage associé à celui des nitrates (chapitre IV). Le plus fort stock de P assimilable dans

Tableau 57 : Stockage des éléments minéraux dans les différents agrosystèmes de Ngong en décembre 1995 (kg/ha). Pour une même variable, les valeurs indexées d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil d'erreur de 5%.

Phosphore						
Compartiment	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	JHD	Culture
(1) Racines fines (Ø < 2 mm)	7,0 a	7,1 a	3,2 b	3,5 b	4,1 b	nd *
(2) Grosses racines + souches	8,8	4,9	3,5			
(3) Litière au sol	5,9	3,1	7,0	3,5	1,5	nég *
(4) Herbe	2,5 d	0,2 e	5,5 b	7,7 a	4,1 c	exp. *
(5) Biomasse ligneuse aérienne	12,3 b	8,0 c	16,0 a			
(6) Feuilles des arbres		1,2	2,9			
Phytomasse souterraine (1+ 2)	15,8	12,0	6,7	3,5	4,1	
Phytomasse aérienne (3 + 4 + 5 + 6)	20,7	12,5	31,4	11,2	5,6	
Phytomasse totale (1+ 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	36,5	24,5	38,1	14,7	9,7	
(7) Sol (0-40 cm) P assimilable	42 b	hd *	34 b	36 b		70 a
(8) Sol (0-40 cm) P total	510	hd *	470	460		530
Phosphore total de l'agrosystème (1+2+3+4+5+6+8)	547		508	475		530
Exportation du bois de diamètre > 3 cm	7,7 b	4,3 c	13,6 a			
Exportation du bois selon le système paysan	4,9	6,2	15,0			
Restitution des résidus (exploitation à découpe 3 cm)	13,3	8,7	17,4	11,0	6,0	
Restitution des résidus (exploitation paysanne)	16,1	6,8	16,0	11,0	6,0	
Potassium						
Compartiment	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	JHD	Culture
(1) Racines fines (Ø < 2 mm)	31 b	54 a	23 c	12 d	25 c	nd *
(2) Grosses racines + souches	71	47	24			
(3) Litière au sol	27	17	37	16	8	nég. *
(4) Herbe	56 ab	4 c	47 b	70 a	58 ab	exp. *
(5) Biomasse ligneuse aérienne	118 a	101 a	91 a			
(6) Feuilles des arbres		11	46			
Phytomasse souterraine (1+ 2)	102	101	47	12	25	
Phytomasse aérienne (3 + 4 + 5 + 6)	201	133	221	86	66	
Phytomasse totale (1+ 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	303	234	268	98	91	
(7) Sol (0-40 cm) K échangeable	180 a	hd *	150 ab	160 ab		130 b
(8) Sol (0-40 cm) K total	8680 a	hd *	8590 a	7860 b		8250 ab
Potassium total de l'agrosystème (1+2+3+4+5+6+8)	8980		8860	7960		8250
Exportation du bois de diamètre > 3 cm	80 a	65 a	71 a			
Exportation du bois selon le système paysan	53	91	81			
Restitution des résidus (exploitation à découpe 3 cm)	121	68	150	86	66	
Restitution des résidus (exploitation paysanne)	148	42	140			

* hd : hors dispositif ; nd : non déterminé ; nég. : négligeable ; exp. : exporté

Suite du tableau 57

Calcium						
Compartiment	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	JHD	Culture
(1) Racines fines (Ø < 2 mm)	115 a	127 a	89 b	29 d	54 c	nd *
(2) Grosses racines + souches	91	52	167			
(3) Litière au sol	132	117	333	43	33	nég. *
(4) Herbe	7 cd	1 d	14 bc	21 b	46 a	exp. *
(5) Biomasse ligneuse aérienne	246 a	142 b	298 a			
(6) Feuilles des arbres		16	47			
Phytomasse souterraine (1+ 2)	206	179	256	29	54	
Phytomasse aérienne (3 + 4 + 5 + 6)	385	276	692	64	79	
Phytomasse totale (1+ 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	591	455	948	93	133	
(7) Sol (0-40 cm) Ca échangeable	1130 a	hd *	920 a	1080 a		810 a
(8) Sol (0-40 cm) Ca total	2160 a	hd *	1630 b	1760 b		1630 b
Calcium total de l'agrosystème (1+2+3+4+5+6+8)	2750		2580	1860		1630
Exportation du bois de diamètre > 3 cm	152 b	85 c	238 a			
Exportation du bois selon le système paysan	96	122	273			
Restitution des résidus (exploitation à découpe 3 cm)	233	191	454	64	79	
Restitution des résidus (exploitation paysanne)	289	154	419	64	79	

Magnésium						
Compartiment	*Acacia*	*Cassia*	*Eucalyptus*	JHP	JHD	Culture
(1) Racines fines (Ø < 2 mm)	16 a	13 b	7 c	4 d	8 c	nd *
(2) Grosses racines + souches	16	3	5			
(3) Litière au sol	22	6	21	9	5	nég. *
(4) Herbe	5 b	0 c	7 b	11 a	12 a	exp. *
(5) Biomasse ligneuse aérienne	39 a	9 c	18 b			
(6) Feuilles des arbres		1	7			
Phytomasse souterraine (1+ 2)	32	16	12	4	8	
Phytomasse aérienne (3 + 4 + 5 + 6)	66	16	53	20	17	
Phytomasse totale (1+ 2 + 3 + 4 + 5 + 6)	98	32	65	24	25	
(7) Sol (0-40 cm) Mg échangeable	190 a	hd *	160 a	160 a		110 b
(8) Sol (0-40 cm) Mg total	1250 a		1040 b	1010 b		990 b
Magnesium total de l'agrosystème (1+2+3+4+5+6+8)	1350		1110	1030		990
Exportation du bois de diamètre > 3 cm	24 a	5 c	14 b			
Exportation du bois selon le système paysan	15	8	16			
Restitution des résidus (exploitation à découpe 3 cm)	42	11	39	20	17	
Restitution des résidus (exploitation paysanne)	51	8	37	20	17	

* hd : hors dispositif ; nd : non déterminé ; nég. : négligeable ; exp. : exporté

ce traitement est dû à l'apport de fumure minérale de 1989 à 1995.

Les minéralomasses des jachères ligneuses correspondent à des proportions assez importantes des réserves édaphiques assimilables ou échangeables (tableau 57). Ainsi, dans le cas des *Acacia* et des *Eucalyptus*, les éléments accumulés dans la phytomasse totale représentent respectivement 100% de P, 170% et 180% de K, 53% et 100% de Ca, 50% et 40% de Mg contenus dans l'horizon 0-40 cm. Si on considère une épaisseur de sol plus grande, limitée à la profondeur de 90 cm largement atteinte par les systèmes racinaires, les immobilisations respectives des éléments dans la phytomasse des jachères à *Acacia* et *Eucalyptus* représentent alors 53% et 61% de P, 90% de K, 16% et 30% de Ca, 12% et 10% de Mg. La plus forte immobilisation de Ca dans la phytomasse de l'*Eucalyptus* correspond à une tendance à la baisse du stock de Ca échangeable du sol.

Les immobilisations dans la phytomasse totale des jachères ligneuses dépassent largement celles des jachères herbacées, de 2 à 3 fois pour P et K et de 5 à 10 fois pour Ca. Cependant elles ne correspondent pas à une baisse significative des stocks d'éléments minéraux échangeables et de P assimilable par rapport à la jachère herbacée. Même si on ne peut pas négliger l'action des plantes, en particulier des arbres sur la rétention des éléments apportés par les pluies et des éléments issus de l'altération des minéraux primaires, on peut penser qu'une partie de la minéralomasse provient de la remontée d'éléments situés à une profondeur plus grande que 40 cm. Cependant, il est difficile de l'évaluer car on ne connaît pas le rythme de passage des éléments en éléments disponibles dont les stocks sont relativement faibles par rapport aux éléments totaux en particulier pour P, K et Mg. D'ailleurs l'accumulation des éléments dans la phytomasse des jachères représente moins de 8% de chacun des stocks des éléments totaux P, K et Mg de l'horizon 0-40 cm. Le Ca fait exception puisque les minéralomasses de l'*Acacia* et de l'*Eucalyptus* représentent respectivement 27% et 60% du Ca total au lieu d'une proportion de 5% dans la jachère herbacée. LE GOASTER et al. (1991) dans les peuplements d'épicéas dans les Vosges et NJOUKAM et al. (1996) dans les plantations d'*Eucalyptus* et de pins dans l'Ouest du Cameroun ont déjà évoqué ce "déséquilibre" du Ca.

La prise en compte des éléments totaux de l'horizon 0-40 cm permet d'établir la quantité totale d'éléments de l'agrosystème limité à la profondeur 40 cm (tableau 57). La comparaison des situations suggère alors un transfert de Ca par les espèces *Acacia* et *Eucalyptus* de la profondeur dans la végétation et les couches supérieures du sol. Par rapport à la jachère herbacée, ce

transfert, effectué au cours de la vie du peuplement, est pour l'*Eucalyptus* de l'ordre de 720 kg/ha. LAUDELOUT (1990) évoque également que la jachère forestière en zone équatoriale immobilise des éléments provenant d'horizons plus profonds du profil que la jachère herbacée.

En accord avec l'ordre de classement des rapports phytomasse racinaire / phytomasse aérienne : *Cassia* > *Acacia* > *Eucalyptus*, la phytomasse racinaire contient 40 à 50% des éléments minéraux du *Cassia*, 1/3 des éléments minéraux de l'*Acacia* et moins de 20% des éléments minéraux de l'*Eucalyptus*. Elle immobilise respectivement sous *Acacia*, *Cassia* et *Eucalyptus* 55%, 50% et 31% de la réserve en K échangeable de l'horizon 0-40 cm. Etant donné la faible rétention du K sous forme échangeable dans ces sols à kaolinite, au moment de la phase de culture la nécromasse racinaire de la jachère constituera une réserve de K disponible pour les plantes cultivées.

La plus forte accumulation d'éléments minéraux dans les racines de la jachère herbacée dégradée par rapport à la jachère herbacée protégée s'explique par l'âge plus faible de cette dernière et par les transferts d'éléments dans sa phytomasse aérienne plus développée.

43. Exploitation des peuplements et restitution des éléments minéraux

Compte tenu des différents mode d'exploitation de la phytomasse envisageables, il parait intéressant de comparer les quantités de bioéléments exportés avec les réserves édaphiques disponibles.

Pour l'exploitation du bois de diamètre supérieur à 3 cm correspondant au mode pratiqué dans nos dispositifs afin de standardiser le protocole, les exportations représentent 18% à 26% de chacun des éléments immobilisés dans la phytomasse totale sauf pour le P chez l'*Eucalyptus* (36%) et le K chez le *Cassia* (28%) (tableau 57). Dans le cas de l'*Acacia* et de l'*Eucalyptus*, les éléments exportés représentent respectivement 6% et 5% de l'azote total, 20% et 40% de P, 44% et 47% de K, 13% et 26% de Ca et 12% et 9% de Mg contenus dans l'horizon 0-40 cm. Si on considère une épaisseur de sol limitée à la profondeur de 90 cm, les exportations pour l'*Acacia* et l'*Eucalyptus* représentent respectivement quelques % de N total, 11% et 22% de P, 23% de K, 4% et 7% de Ca, et 3% et 2% de Mg. Hormis P et K, ces exportations sont par conséquent relativement faibles par rapport aux réserves du sol.

Dans le cadre d'une exploitation paysanne, les exportations sont généralement plus faibles pour l'*Acacia* puisqu'on exploite seulement le bois de diamètre supérieur à 6-7 cm. Elles

représentent alors 13% à 17% de chacun des éléments stockés dans la phytomasse totale. L'exploitation de gomme arabique s'élèvera au plus à 50 kg de MS /ha/an, ce qui correspondra à quelques kg d'éléments minéraux par ha et par an, soit une quantité dérisoire par rapport aux réserves disponibles du sol.

Chez les espèces *Cassia* et *Eucalyptus*, toutes les branches de diamètre supérieur à 1 cm seront évacuées comme bois de feu et les exportations représentent alors 25% à 30% des minéralomasses totales, sauf pour P sous *Eucalyptus* et K sous *Cassia* où la proportion est de 40%. En fait pour l'*Eucalyptus*, ces exportations sont peu différentes de celles du mode d'exploitation précédent.

D'une manière générale, les exportations représentent quelques % des éléments totaux de l'horizon 0-40 cm avec néanmoins 17% du Ca total de l'horizon 0-40 cm pour l'*Eucalyptus*. Cependant cette exportation de Ca est inférieure au transfert effectué par l'arbre depuis les couches plus profondes que 40 cm vers la phytomasse.

Si l'exploitation du bois constitue un coût d'éléments minéraux pour le système sol-plantes de la jachère ligneuse, la restitution de l'autre partie des éléments nutritifs en surface peut représenter un gain pour le système sol-plante cultivée puisque celui-ci est limité à une profondeur de sol plus faible.

Contrairement à l'azote perdu à 90% lors du brûlis (CESAR, 1992), on peut considérer que la majorité des éléments minéraux P, K, Ca et Mg retourne au sol par les cendres. CESAR (1992) donne des taux de restitution de 54% pour le K, 73% pour le Ca et 77% pour le P dans la savane soudanienne de Lamto.

Les plus fortes restitutions d'éléments minéraux sous forme de cendres correspondent également aux plus fortes exportations (tableau 57). Elles sont les plus importantes sous *Eucalyptus* où la part de la litière au sol est prépondérante. Les fortes quantités de Ca et de P restituées en surface (deux fois celle des autres espèces) correspondent à la moitié de la réserve disponible de l'horizon 0-40 cm. Comme on a pu le décrire au chapitre III (figure 31 page 78), les restitutions par les cendres sous *Eucalyptus* permettent de corriger les effets dépressifs de l'arbre sur le complexe absorbant de l'horizon 0-10 cm du sol. Il y a augmentation significative des taux de Ca échangeable, de Mg échangeable, du PH et de la CEC. Les caractéristiques minérales retrouvent alors un niveau comparable à celles des sols des autres précédents "jachères ligneuse" (*Acacia* et *Cassia*) pour lesquels l'effet du brûlis est beaucoup moins marqué et permet surtout une augmentation du P assimilable. Celle-ci est d'ailleurs moins importante qu'après

l'*Eucalyptus*.

Sous jachère herbacée, l'effet positif du brûlis est important pour Mg, il est atténué pour le Ca en raison d'une faible accumulation dans la phytomasse aérienne correspondant à seulement 6% de la réserve échangeable de l'horizon 0-40 cm. Il en résulte un plus faible taux de Ca échangeable et une plus faible somme des bases de l'horizon 0-10 cm que dans les jachères ligneuses après exploitation du bois et brûlis des résidus.

Pour conclure, les transferts d'éléments minéraux en particulier de Ca effectués par les arbres de la profondeur du sol dans leur phytomasse, permettent, lors du brûlis, d'améliorer les caractéristiques minérales de l'horizon de surface du sol par rapport à la jachère herbacée et ceci malgré les exportations de bois. L'effet du brûlis est cependant superficiel est se montre dérisoire en dessous de 20 cm de profondeur (voir chapitre III).

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

Ce travail avait pour objectif principal d'étudier le rôle d'espèces d'arbres à croissance rapide dans le fonctionnement de la jachère et d'expliquer ainsi l'évolution des caractéristiques du sol.

La méthodologie utilisée est l'approche systémique autorisant l'établissement de bilans quantitatifs à l'échelle des agrosystèmes, sur une base saisonnière annuelle et pluri-annuelle. Cette étude a révélé divers problèmes liés à la méthode.

Malgré les précautions prises dans l'échantillonnage pour obtenir une valeur significative des effets moyens et de leur variabilité (échantillons de sols composites, surfaces de prélèvement des biomasses représentatives de l'agrosystème, etc), il existe parfois des incertitudes sur les résultats. Celles-ci sont généralement dues à la variabilité des agrosystèmes et à la limitation, pour des raisons matérielles, du nombre de répétitions des différents traitements et des points de mesure sur ces différents traitements. On peut en déduire le caractère indicatif des bilans quantitatifs des éléments minéraux, qui additionnent les imprécisions de mesures et les approximations sur les paramètres non mesurés.

D'autre part, dans ces agrosystèmes jeunes, à forte dynamique d'évolution, la période et les échelles de temps choisies pour établir les bilans influencent quelque peu les résultats et les conclusions qui en découlent.

Dans le sol, la connaissance des flux d'altération aurait permis d'évaluer plus justement le transfert des éléments des couches profondes du sol dans la phytomasse, mais aucune méthode fiable n'est utilisable pour mesurer ce flux (DALDOUM, 1992).

Néanmoins, cette étude fournit de nombreux résultats sur les processus dont nous donnons ci-dessous la synthèse.

Par rapport à la strate herbacée à andropogonées, la plantation d'arbres associée aux cultures durant une phase d'installation de deux ans, favorise les processus de minéralisation de l'azote du sol. Ce phénomène, déjà évoqué par OHTA (1990) et BERNHARD-REVERSAT (1996a), augmente la production de matière sèche du système. Cette étude montre également

qu'en augmentant l'évapotranspiration réelle, les arbres ralentissent la recharge de la réserve hydrique du sol en profondeur, ce qui réduit le drainage profond. Ce processus a déjà été mentionné par CHARREAU (1972) pour la jachère forestière comparée à la jachère herbacée en zone tropicale humide d'Afrique de l'Ouest. Il permettrait une réduction de la lixiviation et une meilleure rétention des éléments minéraux apportés par la pluie.

Hormis le cas de l'azote chez *A. polyacantha*, la contribution du sol au prélèvement des nutriments par les arbres est supérieure à celle des jachères herbacées. Cependant, elle ne s'accompagne pas d'une baisse des éléments minéraux disponibles dans les couches supérieures du sol, au moins chez *C. siamea* et *A. polyacantha*. Le recyclage externe alimentant les horizons supérieurs, évite cet effet dépressif.

Dans cette étude, les arbres se montrent supérieurs aux herbacées dans le transfert d'éléments minéraux, en particulier de calcium, des couches du sol plus profondes que 40 cm, dans la phytomasse.

Les productions annuelles de biomasse ligneuse et de litière ainsi que les flux d'azote comme l'immobilisation dans le bois, l'apport au sol par la litière et la minéralisation de l'azote du sol chez *A. polyacantha* et *E. camaldulensis*, sont intermédiaires entre ceux du Sahel (BERNHARD-REVERSAT, 1987b) et ceux de zones plus humides comme l'Ouest-Cameroun (NJOUKAM et al., 1996) ou le Congo (BERNHARD-REVERSAT, 1996 ; et al., 1993).

Le pluviolessivage contribue faiblement au recyclage externe du Ca et du Mg. Alors qu'en zone forestière humide, le pluviolessivage est le mode principal du recyclage du K (VITOUSEK et SANFORD, 1986), dans notre situation, comme au Sahel (BERNHARD-REVERSAT, 1987b), il correspond à une proportion plus ou moins importante, selon l'espèce, des apports de K par la litière d'arbre.

L'action de la jachère sur la MO du sol se manifeste par l'augmentation des débris végétaux grossiers peu efficaces dans les propriétés d'échange cationique. L'effet sur le complexe absorbant s'en trouve par conséquent limité, d'autant plus fortement que l'accroissement du taux de MO est superficiel et peu élevé. Cela confirme le rôle majeur joué par les débris végétaux dans la dynamique à court terme et moyen terme de la MO des sols ferrugineux sableux (FELLER, 1995).

Comme l'a mentionné Van BREEMEN (1995) pour d'autres espèces végétales, les espèces ligneuses que nous avons étudiées, influencent chacune différemment le cycle des éléments minéraux et procurent alors des effets favorables ou défavorables sur la fertilité du sol.

CHAPIN (1980) et HOBBIE (1992) ont défini les caractéristiques des espèces ligneuses de milieu pauvre comme étant généralement une bonne efficience d'utilisation des éléments minéraux, une litière pauvre en éléments minéraux s'accompagnant d'une faible vitesse de décomposition, une croissance lente, un fort rapport biomasse racinaire / biomasse aérienne et une faible capacité d'absorption racinaire. Inversement les espèces de sol riche présenteraient en général, une faible efficience d'utilisation des éléments minéraux, une litière riche en éléments minéraux et facilement dégradable, une croissance rapide et un faible rapport biomasse racinaire / biomasse aérienne. Cependant les processus ne sont pas aussi simples.

Ainsi les espèces à feuilles persistantes non fixatrices d'azote, *E. camaldulensis* et *C. siamea* présentent certaines caractéristiques propres aux espèces de milieu pauvre. Le cycle biochimique interne des éléments minéraux, en particulier de N et P couvre une grande partie des besoins de la plante et procure une litière pauvre en ces éléments, limitant le recyclage externe. Ces processus restreignent les possibilités d'amélioration des propriétés chimiques des horizons supérieurs du sol.

Néanmoins, le fonctionnement de ces espèces ne s'accompagne pas forcément d'une bonne efficience d'utilisation des éléments minéraux. Ainsi *C. siamea* présente une faible efficience d'utilisation de N propre au Caesalpinacées (GARRITY et MERCADO, 1994) et *E. camaldulensis* une faible efficience d'utilisation du P dans le jeune âge, confirmant des travaux anciens (CRANE et RAISON, 1980).

Chez *C. siamea*, le fort rapport biomasse racinaire / biomasse aérienne, correspondant vraisemblablement à une faible capacité d'absorption racinaire, est une caractéristique d'espèce de milieu pauvre. *C. siamea* est une espèce exigeante en azote, dont l'immobilisation rapide et importante dans la phytomasse est suivie d'un fort ralentissement du cycle de l'azote, caractérisé par un blocage de minéralisation de l'azote du sol dû vraisemblablement à un effet allélopathique. Ce fonctionnement entraîne une maturité précoce de l'arbre, et à 4 ans, le recyclage externe des éléments minéraux et les apports par la pluie couvrent les besoins de la plante. La litière se décompose assez rapidement, ce qui n'est pas vraiment une caractéristique d'espèce de milieu pauvre et cela permet d'observer une incorporation au sol de débris végétaux comparable à celle de la jachère herbacée. Cette situation suggère alors une amélioration progressive des

caractéristiques chimiques des horizons de surface du sol, cependant, cet effet bénéfique, limité par la faiblesse des flux et la durée de la jachère, ne se montre pas supérieur, à l'âge de 6 ans, à celui de la jachère herbacée protégée. La faible minéralisation de l'azote du sol et le fort développement racinaire des Caesalpinacées a également été évoqué par SCHROTH et al. (1995).

Chez *E. camaldulensis,* la décomposition lente de la litière est une caractéristique d'espèce de milieu pauvre. La litière ne s'incorpore pas au sol de façon visible sous forme de débris végétaux au moins au cours des 6 premières années, et comme a pu le montrer BERNHARD-REVERSAT (1987a), elle présente de nombreux caractères de décomposition lente pour une part sous forme de composés hydrosolubles peu dégradables. Dans notre étude, cela correspond aussi à une plus faible porosité du sol que sous jachère herbacée. La forte croissance aérienne et le faible rapport biomasse racinaire / biomasse aérienne de l'*E. camaldulensis* ne sont pas, selon CHAPIN (1980), des caractéristiques d'une espèce de milieu pauvre. Pourtant, ces deux paramètres associés à une faible biomasse de racines fines, indiquent une forte capacité d'absorption racinaire qui favoriserait l'adaptation de l'espèce aux situations peu fertiles. Il faut ajouter cependant que l'introduction de l'*E. camaldulensis* dans un milieu sensiblement plus riche en P que son milieu d'origine a pu favoriser la croissance de la plante, tout en réduisant l'efficience d'utilisation de cet élément (CHAPIN, 1980).

Enfin, la forte accumulation d'éléments minéraux dans la biomasse d'*E. camaldulensis* est à l'origine d'un effet dépressif sur les caractéristiques minérales du sol, déjà observé par de nombreux auteurs. Dans notre étude, il s'agit d'une désaturation du complexe absorbant et d'une baisse de CEC. Le développement limité du système racinaire en surface caractérise un faible recyclage externe de l'azote et des éléments minéraux.

A. polyacantha présente quelques unes des caractéristiques des espèces de sol riche. Tout en fixant l'azote atmosphérique (de l'ordre de 630 kg/ha en 7 ans), l'arbre présente une faible translocation des éléments minéraux des feuilles au moment de la défoliation et la litière fine, riche en azote, se décompose rapidement, et en s'incorporant au sol, accroît le taux de MO du sol. Ce fort recyclage externe de l'azote s'accompagne d'un fort recyclage des éléments minéraux. Cela entraîne une amélioration des caractéristiques minérales des couches supérieures du sol, qui montrent cependant une évolution positive moins marquée que la MO du sol. La forte minéralisation de l'azote du sol favorise un stockage de l'azote dans le système racinaire très développé en surface. Selon les critères établis par SCHROTH et al. (1995), ce fonctionnement permettrait de classer l'*A. polyacantha* dans les espèces fixatrices mobilisatrices d'azote. Le fort

rapport phytomasse racinaire / phytomasse aérienne n'est pas caractéristique d'une espèce de milieu riche selon CHAPIN (1980), or il apparaît dans cette étude que le développement racinaire en surface facilite le recyclage externe des éléments minéraux et permet de constituer rapidement un horizon supérieur organique.

L'apport d'azote au système *A. polyacantha* par la fixation symbiotique représente environ 44% du prélèvement moyen annuel de la végétation. Cet apport aurait tendance à augmenter quelque peu les pertes car les eaux de lixiviation à 60 cm de profondeur sont plus concentrées en nitrates et en ions alcalino-terreux que celles des autres jachères. Néanmoins, il apparaît que le phénomène de recyclage de l'azote liée à la minéralisation de N du sol entraîne un ralentissement de la fixation. En limitant alors la lixiviation, ce processus a pour conséquence une conservation de l'azote et des éléments minéraux de l'écosystème. Le recyclage externe des éléments minéraux favorise également l'enrichissement des horizons supérieurs du sol.

Chez les acacias australiens (*A. auriculiformis et A. mangium*) en Côte d'Ivoire, OLIVER et GANRY (1994) observent à 5 ans un effet dépressif sur l'azote du sol. Au Congo, BERNHARD-REVERSAT (1996a) constate, sous les mêmes espèces, à l'age de 7 ans, une diminution de la teneur en N de la fraction organo-minérale, et une plus faible teneur en bases échangeables du sol (K, Ca, Mg) que dans la strate herbacée environnante. L'*A. polyacantha* ne montre pas d'effet dépressif sur l'azote du sol, au contraire, à l'age de 6 ans, la teneur en fractions organiques grossières du sol a augmenté et la teneur en C et N de la fraction organominérale a augmenté également. On assiste alors à une humification des débris végétaux et ce processus a déjà été évoqué par BERNARD-REVERSAT (1987a) pour l'*Acacia seyal* de 14 ans au Sénégal. Par conséquent, l'*A. polyacantha* se montre plus apte que les espèces d'origine australienne mentionnées ci-dessus pour la restauration rapide du statut organique du sol. L'apport d'azote organique au sol par le pluviolessivage représente 20% de l'azote apporté par la litière d'*A. polyacantha*. Selon LODGE et al. (1994), ces composés organiques labiles (acides aminés et autres) peuvent stimuler la croissance microbienne et par conséquent améliorer le fonctionnement biologique du sol.

La plus grande capacité de l'*A. polyacantha* à stocker de l'azote facilement minéralisable à la fois dans la MO du sol et la phytomasse racinaire explique son effet supérieur sur le comportement des cultures suivantes après 2 et 5 ans de jachère.

Comme l'ont évoqué NILSSON et al. (1993), les plantes de sous-bois, et dans notre cas la strate herbacée, ont une plus grande contribution au recyclage des éléments que leur biomasse

pourrait le suggérer car ils sont plus riches en tissus à durée de vie courte. Ainsi le recyclage des éléments, en particulier P, K et Mg, est 1,2 à 3,5 fois plus rapide dans les herbacées que dans les litières de feuilles de *C. siamea* et d'*E. camaldulensis*. YOUNG (1988) mentionne le même phénomène dans la savane à *Burkea africana*. Dans notre étude, la strate herbacée est la principale voie du recyclage de P, K et Mg sous *E. camaldulensis*. L'élimination de la strate herbacée sous *C. siamea* s'accompagne d'une réduction du niveau des flux, en particulier du recyclage externe du phosphore.

Pour conclure, l'apport d'azote par la fixation symbiotique et le recyclage externe de l'azote et des éléments minéraux, correspondant aux restitutions au sol par la litière en décomposition et le pluviolessivage, sont deux processus essentiels de l'amélioration rapide des propriétés chimiques du sol au cours de la vie du peuplement de jachère. Il apparaît également que le développement racinaire en surface favorise la constitution d'un horizon supérieur organique.

Le transfert d'éléments minéraux en particulier de calcium, opéré par les arbres de la profondeur du sol dans la phytomasse, permet, lors du brûlis, d'améliorer les caractéristiques minérales de l'horizon de surface du sol des jachères ligneuses par rapport à la jachère herbacée, et ceci malgré les exportations de bois. L'effet du brûlis est surtout important après *E. camaldulensis*. Il est cependant superficiel et se montre dérisoire en dessous de 20 cm de profondeur.

Les résultats présentés ci-dessus doivent être adaptés en fonction des systèmes d'exploitation des ressources naturelles pratiqués par les populations. En effet, les niveaux de restitution des éléments minéraux au sol par les cendres sont fortement dépendants du mode d'exploitation de la biomasse. Dans le cas d'une exploitation paysanne, toutes les branches de diamètre supérieur à 1 cm et même plus fines seront exportées des parcelles *E. camaldulensis* et *C. siamea*, ce qui réduira le niveau des restitutions. Les parcelles d'*E. camaldulensis* seront pâturées si bien que l'*Andropogon gayanus*, sensible au pâturage ne se développera pas ; cela aura pour conséquence un plus faible recyclage des éléments, en particulier du phosphore et du potassium, par la strate herbacée.

Dans ce contexte de forte exploitation de la biomasse aérienne et de systèmes de culture à faibles apports d'intrants, l'amélioration des propriétés chimiques du sol au cours de la phase de jachère et l'immobilisation de l'azote et des éléments minéraux dans la phytomasse souterraine

sont des processus majeurs dont l'importance conditionne l'efficacité agronomique de la jachère. Du point de vue de l'économie de l'azote, la pratique du brûlis requiert les mêmes critères de choix des espèces. Selon ces critères, *A. polyacantha* présente de loin les meilleurs atouts, *C. siamea* offre une situation au moins aussi favorable que la jachère herbacée, par contre *E. camaldulensis* ne présente pas les qualités requises pour une bonne jachère.

Dans les jachères forestières en zone humide, où le sol ferralitique est fortement désaturé, en grande partie à cause de l'immobilisation des éléments minéraux dans la végétation, le brûlis de celle-ci avant la remise en culture procure un enrichissement minéral et une élévation du pH, permettant de redonner une capacité productive au sol (MOREAU, 1993). Dans notre situation, si la technique du brûlis est nécessaire après *Eucalyptus* pour les mêmes raisons d'apport de fertilisants par la litière et les résidus, après les autres jachères le brûlis ne s'impose pas car il ne permet pas d'améliorer grandement les propriétés chimiques du sol. D'autre part, les cendres résultant du brûlis sont relativement légères et fortement susceptibles d'érosion hydrique et éolienne (WIENHOLD et KLEMMEDSON, 1992).

Néanmoins, pour les jachères herbacées à forte biomasse foisonnante et pour *A. polyacantha* aux résidus d'exploitation épineux très difficiles à manipuler, il est de toute façon nécessaire de brûler pour nettoyer le terrain avant de remettre le sol en culture. En revanche, après *C. siamea*, sous lequel la strate herbacée est éliminée, il est tout à fait possible d'étaler les résidus d'exploitation sur le sol et de pratiquer un semis de la culture dans la litière avec ou sans travail minimum du sol.

La jachère ligneuse améliorée peut être utilisée comme une technique agroforestière de réhabilitation de sol (YOUNG, 1995), à laquelle on ferait succéder un système de culture conservateur de la fertilité du sol de type agriculture sous parc arboré ou agriculture sur mulch. Le parc arboré pourrait être constitué, en partie, des arbres de la jachère, et la couverture végétale, dans un premier temps, de la litière de la jachère. Néanmoins, ces modèles doivent être adaptés en fonction des situations.

Dans les parcs arborés complexes des Monts Mandara au Nord-Cameroun, l'*A. polyacantha* est maintenu en association avec les cultures de sorgho et coupé en "têtard" il fournit du bois de service. Fréquemment, les populations de cette région (ethnies mofou, zoulgou et mada) placent des graminées sous son houppier pour piéger la litière riche en azote et favoriser ainsi la décomposition du paillis que l'on déplace ensuite dans le champ à quelques mètres du

couvert de l'arbre pour fertiliser les cultures. (SEIGNOBOS C., communication personnelle).

Compte tenu des résultats de cette étude et des pratiques énoncées ci-dessus, on peut recommander la plantation d'*A. polyacantha* à forte densité (625 pieds / ha) sur les sols ferrugineux dégradés. Celle-ci permettra de redonner en quelques années une certaine fertilité au sol. Au moment de la remise en culture, un certain nombre d'arbres pourraient être maintenus dans le champ afin d'apporter aux cultures associées de l'azote facilement minéralisable. L'élagage partiel des arbres permettra de réduire les éventuels effets dépressifs sur les cultures dus à l'ombrage et à la concurrence racinaire en particulier pour l'eau. Ces arbres, s'ils sont suffisamment nombreux, pourront servir de base à une nouvelle phase de jachère après 4 à 5 ans de culture.

L'*A. polyacantha* fournit une gomme arabique dure pouvant faire l'objet d'une exploitation commerciale bien que son exsudation, se faisant en conditions naturelles, soit assez faible. Néanmoins, le développement de cette espèce reste tributaire des possibilités de fixation de l'azote atmosphérique influencée par les conditions édaphiques.

Un autre *Acacia* soudano-sahélien, *A. senegal*, se montre adapté à toutes les stations de la zone soudanienne (HARMAND et al., 1995) et fournit, dès l'âge de 4 ans, une gomme dure en quantité intéressante après saignée de l'arbre (60 à 130 kg/ha/an). Cette espèce fixatrice d'azote améliore les propriétés chimiques du sol en particulier les taux de C et N (HUSSEIN, 1990) et représente un enjeu économique pouvant motiver sa plantation en milieu rural.

C. siamea, dont les feuilles ne sont pas appétées par le bétail est facile à installer en milieu paysannal et produit de petites perches, cependant son statut d'arbre non fixateur d'azote limite l'efficacité agronomique de ce type de jachère. Chez cette espèce, il serait souhaitable d'éclaircir le peuplement dès la 3*ème* année pour éviter le dépérissement d'individus. L'absence de brûlis avant la remise culture, envisageable dans ce peuplement, permettra de conserver l'azote de l'agrosystème et de maintenir plus facilement les souches en vie sur chacune desquelles on pourra conserver quelques brins fortement élagués et éventuellement taillés pour ne pas gêner les cultures. A ce sujet, beaucoup d'essais ont montré que *C. siamea*, traité en taillis, ne gênait pas les cultures voisines (CARSKY, 1993 ; HARMAND et al., 1995). Les arbustes conservés serviront de base à une nouvelle phase de jachère. Cette technique reste à expérimenter à partir des boisements qui existent en milieu paysannal.

Etant donné son manque d'effet favorable sur le statut organique (C et N) et la porosité du sol, ayant des conséquences néfastes sur le démarrage des cultures suivantes dans nos parcelles (HIEN, 1996), *E. camaldulensis* n'est pas recommandable en jachère de courte durée et doit

plutôt être installé sur les sols peu propices à l'agriculture. Dans la situation des sols ferrugineux sur grès de la région de Garoua, cela correspond essentiellement aux piémonts de colline au sol superficiel et souvent caillouteux. Néanmoins, le mode d'exploitation intensif des plantations d'*Eucalyptus* de type taillis à courte rotation de 5 à 7 ans, suppose des précautions pour limiter les exportations d'éléments minéraux et rendre pérenne la production de bois. A titre d'exemple, l'écorce, représentant 14% de la biomasse du tronc, contient 82% du Ca, 50% du Mg et 35% du K du tronc. Par conséquent l'écorçage des produits permettra de restituer à la surface du sol une grande partie des éléments minéraux et aussi de fournir des perches plus résistantes aux attaques d'insectes. Cette pratique a déjà été proposée par NJOUKAM (1995) pour les plantations d'*Eucalyptus spp.* en savane d'altitude du Cameroun.

Enfin, le fonctionnement minéral de l'écosystème *Eucalyptus* est fortement influencé par le faible rythme de décomposition de sa litière. L'introduction d'une espèce fixatrice d'azote en mélange dans la plantation d'*E. camaldulensis*, comme l'*A. polyacantha*, pourrait favoriser la décomposition de la litière. O'CONNEL (1986) montre que le sous bois d'*Acacia pulchella*, en augmentant les teneurs en N et P des litières de feuilles d'*Eucalyptus marginata*, accélère la libération de N par la litière.

Du point de vue socio-économique, dans le contexte local, la mise en défens de la jachère herbacée traditionnelle, bien que favorable à la restauration de la végétation originelle à base d'*Andropogon gayanus*, ne procure pratiquement pas de bénéfice au paysan et semble peu envisageable. En revanche, la plantation d'arbres pouvant procurer un revenu au paysan par le biais d'une production de bois ou de gomme arabique est davantage réalisable, surtout si elle permet à l'agriculteur de marquer son appropriation foncière. A ce sujet, il faut préciser que dans certains terroirs d'accueil de paysans migrants, la jachère est peu pratiquée car l'arrêt des cultures peut être perçu comme un signe d'abandon du terrain du point de vue des règles d'attribution foncière. Les agriculteurs préfèrent alors louer le sol à de nouveaux arrivants pour un gain monétaire même réduit, plutôt que de le mettre en jachère (DUGUE et DOUNIAS, 1995). Dans ce contexte, le boisement du terrain au moment de l'arrêt des cultures sera perçu comme une mise en valeur et changera ainsi le statut foncier de la jachère au bénéfice de l'exploitant.

Comme nous pouvons le vérifier dans cette étude, les analyses classiques de sol effectuées en début de cycle cultural, en particulier l'étude du complexe absorbant, souvent utilisées pour tenter d'évaluer l'efficacité agronomique des jachères, montrent relativement peu de succès. Dans

ce travail, l'étude du stockage de l'azote et des éléments minéraux dans les différents compartiments des jachères ainsi que l'étude des flux réels des nutriments correspondant à des processus biologiques tel que la fixation atmosphérique de l'azote, la minéralisation de l'azote du sol et la décomposition des litières permettent d'évaluer beaucoup mieux l'effet des jachères sur les caractéristiques chimiques et biologiques du sol et sur le comportement des cultures suivantes.

Actuellement, au cours de la phase de remise en culture de notre dispositif, il semble important de poursuivre les recherches sur l'évolution des stocks de MO et d'éléments minéraux du sol et sur la dynamique du carbone et de l'azote minéralisables contenus dans la MO du sol et la nécromasse racinaire. Ces processus doivent être étudiés en liaison avec la mobilisation des nutriments par les cultures. La durée de l'arrière effet jachère sur le sol et la succession culturale est un critère important pour proposer le développement de jachères arborées.

L'observation des fractions organiques du sol au microscope devrait permettre de déterminer l'origine aérienne ou racinaire de ces fractions et de mieux comprendre les processus d'incorporation de la MO au sol. Etant donné l'effet favorable de la MO du sol par sa minéralisation sur le fonctionnement des cultures suivantes, il serait intéressant d'évaluer, par une analyse minérale, le rôle de cette MO dans le stockage des nutriments (Ca, Mg et P) pouvant être disponibles pour les plantes. Des mesures de minéralisation des fractions organiques du sol et des racines permettraient également de comparer les jachères et de comprendre la restitution aux cultures des éléments minéraux.

Dans notre étude, les jachères arborées montrent peu d'effet dans le jeune âge sur la macrofaune du sol. On note cependant un effet favorable de l'*A. polyacantha* sur les Coléoptères et un effet défavorable de l'*E. camaldulensis* sur les Iules. L'activité des termites pouvant être importante en saison sèche en particulier dans la rhizosphère pourrait être intéressante à étudier.

Dans une autre voie, des tests d'incubation in vitro portant sur la minéralisation du carbone et de l'azote du sol ainsi que des cultures en pots pratiquées avec les sols de différentes espèces fixatrices d'azote utilisables en jachère, permettraient d'évaluer la capacité de la MO à libérer l'azote et les nutriments au profit des cultures suivantes. Ces variables étudiées in vitro pourraient être corrélées avec différentes caractéristiques des espèces comme la teneur en azote de la litière, de la MO du sol, la biomasse de racines fines et la production de litière. Ces études, visant à comparer l'aptitude agronomique des espèces ligneuses de jachère, présentent l'intérêt d'être moins lourdes et moins coûteuses que celles des flux réels de nutriments dans les agrosystèmes.

Enfin, le fonctionnement des systèmes racinaires semble être un facteur essentiel de la

reconstitution des horizons organiques de surface. Une meilleure connaissance du renouvellement racinaire et des interactions racines - sol permettrait vraisemblablement de préciser à partir des caractéristiques racinaires les critères de sélection des espèces de jachère.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABBADIE L., 1984. Evolution saisonnière du stock d'azote dans la strate herbacée d'une savane soumise au feu en Côte d'Ivoire. Acta Oecologica,Oecologia Plantarum 5 : 321-334.

ABBADIE L. et LEPAGE M., 1989. The role of subterranean fungus comb chambers (Isoptera, Macrotermitinae) in soil nitrogen cycling in a preforest savanna (Côte d'Ivoire). Soil Biol. Biochem. 21 : 1067-1071.

ABBADIE L. et LENSI R., 1990. Carbon and nitrogen mineralization and denitrification in a humid savanna of West Africa (Lamto, Côte d'Ivoire). Acta Oecologica 11 (5) : 717-728.

ABBADIE L., MARIOTTI A. et MENAUT J.C., 1992. Independence of savanna grasses from soil organic matter for their nitrogen supply. Ecology 73 (2) : 608-613.

ABBADIE L., LEPAGE M. et MENAUT J.C., 1996. Paradoxes d'une savane africaine. Comment des sols apparemment pauvres entretiennent une végétation abondante. La Recherche 287 : 36-38.

ADAMS M.A. et ATTIWILL P.M., 1986. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalyptus forests of south-eastern Australia. II. Indices of nitrogen mineralization. Plant and Soil 92 (3) : 341-362.

ADAMS M.A., POLGLASE P.J., ATTIWILL P.M. et WESTON C.J., 1989. *In situ* studies of nitrogen mineralization and uptake in forest soils; some comments on methodology. Soil Biol. Biochem. 21 (3) : 423-429.

ADEJUWON J.O. et ADESINA F.A., 1990. Organic matter and nutrient status of soils under cultivated fallows : an example of *Gliricidia sepium* fallows from South Western Nigeria. Agroforestry Systems 10 : 23-32.

AKRIMI N., STEEN E., M'CHAREK A., JELLALI A., 1989. Etude des biomasses souterraines et aériennes développées par certaines espèces forestières, fruitières et fourragères cultivées en Tunisie Centrale. Ecologia Mediterranea XV (3/4) : 1-13.

AMARGER N., MARIOTTI A. et MARIOTTI F., 1977. Essai d'estimation du taux d'azote fixé symbiotiquement chez le lupin par le traçage isotopique naturel (^{15}N). Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Série D 284 : 2179-2182.

ANDERSON J.M. et INGRAM J. (eds.), 1989. Tropical Soil Biology and Fertility Programme : methods handbook. CAB International, Oxford (GBR).

ANDERSON J.M. et INGRAM J. (eds), 1993. Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook of methods. CAB International, Oxford (GBR), 221 p.

ANDRIESSE J.P., 1977. Nutrient level changes in a 20 years shifting cultivation in Sarawak (Malaysia). ISSS Conference "Clamatrops", Kuala Lumpur, 15-20/08/1977, 15p.

ATTIWILL P.M., 1980. Nutrient cycling in a *Eucalyptus obliqua* (L'Herit.) Forest. IV. Nutrient uptake and nutrient return. Aust. J. Bot. 28 : 199-222.

ATTIWILL P.M. et ADAMS M.A., 1993. Tansley Review No. 50 : Nutrient cycling in forests. New Phytologist, 124 (4) : 561-582.

AUSSENAC G., 1975. Rôle de la microclimatologie et de la bioclimatogie en sylviculture. Revue du palais de la découverte, 13 p.

AUSSENAC G. et BOULANGEAT, 1980. Interception des précipitations et évaporation réelle dans le peuplement de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga mienziessii* Mirb) France. Ann Sc. For. 37 (2) : 91-107.

AWETO A.O., 1981. Total nitrogen status of soils under bush fallow in the forest zone of south western Nigeria. Journal of Soil Science 32 : 639-642.

AWETO A.O., 1985. Soil cation exchange capacity dynamics under bush fallows in South-Western Nigeria. Geoforum 16 (1) : 85-92.

BALANDREAU J., 1976. Fixation rhizosphérique de l'azote (C_2H_2) en savane de Lamto. Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol 13 : 529-544.

BALESDENT J., PETRAUD J.P. et FELLER C., 1991. Effet des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. Science du sol 29 : 95-106.

BALLINI C. et BONIN G., 1994. Nutrient cycling in some *Ulex parviflorue* Pourr. scrubs in Provence (southeastern France). I. Nutrient supplies to the soil through litter and pluvioleachates. Eur. J. Soil Biol., 30 (3), 107-118.

BARDIN R., DOMENACH A. M. et CHALAMET A., 1977. Rapports isotopiques naturels de l'azote. II. Application à la mesure de la fixation symbiotique de l'azote *in situ*. Revue d'Ecologie et de Biologie des Sols 14 : 395-402.

BARGALI S.S., SINGH S.P. et SINGH R.P., 1993. Patterns of weight loss and nutrient release from decomposing leaf litter in an age series of *Eucalypt* plantations. Acta Oecologica 2 (55) : 1731-1738.

BELSKY A.J., AMUNDSON R.G., DUXBURY J.M., RIHA S. J., ALI A.R. et MWONGA S.M., 1989. The effects of trees on their physical, chemical, and biological environments in a semi-arid savanna in Kenya. Journal of Applied Ecology 26 : 1005-1024.

BERGEAL D. et GUIBON S., 1994. Etude de la restauration de la fertilité des sols du Nord-Cameroun à partir de l'analyse de leur macrofaune. IRA, Cameroun. 27p.

BERNHARD F., 1970. Etude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. Oecol. Plant. 5 : 247-266.

BERNHARD-REVERSAT F., 1975. Recherches sur les cycles biogéochimiques des éléments minéraux majeurs en milieu forestier sub-équatorial (Côte d'Ivoire). Thèse. Fac. Sci. Paris Sud, (FRA), ORSTOM, Paris.

BERNHARD-REVERSAT F., 1977. Recherches sur les variations stationelles des cycles biogéochimiques en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 15 : 175-189.

BERNHARD-REVERSAT F., 1981. Décomposition et incorporation à la matière organique du sol de la litière d'*Eucalyptus camaldulensis* et de quelques autres essences. Participation au programme USAID/SEEF du CNRF (ISRA). Dakar-hann (SEN), ORSTOM, 15p.

BERNHARD-REVERSAT F., 1982. Biogeochimical cycle of nitrogen in a semi-arid savanna. Oikos 32 : 321-332.

BERNHARD-REVERSAT F., 1984. Etude des facteurs d'évolution du sol sous *Eucalyptus camaldulensis* et sous quelques autres essences au Sénégal. Participation au Programme PARFOB, CNRF (ISRA). Dakar-Hann (SEN), ORSTOM, 66 p.

BERNHARD-REVERSAT F., 1986. Le recyclage des éléments minéraux par la strate herbacée dans un peuplement naturel à *Acacia* et dans une plantation d'*Eucalyptus* au Sénégal. Acta OEcol./ OEcol. Gener. 7 (4) : 353-364.

BERNHARD-REVERSAT F., 1987 a. Litter incorporation to soil organic matter in natural and planted tree stands in Senegal. Pedobiologia 30 : 401-417.

BERNHARD-REVERSAT F., 1987 b. Les cycles des éléments minéraux dans un peuplement à *Acacia seyal* et leur modification en plantation d'*Eucalyptus* au Sénégal. Acta OEcol./ OEcol. Gener. 8 (1) : 3-16.

BERNHARD-REVERSAT F., 1988. Soil Nitrogen Mineralization under a *Eucalyptus* Plantation and a Natural *Acacia* Forest in Senegal. Forest Ecology and Management 23 : 233-244.

BERNHARD-REVERSAT F., 1991. Evolution of the soil litter interface under *Eucalyptus* plantation on sandy soil in Congo. Acta Oecologica 12 (6) : 825-828.

BERNHARD-REVERSAT F., 1993. Dynamics of litter and organic matter at the soil-litter interface in fast-growing tree plantations on sandy ferallitic soils (Congo). Acta OEcologica 14 (2) : 179-195.

BERNHARD-REVERSAT F., 1996 a. Nitrogen cycling in tree plantations grown on a poor sandy savanna soil in Congo. Applied Soil Ecology 4 : 161-172.

BERNHARD-REVERSAT F., 1996 b. Caractérisation des litières des arbres de jachère (Sénégal et Cameroun). ORSTOM, 14 p.

BERNHARD-REVERSAT F., DIANGANA D. et TSATSA M., 1993. Biomasse, minéralomasse et productivité en plantation d'*Acacia mangium* et *A. auriculiformis* au Congo. Bois et Forêts des Tropiques 238 : 35-44.

BERNHARD-REVERSAT F., BROSSET A., HUTTEL C., LOUBANA P.M., LOUMETO J.J., MBOUKOU I. et REVERSAT G., 1996. Biodiversity in fast-growing forest plantations in Congo. IUFRO-World Bank symposium on Accelerating native forest regeneration on degraded tropical lands, Washington,11-14/06/96.

BILLE J.C., 1976. Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. Travaux et Doc. de l'ORSTOM, n°65, 82p.

BOLI B. Z., 1996. Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne (Dijon) (FRA), IRA (CAM), ORSTOM (FRA), 344 p.

BOLI B. Z., ROOSE E.J., BEP A ZIEM B., KALLO S., WAECHTER F., ZAHONERO P. et WAHOUNG A., 1996. Effets sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et de maïs sur sol ferrugineux sableux en zone soudanienne humide du Nord-Cameroun. Recherche de systèmes de culture intensifs et durables en parcelles d'érosion à Mbissiri (1991-1994). In : Agricultures des savanes du Nord-Cameroun, atelier d'échange de Garoua (CAM), 25-29/11/1996.IRAD (CAM), CIRAD (FRA), p. 33-57.

BONNEAU M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF Nancy (FRA), 367 p.

BONNEAU M., DAMBRINE E., NYS C. et RANGER J., 1987. L'acidification des sols. Bulletin d'Ecologie, fasc. t 18, 3 : 127-136.

BONNEAU M., DAMBRINE E., NYS C. et RANGER J., 1991. Apports acides et cycle des cations dans des pessières du Nord-Est. Intéret de bilans saisonniers. Sci. du Sol 29 (2) : 125-145.

BOUCHON J., NYS C. et RANGER J., 1985. Cubage, biomasse et minéralomasse : comparaison de trois taillis simples des Ardennes primaires. Acta Oecologica, Oecol. Plant. 6 (20), 1 : 53-72.

BRABANT P. et GAVAUD M., 1985. Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun. ORSTOM (FRA), MESRES/IRA (CAM), 285 p. + cartes.

BREMNER J.M. et MULVANEY C.S., 1982. Nitrogen-total. In : Methods of soil analysis, part 2, A.L. Page (éd.), Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, p. 595-624.

CAMPBELL B.M., FROST P., KING J.A., MAWANZA M. et MHLANGA L., 1994. The influence of trees on soil fertility on two contrasting semi-arid soil types at Matopos, Zimbabwe. Agroforestry Systems 28 : 159-172.

CARSKY R. J., 1993. Observation of *Cassia siamea* hedgerows and associated crops on a ferruginous alfisol in the semi-aride zone. Technical Note N°14, TLU Maroua, Institut de la recherche agronomique, Cameroun, 9 p.

CESAR J., 1992. La production biologique des savanes de Côte d'Ivoire et son utilisation par l'homme. Biomasse, valeur pastorale et production fourragère. CIRAD-IEMVT. 671p.

CESAR J. et COULIBALY Z., 1990. Le rôle des jachères et des cultures fourragères dans le maintien de la fertilité des terres. In : Actes des Rencontres internationales. Savanes d'Afrique, terres fertiles ?, Montpellier (FRA), 10-14/12/1990, CIRAD et Ministère de la Coopération et du Développement, p. 271-287.

CESAR J. et COULIBALY Z., 1993. Conséquence de l'accroissement démographique sur la qualité de la jachère dans le Nord de la Côte-d'Ivoire. In : Atelier international. La jachère en Afrique de l'Ouest, C. FLORET and G. SERPANTIER (Eds.), Montpellier, 02-05/12/1991. Paris (FRA), ORSTOM, p. 415-434.

CHAPIN F. S., 1980. The mineral nutrition of wild plants. Ann. Rev. Ecol. Syst. 11 : 233-260.

CHARREAU C., 1972. La jachère peut-elle être supprimée en région tropicale sèche ?. Techniques et Développement 4 : 48-52.

CHIJICKE E.O., 1980. Impact on soils of fast-growing species in lowland humid tropics. FAO For. Pap., n°21, 30p.

COLE D. et RAPP M., 1980. Elemental cycling in forest ecosystem. In : Dynamic properties of forest ecosystem. De Reichle (ed.), Cambridge Univ. Press., p. 341-409.

COLLINS N. M., 1977. Vegetation and litter production in southern guinea savanna, Nigeria. Oecologica 28 : 163-175.

CONSTANTINIDES M. et FOWNES J.H., 1994. Nitrogen mineralisation from leaves and litter of tropical

plants : relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. Soil Biol. Biochem. 26 (1) : 49-55.

CORNET, 1981. Mesure de biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone sahélienne au Sénégal. Acta Oecol./ Oecol. Plant. 2 (16) n°3 : 251-266.

COUTEAUX M.M., BOTTNER P. et BERG B., 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. TREE 10 (2) : 63-66.

CRANE W. J. B. and RAISON R. J., 1980. Removal phosphorus in logs when harvesting *Eucalyptus delegatensis* and *Pinus radiata* forests on short and long rotations. Aust. For. 43 : 253-260.

DABIN B., 1967. Application des dosages automatiques à l'analyse des sols (3e partie). Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 5 (3) : 257-286.

DALDOUM M.A., 1992. Rôle du facteur édaphique dans le fonctionnement biogéochimique et l'état de santé de deux pessières vosgiennes. Effet d'un amendement calci-magnésien. Thèse de Doctorat. Université de Nancy I (FRA), INRA (FRA),132 p.

DANSO S. K. A., BOWEN G. D. and SANGINGA N., 1993. Biological N fixation in trees in agro-ecosystems. Plant and Soil 141 : 177-196.

DE RHAM P., 1973. Recherches sur la minéralisation de l'azote dans les sols des savanes de Lamto (Côte-d'Ivoire). Rev. Ecol. Biol. Sol, 10 (2) : 169-196.

DIAO O., 1995. Comportement des systèmes racinaires des ligneux durant le cycle culture-jachère en Afrique soudanienne. Etude sur un terroir de la région de Kolda, Haute-Casamance, Sénégal. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey,

DIDIER DE SAINT AMAND J. et MALLET B., 1981. Mise en évidence d'un effet inhibiteur des racines de *Terminalia ivorensis* sur le développement de jeunes plants de la famille des combrétacées. XVII IUFRO World Congress, Kyoto, Japan , 1981 september 6-17, 12 p.

DOMMERGUES Y. R., 1963. Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. Bois et Forêts des Tropiques 87 : 9-25.

DOMMERGUES Y. R., 1995. Nitrogen fixation by trees in relation to soil nitrogen economy. Fertilizer Research 42 : 215-230.

DOMMERGUES Y. R., DIEM H. G., GAUTHIER D. L., DREYFUS B. L. and CORNET F., 1984. Nitrogen -fixing trees in the tropics : potentialities and limitations. Advances in in Nitrogen Fixation Reseach (Ed. by C. Veeger & W. E. Newton) pp. 7-13. Martinus Nijhoff / Dr W. Junk, The Hague, and PUDOC, Wagueningen.

DONFACK P., 1993. Dynamique de la végétation après abandon de la culture au Nord-Cameroun. In : Atelier international. La jachère en Afrique de l'Ouest, C. Floret and G. Serpantier (Eds). Montpellier (FRA), 1991/12/02-05. Paris (FRA), ORSTOM, p. 319-330.

DRECHSEL P., GLASER B. and ZECH W., 1991. Effect of four multipurpose tree species on soil amelioration during tree fallow in Central Togo. Agroforestry systems 16 : 193-202.

DUGUE P. et DOUNIAS I., 1995. Intensification, choix techniques et stratégies paysannes en zone

cotonnière du Cameroun. Communication au séminaire "succès et échecs des révolutions vertes" CIRAD. 6 septembre 1995, Montpellier : 1-15.

EYOG MATIG O. et DREYER E., 1991. Fonctionnnement hydrique de quatre essences de reboisement au Nord-Cameroun : Evolution saisonnière du potentiel hydrique et de la conductance stomatique. Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides. Groupe d'étude de l'arbre - Paris, France, p. 85-91.

EYOG MATIG O., 1993. Etude comparée du fonctionnement hydrique de quatre espèces ligneuses utilisées dans les programmes de reboisement au Nord Cameroun. Doctorat d'état de l'université de Yaoundé I (Cameroun), 127 p.

FALAVIER P., 1996. Physicochimie des sols tropicaux In : Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. CIRAD (FRA), p. 23-39.

FELLER C., 1977. Aspects biologiques et caractéristiques de la matière organique. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie 15 (3) : 291-302.

FELLER C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. application aux sols tropicaux, à textures grossières, très pauvres en humus. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. XVII (4) : 339-346.

FELLER C., 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Doctorat d'Etat, Université Louis Pasteur, Strasbourg (FRA), ORSTOM, 393 p. + annexes.

FELLER C. et MILLEVILLE P., 1977. Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental). I - Présentation de l'étude et évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. Cah. ORSTOM, sér. Biologie, 12(3) : 199-211.

FELLER C., LAVELLE P., ALBRECHT A. et NICOLARDOT B., 1993. La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion. In : Atelier international. La jachère en Afrique de l'Ouest, C. FLORET and G. SERPANTIER (Eds.), Montpellier (FRA), 02-05/12/1991. Paris (FRA), ORSTOM, p. 14-32.

FLORENCE R.G., 1986. Cultural problems as eucalyptus as exotics. Commonw. For. Rev. 65 (2) : 141-163.

FLORET C., PONTANIER R. et SERPANTIE G., 1993. La jachère en Afrique tropicale. MAB Digests, 16. Paris (FRA), UNESCO, 86 p.

GALIANA A., N'GUESSAN KANGA A., GNAHOUA G.M., BALLE P., DUPUY B., DOMENACH A.M. et MALLET B., 1996. Fixation de l'azote chez *Acacia mangium* en plantation. Bois et Forêts des Tropiques 49 : 51-59.

GANRY F. et DOMMERGUES Y. R., 1995. Arbres fixateurs d'azote : champ ouvert pour la recherche. Agriculture et Développement 7 : 38-55.

GARRITY D. P. et MERCADO Jr. A. R., 1994. Reforestation through agroforestry : smallholder market-driven timber production on the frontier. In J. Raintree et H. Fernandez (eds.), Marketing multipurpose tree species in Asia. Winrock International, Bangkok.

GILL H.S., ABROL I.P. et SAMRA J.S., 1987. Nutrient recycling through litter production in young

plantation of *Acacia nilotica* and *Eucalyptus tereticornis* in a highly alkaline soil. Forest Ecology and Management 22 : 57-69.

GREENLAND D.J. et NYE P.H., 1959. Increases in the carbon and nitogen contents of tropical soils under natural fallows. Journal of Soil Science 10 : 284-299.

GROUZIS M., NIZINSKI J. et FOURNIER C., 1991. Interactions entre arbre et herbe au Sahel : effets sur la composition floristique et sur l'efficience de l'eau. In : Physiologie des arbres et Arbustes en zones arides et semi-arides, Paris (FRA), 1991. Groupe d'Etude de l'Arbre, p. 131-144.

GUYOTTE K., MARTIN J. et EKORONG J., 1995. La fertilité des sols ferrugineux tropicaux sur grès du bassin de Garoua : bilan d'une enquête. Projet Garoua, IRA (CAM), CIRAD (CAM). 17p.+ annexes.

HANCHI A., 1994. Cycle de l'eau et des éléments biogènes dans un bassin versant forestier : cas d'une hétraie au Mont Lozère. Doctorat de l'université de Bourgogne (Dijon) (FRA), 232 p.

HARMAND J.M., NJITI C.F. et LIBERT C., 1993. Résultats des essais forestiers et agroforestiers au Nord-Cameroun, Tome 1, Institut de la recherche agronomique, Centre de Maroua, 80 p.

HARMAND J.M., NJITI F.C. et NTOUPKA M., 1995. Projet Garoua - Agroforesterie. Contribution de la recherche à la gestion de l'arbre et des formations naturelles de savane en zone soudanienne du Cameroun, IRAD (Cameroun), CIRAD (France), 17 p.

HIEN E., 1996. Effets de jachères de diverses natures sur le statut organo-minéral d'un sol ferrugineux tropical dégradé. Conséquences pour la culture. Cas de Ngong - Nord Cameroun. Mémoire de fin d'études, CNEARC-EITARC, France, IRAD, Cameroun, CIRAD, France, 77 p.

HOBBIE S.E., 1992. Effects of plants species on nutrient cycling. Trees 7 : 336-339.

HÖGBERG P., 1986. Nitrogen-fixation and nutrient relations in savana woodland trees (Tanzania). Journal of Applied Ecology 23, 675-688.

HUSSEIN S.E.G., 1990. The influence of fallow under *Acacia senegal* (L.) Willd. on the C and N content of the soil. Beitrage zur Tropischen Landwirtschaft und Vetarinarmedizin, 28 (2) : 217-222.

HUTTEL C. et BERNHARD-REVERSAT F., 1975. Recherche sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte-d'Ivoire. V. Biomasse végétale et productivité primaire, cycle de la matière organique. La Terre et la Vie 29 : 203-228.

ISICHEI O. A. et MUOGHALU I. J., 1992. The effects of tree canopy cover on soil fertility in a Nigerian savanna. Journal of Tropical Ecology 8 : 329-338.

JAIEYEOBA I.A., 1988. Build-up organic matter and nutrients. Malaysian Journal of Tropical Geography 18 : 10-16.

JAMET R., 1975. Evolution des principales caractéristiques des sols des reboisements de Pointe-Noire (Congo). ORSTOM, 36p.

JENNY H., GESSEL S. P. et BINGHAM F.T., 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. Soil Sci. 68 : 419-432.

JENNY H., 1950. Causes of a high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. Soil Sci. 69 (1) : 63-69.

JONNSON K., FIDJELAND L., MAGHEMBE J. A. et HÖGBERG P., 1988. The vertical distribution of fine roots of five tree species and maize in Morogoro, Tanzania. Agoforestry systems 6, 63-69.

KELLMAN M., 1980. Soil enrichment by neotropical savanna trees. Journal of Ecology 67 : 565-577.

KESSLER J.J. et BREMAN H., 1991. The potential of agroforestry to increase primary production in the sahelian and soudanian zones of West Africa. Agroforestry Systems 13 : 41-62.

KESSLER J.J. et WIERSUM K.F., 1995. Durabilité écologique de l'agroforesterie dans les tropiques. Agriculture + développement rural 2 (1) : 51-54.

KING J.A. et CAMPBELL B.M., 1994. Soil organic matter relations in five land cover types in the miombo region (Zimbabwe). Forest Ecology and Management 67 (1-3) : 225-239.

LAUDELOUT H., 1990. La jachère forestière sous les tropiques humides. UCL, Louvain-la-Neuve, Unité des Eaux et Forêts, Centre de Recherches Forestières, B-6460 Chimay. (BEL), 85 p.

LAVELLE P., 1988. Assessing the abundance and role of invertabrate communities in tropical soils: Aims and methods. In : Procceedings of the Seminar on Resources of Soil Fauna in Egypt and Africa, S.I. Ghabbour and R.C. Davis (Eds.), Cairo, 16-17/04/1986. Rev. Zool. Afr. / J. Afr. Zool. 102 : 275-283.

LAVELLE P. et PASHANASI B., 1989. Soil macrofauna and land management in Peruvian Amazonia (Yurimagas, Loreto). Pedobiologia 33 : 283-291.

LAVELLE P., BAROIS I., MARTIN A., ZAIDI Z. et SCHAEFFER R., 1989. Management of earthworm populations in agro-ecosystems : a possible way to maintain soil quality ? Ecology of arable land : 109-122.

LE GOASTER S., DAMBRINE E. et RANGER J., 1991. Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. I. Evolution de de la biomasse et dynamique d'incorporation d'éléments minéraux. Acta Oecol., 12 (6), 771-789.

LENSI R. et al. , 1992. Plant and Soil 147(107)

LETOUZEY R., 1968. Etude phytogéographique du Cameroun. Encyclopédie Biologique LXIX, Editions P. Lechevalier, Paris (FRA), 511 p.

LEVANG P., 1993. Jachères arborées et cultures sur brulis dans les iles extérieures de l'archipel Indonésien. In : Atelier international. La jachère en Afrique de l'Ouest, C. FLORET and G. SERPANTIER (Eds.), Montpellier (FRA), 02-05/12/1991. Paris (FRA), ORSTOM, p. 179-192.

LIBERT C., 1992. Fonctionnement de l'écosystème parc arboré, Tokombéré , Nord-Cameroun. DEA écosystèmes continentaux arides, méditerranéens et montagnards, Universitéde Montpellier III (FRA), 28 p.

LISANEWORK N. et MICHELSEN A., 1994. Litterfall and nutrient release by decomposition in three plantations compared with a natural forest in the Ethiopian highland. Forest Ecology and Management 65 (2-3) : 149-164.

LODGE D.J., MCDOWELL W.H. et MCSWINEY C.P., 1994. The importance of nutrient pulses in tropical forests. TREE 9 (10) : 384-387.

LOUBELO E., 1990. Etude comparative de quelques éléments du fonctionnement de deux peuplements d'*Eucalyptus* au Congo. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I (FRA), 135 p.

LOUE A., 1965. Le diagnostic foliaire du maïs (méthodologie, état actuel des connaissances, utilisation). Inst. Int. Potasse 4ème colloque Belgrade, p.105-116.

MAÏNAM F., 1993. Description des profils pédologiques des sites expérimentaux (Mayo Dadi et Ngong) de la Section Forêt. Document IRA Maroua (CAM), 8p.

MANLAY R., MASSE D., KAIRE M. et PONTANIER R., 1996. Dynamique du carbone lors du cycle culture-jachère. In : Raccourcissement du temps de jachère, Biodiversité et développement durable en Afrique Centrale (Cameroun) et en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Mali). Rapport scientifique 1996, CCE, p. 29-34.

MENAUT J.C. et CESAR J., 1979. Structure and primary productivity of Lamto savannas, Ivory Coast. Ecology 60 (6) : 1197-1210.

MENAUT J.C., BARBAULT R., LAVELLE P. et LEPAGE M., 1985. African savannas : biological system of humification and mineralization. in J.C. Tothill et J.J. Mott (Eds) : Ecology and Management of the World' Savannas. Australian Acad. Science, Canberra, p. 14-33.

MILLER H.G., 1980. Deposition-plant-soil interactions. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 305, 339-352.

MILLET J., 1994. Bilan hydrique d'une jachère arborée en zone soudanienne du Cameroun. DEA écosystèmes continentaux arides, méditerranéens et montagnards, Université St-Jérôme, Marseille (FRA), 30 p.

MITJA D. et PUIG H., 1990. Phytomasse de la strate herbacée de 5 jachères en zone de savane humide (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). Bull. Ecol., t. 21, 1, 19-32.

MODI A.I., LACAUX J.P., LABROUE L. et BAUDET J.G.R., 1995. Chimie des aérosols et des pluies dans la savane semi-aride du Niger pendant la saison humide 1989. Sécheresse 4 (6) : 331-335.

MONTAGNINI F., RAMSTAD K. et SANCHO F., 1993. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous trees species in the Atlantic lowlands of Costa Rica. Agroforestry systems 23 (1) : 39-61.

MORDELET P., ABBADIE L. et MENAUT J.C., 1993. Effects of tree clumps on soil characteristics in a humid savanna of West Africa (Lamto, Cote d'Ivoire). Plant and Soil, 153 : 103-111.

MOREAU R., 1993. Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols forestiers tropicaux. In : Atelier international. La jachère en Afrique de l'Ouest, C. Floret and G. Serpantier (Eds.), Montpellier (FRA), 1991/12/02-05. Paris (FRA), Orstom, p. 245-256.

MUOGHALU J.I., AKANNI S.O. et ERETAN O.O., 1993. Litterfall and nutrient dynamics in a Nigerian rain forest seven years after a ground fire. Journal of Vegetation Science 4 : 323-328.

NILSSON L.O., HÜTTL R.F., JOHANSSON U.T. et JOCHHEIM H., 1995. Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems - present status and future research directions. Plant and Soil 168-169 : 5-13.

NJOUKAM R., 1995. Contribution à l'étude des interactions "essences forestières à croissance rapide et sols des savanes tropicales humides". Cas de la réserve forestière de Mélap (Foumban) au Cameroun. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique), 215 p.

NJOUKAM R., BOCK L., HEBERT J., MATHIEU L., OLIVER R. et PELTIER R., 1996. Ligniculture et maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest-Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques

249 : 33-49.

NYS C., RANGER D. et RANGER J., 1983. Etude comparative de deux écosystèmes feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises. III. Minéralomasse et cycle biologique. Annales des Sciences Forestières 40 (1), 41-68.

O'CONNELL A.M. , GROVE T.S. et MALAJCZUK N., 1979. Nitrogen fixation in the litter layer of eucalypt forests. Soil Biol. Bioch. 11 : 681-682.

O'CONNELL A.M., 1986. Effect of legume understorey on decomposition and nutrient content of eucalyptus forest litter. Plant and Soil 92 (2) : 235-248.

OHTA S., 1990. Initial soil changes associated with afforestation with *Acacia auriculiformis* and *Pinus kesiya* on Denuded Grasslands of the Pantabagan Area, Central Luzon, the Philippines. Soil Sci. Plant. Nutr. 36 (4) : 633-643.

OLIVER R. et GANRY F., 1994. Etude des modifications de fertilité induites par une jachère arborée. Cas de la zone forestière de Centre Côte-d'Ivoire. CIRAD (FRA), 27 p.

OKEKE A.I. et OMALIKO C.P.E., 1991. Nutrient accretion to the soil via litterfall and throughfall in *Acioa barteri* stands at Ozala, Nigeria. Agroforestry Systems 16: 223-229.

PELTIER R. et EYOG MATIG O., 1988. Les essais d'agroforesterie au Nord-Cameroun. Bois et Forêts des Tropiques 217, 3-31.

PELTIER R., BALLE P., GALIANA A., GNAHOUA G. M., LEDUC B., MALLET B., OLIVER R., OUALOU K. et SCHROTH G., 1996. Produire du bois énergie dans les jachères de zone guinéenne. Intérêts et limites à travers l'expérience d'Oumé en Basse Côte d'Ivoire. In : Fertilité du milieu et statégies paysannes sous les tropiques humides. CIRAD (FRA), p. 219-227.

PICHOT J., SEDOGO M.P., POULAIN J.F. et ARRIVETS J., 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. Agron. trop. 36(2) : 122-133.

PIERI C., 1985. Bilans minéraux des systèmes de cultures pluviales en zones arides et semi-arides. Agron. trop. 40 (1) : 1-120.

PIERI C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, Ministère de la Coopération et du Développement, CIRAD (FRA), 444 p.

POCHON J., DE BARJAC H. et FAIVRE-AMIOT, 1959. L'influence de plantations d'eucalyptus au Maroc sur la microflore et l'humus du sol. Annales de l'Institut Pasteur 97 (3) : 403-406.

POLGLASE P.J. et ATTIWILL P.M., 1992. Nitrogen and phosphorus cycling in relation to stand age of *Eucalyptus regnans* (F. Muell.). I. Return from plant to soil in litterfall. Plant and Soil 142 : 157-166.

POLGLASE P.J., ATTIWILL P.M. et ADAMS M.A., 1992. Nitrogen and phosphorus cycling in relation to stand age of *Eucalyptus regnans* (F. Muell.). II. N mineralization and nitrification. Plant and Soil 142 : 167-176.

POORE M.E.D. et FRIES C., 1986. Les effets écologiques des eucalyptus. Etude FAO Forêts, 59, 118 p.

POWERS R.F., 1980. Mineralizable soil nitrogen as an index of nitrogen availability to forest trees. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 1314-1320.

RAISON R. S. et CRANE W. J. B., 1981. Nutritionnal costs of shorterned rotations in plantation forestry. Congrès I.U.F.R.O. Tokyo, 1981, p. 63-72.

RANGER J., BARNEOUD C. et NYS C., 1988. Production ligneuse et rétention d'éléments nutritifs par des taillis à courte rotation de peuplier "Rochester" : effet de la densité d'ensouchement. Acta Oecologica/ Oecologia Plantarum 9 (3) : 245-269.

RAPP M., 1971. Cycle de la matière organique et des éléments minéraux dans quelques écosystèmes méditerranéens. Dynamique saisonnière de deux sols en climat tempéré. Editions du C.N.R.S. Paris 7é (FRA), 184 p.

RAPP M. et LEONARDI S., 1988. Evolution de la litière au sol au cours d'une année dans un taillis de chêne vert (*Quercus ilex*). Pedobiologia 32 : 177-185.

RHOADES C., 1995. Seasonal pattern of nitrogen mineralization and soil moisture beneath *Faidherbia albida (*syn *Acacia albida)* in central Malawi. Agroforestry Systems 29 :133-145.

RIPPSTEIN G., 1985. Etude sur la végétation de l'Adamaoua. Evolution, conservation, régénération et amélioration d'un écosystème pâturé au Cameroun. Maisons-Alfort, IEMVT. Etudes et synthèse de l'IEMVT n°14, 379p.

ROOSE E. et HENRY DES TUREAUX P., 1970. Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans un sol en place. L'Agronomie Tropicale, 25 (12) : 1079-1086.

RUIZ L., GANRY F., WANEUKEM V., OLIVER R. et SIBAND P., 1995. Les indicateurs de la fertilité azotée des terres en région tropicale semi-aride. Agriculture et développement 5 : 38-46.

SANCHEZ P.A. et PALM C.A., 1996. Recyclage des éléments nutritifs et agroforesterie en Afrique. Unasylva 185 (47) : 24-28.

SCHERER H. W., WERNER W. and ROSSBACH J., 1992. Effects of pretreatment of soil samples on N mineralization in incubation experiments. Biol. Fertil. Soils, 14 : 135-139.

SCHROTH G., KOLBE D., PITY B. and W. ZECH, 1995. Searching for criteria for the selection of efficient tree species for fallow improvement, with special reference to carbon and nitrogen. Fertilizer Research, 42 : 297-314.

SEBILLOTTE M., 1993. La jachère, éléments pour une théorie. In : Atelier international. La jachère en Afrique de l'Ouest, C. Floret and G. Serpantier (Eds). Montpellier (FRA), 1991/12/02-05. Paris (FRA), ORSTOM, p. 89-111.

SEGUIERI J., 1990. Dynamique saisonnière d'une savane soudano-sahélienne au Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat, université de Montpellier II, 200p.

SEINY BOUKAR L, 1990. Régime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat 3e cycle, université de Yaoundé, 226p.

SHEARER G. and KOHL D.H., 1989. Estimates of N_2 fixation in ecosystems : The need for and basis of the ^{15}N abundance method. Ecol. Stud. 68 : 342-374.

SIBAND P., 1974. Evolution des caractères de fertilité d'un sol rouge de Casamance. Agron. trop. 29 (12) 1228-1248.

SICOT M., 1980. Déterminisme de la biomasse et des immobilisations minérales de la strate herbacée des parcours naturels sahéliens. Cah. ORSTOM, sér. Biol. 42 : 9-24.

SUCHEL J. B., 1971. La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Centre de Recherches Africanistes, université fédérale du Cameroun, Yaoundé, 287 p.

SWIFT M.J., HEAL O.W. et ANDERSON J.M., 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystem. Studies in ecology. Vol. 5. Blackwell scientific publications. Oxford.

SWITZER G.L. et NELSON L.E., 1972. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystem : the first twenty years. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 36 : 143-7.

TANDON V.N., RAWAT J.K., SINGH R., 1993. Biomass production and mineral cycling in plantation ecosystems of *Eucalyptus* hybrid in Haryana. 1. Biomass production and its distribution. Indian Forester (March) : 232-237.

TOKY O.P. et SINGH V., 1993. Litter dynamics in short-rotation high density tree plantations in an arid region of India. Agriculture, Ecosystems and Environnement 45 : 129-145.

TRIPATHI S.K. et SINGH K.P., 1994. Productivity and nutrient cycling in recently harvested and mature bamboo savannas in the dry tropics. Journal of Applied Ecology 31 : 109-124.

UGUEN K., 1996. Effet de litière d'espèces ligneuses naturelles et introduites de jachère sur la disponibilité de l'azote du sol pour les plantes. DEA d'écologie générale.Université de Paris VI, Université de Paris XI, I.N.A. Paris-Grignon (FRA). 27 p. + annexes.

VAN BREEMEN, 1995. Nutrient cycling strategies, Plant and Soil 168-169 : 321-326.

VILLECOURT P., 1975. Apports d'azote minéral (nitrique et ammoniacal) par la pluie dans la savane de Lamto. Rev. Ecol. Biol. Sol, 12 (4) : 667-680.

VILLECOURT P. et ROOSE E., 1978. Charge en azote et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolessivage et de drainage dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). Rev. Ecol. Biol. Sol, 15 (1) : 1-20.

VILLECOURT P., SCHMIDT W. et CESAR J., 1979. Recherche sur la composition chimique de la strate herbacée de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). Rev. Ecol. Biol. Sol 16 (1) : 9-15.

VITOUSEK P.M., 1984. Littterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. Ecology 65 (1) : 285-298.

VITOUSEK P.M. et SANFORD R.L., 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. Ann. Rev. Ecol. Syst. 17 : 137-167.

WALKER B.H., 1974. Ecological considerations in the management of semi-arid ecosystems in south central Africa. In : Proceedings of the 1st International Congress of Ecology, Wageningen : 124-129.

WESTMAN W. E. et ROGERS R.W., 1977. Biomass and structure of a subtropical *Eucalyptus* forest. J. of Ecology 66 : 513-531.

WIENHOLD B.J. et KLEMMEDSON J.O., 1992. Effect of prescribed fire on nitrogen and phosphorus in Arizona chaparral soil-plant systems. Arid Soil Research and Rehabilitation 6 : 285-296.

YONEYAMA T., MURAKAMI T., BOONKERD N., WADIRISUK P., SIRIPIN S. et KOUNO K., 1990. Natural ^{15}N abundance in shrub and tree legumes, *Casuarina*, and non N_2 fixing plants in Thailand. Plant and Soil 128 : 287-292.

YOUNG A., 1989. Agroforestry for soil conservation. CAB International, ICRAF, Oxon (UK), 276 p.

YOUNG A., 1995. L'agroforesterie, une solution viable pour la conservation des sols. Agriculture + développement rural 2 (1) : 46-50.

RESUME

Cette étude portant sur la jachère arborée, réalisée en zone soudanienne du Cameroun avec 1050 mm de pluie annuelle, utilise une approche expérimentale. Elle a pour objectif de comparer le fonctionnement biogéochimique de jachères très différentes par la nature de leur végétation : une plantation d'*Acacia polyacantha,* une plantation de *Cassia siamea,* une plantation d'*Eucalyptus camaldulensis*, une jachère naturelle herbacée protégée contre le feu et le pâturage et une jachère herbacée pâturée et brûlée.

L'action de la jachère de courte durée (4 ans) sur la matière organique (MO) du sol se manifeste par l'augmentation des débris végétaux grossiers peu efficaces dans les propriétés d'échange cationique.

Par rapport à la strate herbacée à andropogonées, la plantation d'arbres associée aux cultures durant une phase d'installation de deux ans, favorise les processus de minéralisation de la MO du sol en particulier de l'azote, ce qui a pour conséquence une augmentation de production de matière sèche du système. Le transfert d'éléments minéraux en particulier le calcium, opéré par les arbres de la profondeur du sol dans la phytomasse, permet, lors du brûlis avant la remise en culture, d'améliorer les caractéristiques minérales de l'horizon de surface du sol des jachères ligneuses par rapport à la jachère herbacée, et ceci malgré les exportations de bois.

De cette étude, il ressort que les processus essentiels de l'amélioration de l'aptitude agronomique du sol au cours de la phase de jachère sont l'apport d'azote au système par la fixation symbiotique et le recyclage externe de l'azote et des éléments minéraux, correspondant aux restitutions au sol de bioéléments par la litière en décomposition et le pluviolessivage. Il apparaît également que le développement racinaire en surface favorise la constitution d'un horizon supérieur organique. Selon ces critères, *A. polyacantha* présente de loin les meilleurs atouts, *C. siamea* offre une situation au moins aussi favorable que la jachère herbacée, par contre *E. camaldulensis* ne présente pas les qualités requises pour une utilisation en jachère.

Pour finir, l'étude des processus biologiques pour évaluer l'aptitude agronomique des jachères se montre plus pertinente que les analyses chimiques de sol effectuées couramment en début de cycle cultural, en particulier l'étude du complexe absorbant.

Mots-clés : *Acacia polyacantha, Eucalyptus camaldulensis, Cassia siamea*, jachère herbacée, cycle biogéochimique, matière organique du sol, minéralisation de l'azote, litière

ABSTRACT

An experimental approach was used to study tree-improved fallow in the Sudanian zone of Cameroon (annual rainfall 1050 mm). Its aim was to compare nutrient cycling in different types of fallow with *Acacia polyacantha*, *Cassia siamea*, *Eucalyptus camaldulensis*, a herbaceous fallow protected against fire and grazing and a non-protected, overgrazed herbaceous fallow.

The action of a short-term (4 years) fallow on soil organic matter (SOM) was shown by the increase of coarse plant debris, but which was not very effective in cation exchange properties.

Relative to the andropogon herbaceous stratum, the planting of trees associated with crops over a two-year establishment phase enhanced the nitrogen mineralization rate, increasing the production of dry matter in the system. The transfer of nutrients, particularly calcium, by trees from deep soil to the phytomass, improved, during burning, the mineral characteristics of the top soil of tree fallow in comparison to grassy fallow, in spite of timber exports.

The essential processes for improving agronomic soil suitability in the fallow phase were i) the input of nitrogen into the system by symbiotic fixation and ii) the external recycling of nitrogen and other nutrients, corresponding to a supply of nutrients to the soil through decomposing litter and rain pluvioleachates. It also appeared that surface root development encouraged the formation of an organic top soil layer. Based on these criteria, *A. polyacantha* has by far the best qualities, *C. siamea* is at least as favourable as grassy fallow, but *E. camaldulensis* does not make good fallow.

The study of biological processes better reflects the agronomic suitability of fallow than chemical soil tests done at the start of the cultural cycle.

Keywords : *Acacia polyacantha, Eucalyptus camaldulensis, Cassia siamea*, grassy fallow, nutrient cycling, soil organic matter, nitrogen mineralization, litter.