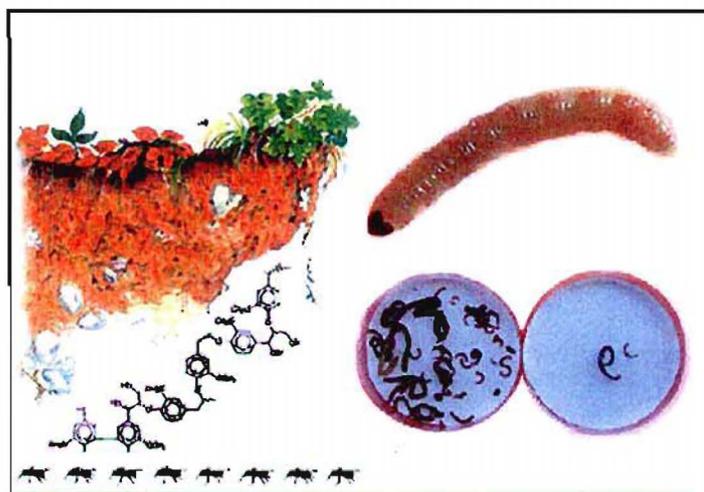


**L'IMPACT DES MODES DE GESTION DES
ECOSYSTEMES NATURELS ET DES SYSTEMES
CULTIVES A BASE DE COUVERTURES VEGETALES
SUR LES PARAMETRES BIOLOGIQUES ET
CHIMIQUES DU SOL, A L' ÎLE DE LA REUNION**



**Rapport Technique
(Mars 2003)**

Johnny BOYER



Avant Propos

Que le Conseil Régional de la Réunion et son Président trouvent ici toute ma reconnaissance pour l'investissement et la confiance qu'ils ont apportés à cette étude.

Je voudrais aussi remercier Mesdames Marianne ASSING et Francine FELICITE, de même que Messieurs Idriss OMARJEE et André JATOB, du Conseil Régional de la Réunion pour leur confiance et leur aide.

Ce travail fut réalisé en collaboration avec les partenaires du développement (APR, CIVAM, Association des Planteurs Expérimentateurs). Je tiens à leur exprimer toute ma satisfaction pour cette collaboration durant ce parcours.

A ceux qui m'ont aidé au quotidien et ce pendant ces quatre années, recevez tous mes remerciements : à Patrick TECHER, Josian RIVIERE, Jean Paul FONTAINE, Régis NATIVEL, Alain HEBERT et à tout le personnel administratif du Cirad.

Un grand merci à Eric FRUTEAU.

A ceux qui m'ont initié à l'agronomie et aux couvertures végétales, trouvez ici ma gratitude et mes amitiés : à André CHABANNE, Lucien SEGUY, Roger MICHELLON, Patrick TECHER.

Sommaire

I. INTRODUCTION.....	1
I. 1. Contexte scientifique général.....	2
I. 2. Fonctions de la biodiversité dans les sols.....	3
I.2.1. Introduction.....	3
I.2.2. Fonctions de la biodiversité dans les écosystèmes.....	3
I. 3. Les fonctions du sol.....	4
I. 4. Régulation des processus du sol: le modèle hiérarchique.....	5
I. 5. La richesse taxonomique des sols.....	6
I. 6. Les principales stratégies adaptatives de la faune du sol.....	6
I.7. Classification fonctionnelle de la faune du sol.....	8
I.7.1. Les microprédateurs.....	8
I.7.2. Les transformateurs de litière.....	8
I.7.3. Les ingénieurs écologiques.....	8
I.8. Impact de la marcottons sur le fonctionnement du sol.....	9
I.8.1. Effets sur la dynamique de la matière organique.....	9
I.8.2. Effets sur les propriétés physiques du sol.....	9
I.8.3. Effets sur la croissance des plantes.....	10
I.9. Rôle des structures biogéniques.....	11
I.10. Vers de terre, fonctions du sol et intensification agricole.....	11
I.11. Sites et objectifs de l'étude.....	12
II. PRESENTATION GENERALE ET METHODES.....	14
II.1. Présentation Générale.....	15
II.1.1. Contexte géologique.....	15
II.1.2. Le climat.....	15
II.1.3. La végétation naturelle.....	16
II.1.4. Cultures et productions agricoles.....	16
II.2. Les sols.....	18
II.2.1. Présentation générale.....	18
II.2.2. Principaux sols.....	18
II.3. Sites d'étude.....	19
II.3.1. Saint Philippe.....	19
II.3.2. Hauts de Trois Bassins (Cocâtres).....	19
II.4. Méthodologie.....	20
II.4.1. Echantillonnage de la faune (macrofaune) du sol.....	20
II.4.2. Analyses chimiques du sol.....	21
II.4.3. Biomasses et activités microbiennes.....	21

a) Biomasses.....	21
b) Coefficients de minéralisation du carbone.....	22
c) Analyses enzymatiques.....	22
II. 4.4. Méthodes statistiques utilisées.....	22
III. RESULTATS : Forêt de Saint Philippe.....	23
III.1. ETUDE DES PEUPELEMENTS DE LA MACROFAUNE DU SOL EN FONCTION DES MODES DE GESTION DES SITES ETUDIES.....	24
III.1.1. Densités.....	24
III.1.2. Biomasses.....	26
III.1.3. Distribution des différents groupes de la macrofaune du sol.....	27
III.1.4. Discussion.....	30
III.2. ETUDE DE LA MICROFLORE DU SOL EN FONCTION DES MODES DE GESTION DES SITES ETUDIES.....	32
III.2.1. Biomasses microbiennes du sol.....	32
III.2.2. Coefficients de minéralisation du carbone dans les sols.....	35
III.2.3. Activités enzymatiques.....	36
III. 2.4. Discussion.....	41
III.3. PROPRIETES CHIMIQUES DU SOL EN FONCTION DES MODES DE GESTION DES SITES ETUDIES.....	43
III.3.1. Août 1999.....	43
III.3.2. Janvier 2000.....	43
III.3.3. Evolution des éléments chimiques dans le temps.....	46
III.3.4. Discussion.....	47
III.4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES.....	48
IV. RESULTATS : Trois Bassins (Cocâtres).....	50
IV. 1. INTRODUCTION.....	51
IV. 2. PRODUCTION DE MAÏS.....	51
IV.2.1. Production de maïs en 2000.....	51
IV.2.2. Production de maïs en 2001.....	53
IV.2.3. Discussion.....	54
IV.3. ETUDE DES POPULATIONS DE LA MACROFAUNE DU SOL EN FONCTION DES MODALITES EXPERIMENTALES.....	55
IV.3.1. Macrofaune prélevée en novembre 1999.....	55
IV.3.2. Macrofaune prélevée en 2000.....	57
IV.3.3. Macrofaune prélevée en 2001.....	60
IV.3.4. Discussion.....	67

IV.4. ETUDE DE LA MICROFLORE DU SOL EN FONCTION DES MODALITES EXPERIMENTALES.....	68
IV.4.1. Biomasses microbiennes.....	68
IV.4.2. Coefficients de minéralisation du carbone.....	74
IV.4.3. Activités enzymatiques.....	79
IV.4.4. Discussion.....	80
IV.5. ETUDE DES PARAMETRES CHIMIQUES DU SOL EN FONCTION DES MODALITES EXPERIMENTALES.....	81
IV.5.1. Résultats.....	81
IV.5.2. Evolution des éléments chimiques dans le temps.....	81
IV.5.3. Discussion.....	86
IV.6. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES.....	87
1) Analyses en composantes principales réalisée sur les données de 1999.....	87
2) Analyses en composantes principales réalisée sur les données de 2000.....	87
3) Analyses en composantes principales réalisée sur les données de 2001.....	88
V. CONCLUSIONS GENERALES.....	92
VI. BIBLIOGRAPHIE.....	96

I. 2. Fonctions de la biodiversité dans les sols

I. 2.1. Introduction

La perte de la diversité biologique de la terre est devenue un sujet de préoccupation et un enjeu politique majeurs depuis que l'action humaine impose des transformations aux écosystèmes terrestres et aquatiques, à des échelles allant des paysages à la biosphère tout entière (Solbrig, 1991a; Schulze et Mooney, 1994; Solbrig, 1994; Blondel, 1995). Ces transformations sont de natures diverses : intensification agricole, changement de la composition atmosphérique, modifications des cycles du carbone ou de l'azote, pollutions diverses, urbanisation, ect. (Solbrig, 1991a; Pimm et Sugden, 1994; Schulze et Mooney, 1994; Solbrig, 1994; Asner et al., 1997; Vitousek et al., 1997). Les activités anthropiques qui les génèrent sont motivées par la nécessité toujours croissante de nourrir une population humaine en forte augmentation et de fournir des biens de consommation liés à une augmentation globale du niveau de vie dans certaines parties du monde. Alors que les bénéfices de tels processus pour l'humanité sont économiques, immédiats et quantifiés, les coûts écologiques pourraient être ressentis à long terme et sont largement méconnus (Solbrig, 1991a).

L'émergence du concept de "services écologiques" rendus par les écosystèmes, et le début de leur évaluation monétaire sont en ce sens des signes encourageants. Devant les risques écologiques qui menacent l'humanité, il est devenu urgent de comprendre les relations qui existent entre la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes (Mooney, 1991; Solbrig, 1991a). A cet égard, l'étude de la diversité des organismes du sol et de sa fonction relève d'une importance particulière. Les sols sont parmi les systèmes les plus riches en espèces de la biosphère terrestre, supportent plus de 60% à 90% de la production primaire totale des écosystèmes terrestres et constituent le support physique nécessaire à toute production agricole (Giller, 1996; Brussaard et al., 1997). Ils sont le siège de processus écologiques fondamentaux à l'échelle des écosystèmes et de la biosphère : maintien de la production primaire, régulation des cycles biogéochimiques, stockage du carbone et de l'eau, émission d'oxydes d'azote, de gaz carbonique et de méthane (Coleman et al., 1992; Lavelle, 1996, Brussaard et al., 1997).

I. 2. 2. Fonctions de la biodiversité dans les écosystèmes

La biodiversité (sensu Wilson et Peter, 1988) ou diversité biologique, a été définie comme "la quantité et la structure de l'information contenue dans les systèmes vivants hiérarchiquement emboîtés" (Blondel, 1995). Il ne s'agit donc pas d'un concept mais d'une caractéristique (attribut) des systèmes vivants considérés à différents niveaux d'organisation, depuis les gènes jusqu'à la biosphère, en passant par les espèces, les populations, les communautés et les paysages (Solbrig, 1991a; Solbrig, 1994). Un écosystème caractérisé par une grande biodiversité spécifique sera marqué par la pluralité de ses communautés mais aussi par les relations entre éléments constitutifs de cette pluralité (complexité des interactions entre espèces) (Blondel, 1995).

On ne connaît encore que peu de choses sur les conséquences directes ou indirectes des modifications de la biodiversité sur les fonctions des écosystèmes (flux de carbone, d'eau, d'éléments nutritifs) et leur stabilité (Schulze et Mooney, 1994; Blondel, 1995). Cette méconnaissance trouve son origine dans le manque actuel de données concernant la biologie et le rôle fonctionnel de la plupart des espèces (Schulze et Mooney, 1994). Des questions fondamentales restent actuellement sans réponse :

I. 1. Contexte scientifique général

Il existe actuellement un grand intérêt pour l'étude des modifications apportées par l'homme à son environnement naturel. A ce titre, l'étude des conséquences de la diminution de la diversité biologique sur le fonctionnement des écosystèmes a reçu un écho croissant de la part du monde scientifique. Cet intérêt récent est motivé par l'observation des modifications anthropogéniques apportées aux écosystèmes terrestres et aquatiques de l'ensemble de notre planète (Solbrig, 1991a). Dans ce cadre scientifique général, l'étude du rôle fonctionnel de la biodiversité des sols a une importance toute particulière puisque les sols sont le siège de processus fondamentaux à l'échelle des écosystèmes et de la biosphère : maintien de la production primaire, régulation des cycles biogéochimiques, stockage du carbone et de l'eau, émission d'oxydes d'azote, de gaz carbonique et de méthane, etc. (Coleman et al., 1992; Lavelle, 1996; Brussaard et al., 1997).

Le travail présenté ici s'inscrit dans le courant récent de l'écologie des sols qui met en avant le rôle de la pédofaune dans le fonctionnement des sols. Parmi les nombreux invertébrés du sol, une catégorie fonctionnelle particulière, les ingénieurs écologiques du sol (sensu Jones et al., 1994), regroupe les espèces ayant la faculté de modifier leur milieu environnant en produisant une variété de structures physiques appelées des structures biogéniques (cavités, agrégats, buttes, etc.) (Jones et al., 1997; Jones et al., 1994; Anderson, 1995; Lavelle, 1996; Lavelle, 1997). La production de ces structures entraîne généralement des modifications significatives des propriétés du sol, des flux d'énergie et d'eau, et module ainsi les conditions de vie d'autres organismes du sol. La zone de sol influencée par une espèce est constituée de l'ingénieur lui-même ainsi que de l'ensemble des structures qu'il produit. Les principaux ingénieurs du sol sont les fourmis, les termites et les vers de terre (Storck et Eggleton, 1992; Anderson, 1995; Lavelle, 1997).

Le rôle de ces invertébrés dans les processus pédologiques tels que la régulation de la dynamique de la matière organique, la libération d'éléments assimilables par les plantes, le maintien de la structure du sol ou encore la pédogénèse de certains sols a été largement illustré dans la littérature scientifique (Lal, 1988; Storck et Eggleton, 1992; Lavelle, 1997; Lobry de Bruyn, 1997). Leur implication dans la régulation de l'activité microbienne du sol est maintenant largement reconnue, et il semble qu'ils soient également capables d'influencer l'abondance et la structure des peuplements d'autres micro-, méso- ou macroinvertébrés (Brown et al., 1999; Parkinson et McLean, 1998). Des travaux récents montrent aussi une relation directe et proportionnelle entre l'activité de certains ingénieurs écologiques du sol (en l'occurrence les vers de terre) et la croissance végétale (Edwards et Lofly, 1978; Spain et al., 1992; Pashanasi et al., 1992; Stephens et al., 1994).

Malgré la reconnaissance de l'importance que peut avoir l'activité des ingénieurs écologiques dans le fonctionnement du sol et plus largement des écosystèmes, les données quantitatives restent rares et la compréhension des mécanismes mis en œuvre est encore très insuffisante.

I. INTRODUCTION

- A partir de quels seuils critiques de diversité les systèmes perdent-ils leur intégrité fonctionnelle et leur efficacité à assurer les cycles biogéochimiques ?
- Existe-t-il une limite inférieure de diversité en deçà de laquelle des symptômes de dysfonctionnement apparaissent (Schulze et Mooney, 1994; Blondel, 1995) ?

La théorie écologique et l'intuition tendent vers l'idée selon laquelle la stabilité (i.e. résistance + résilience) et l'efficacité des processus fonctionnels d'un écosystème sont augmentées par une plus grande biodiversité (théorie de la diversité – stabilité; Pimm, 1994; Blondel, 1995). Inversement, la perte de la richesse spécifique d'un système conduirait à une altération de ses fonctions primordiales, à la façon d'un avion dont on retirerait un à un les rivets qui assurent sa cohésion (théorie du rivet de Ehrlich et Ehrlich, 1981). Des études en microcosmes, réalisées sur des systèmes simplifiés, tendent à confirmer la relation directe existant entre le nombre d'espèces présentes dans le système et certains processus fondamentaux (respiration, décomposition, stockage de nutriments, productivité primaire et stockage de l'eau) (Tilman et Downing, 1994; Naeem et al., 1995). Dans les sols, il a été démontré qu'une plus grande complexité des peuplements de microinvertébrés conduit à une stimulation des processus de décomposition de la matière organique (Setälä et al., 1991; Vedder et al., 1996).

D'autres études plus récentes ont mis l'accent sur l'existence possible d'espèces redondantes ou équivalentes écologiques, assurant une même fonction précise au sein de l'écosystème (théorie de la redondance spécifique, Lawton et Brown, 1994). On définit alors un groupe fonctionnel comme un ensemble d'espèces équivalentes vis à vis d'une fonction donnée (Blondel, 1995). Selon Huston (1996), des espèces peuvent être redondantes pour une fonction sans l'être pour d'autres, et qu'il est finalement peu vraisemblable que des espèces entièrement équivalentes d'un point de vue fonctionnel puissent coexister dans la nature. Ces redondances confèreraient aux écosystèmes une relative stabilité fonctionnelle face à une diminution accidentelle de la diversité spécifique des communautés (Blondel, 1995). De nombreuses études récentes vont dans le sens de cette théorie (Tilman et al., 1996; Tilman et al., 1997; Grime, 1997; Hooper et Vitousek, 1997).

I. 3. Les fonctions du sol

La notion de "fonctions du sol" est liée à celle de "qualité du sol", c'est à dire "la capacité d'un sol à soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement, et favoriser la santé des végétaux, des animaux et de l'humanité. Cette notion se rapproche également de celles de "santé" et de "fertilité du sol" (Andren et Balandreau, 1998).

Les fonctions du sol font intervenir un certain nombre de processus écologiques tels que le maintien de la production primaire, la régulation de la dynamique de la matière organique et des cycles des éléments nutritifs, le stockage du carbone et de l'eau, l'émission d'oxydes d'azote, de gaz carbonique et de méthane (Lavelle, 1996). L'intégrité des sols, actuellement menacée par différents phénomènes de dégradation, est d'une importance capitale pour la production de nourriture pour l'humanité (F.A.O., 1995) ou la régulation des flux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Jenkinson et al., 1991; Wallace, 1994).

I. 4. Régulation des processus du sol : le modèle hiérarchique général

Il existe un modèle hiérarchique général qui propose d'expliquer les processus du sol par une suite de facteurs, dont les effets potentiels sont déterminés par les échelles d'espace et de temps au sein desquelles ils agissent (Lavelle et al., 1993). Il s'agit d'une "hiérarchie de contrôle" (*sensu* Solbrig, 1991b), dans laquelle les facteurs opérant aux plus grandes échelles spatio-temporelles contrôlent les facteurs opérant aux échelles plus réduites. Il ne s'agit pas d'un modèle rigide, puisque les facteurs peuvent influencer une grande variété de processus prenant place à différentes échelles, et que localement l'importance relative des déterminants peut varier (Lavelle, 1996).

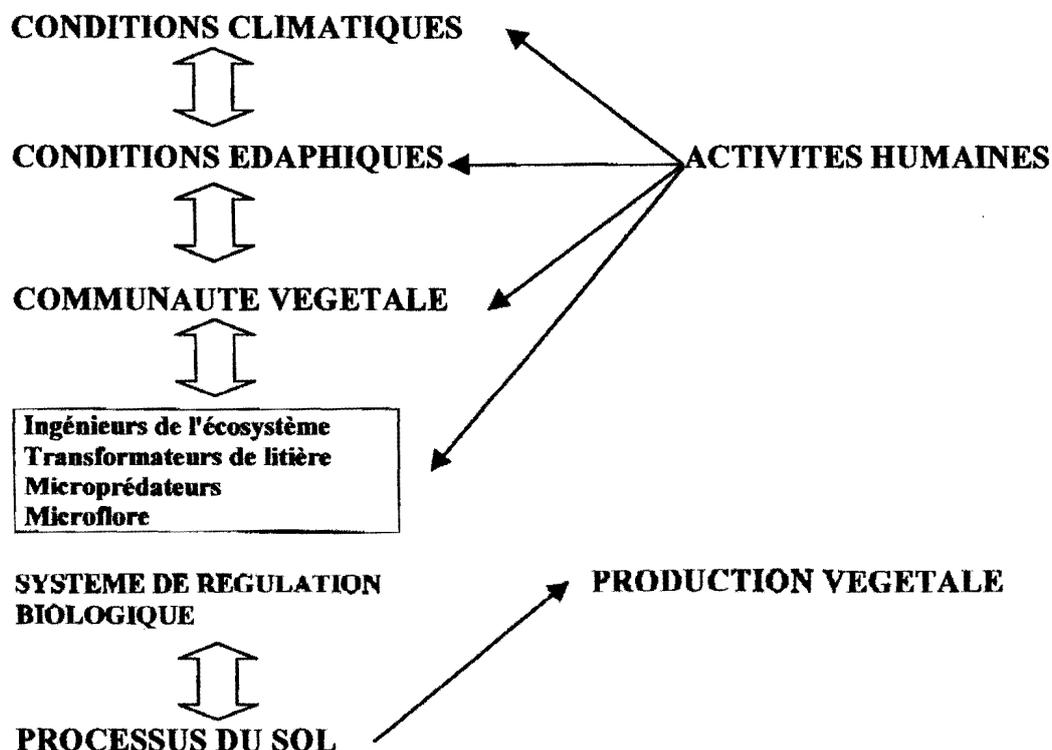


Figure 1 : Modèle hiérarchique des principaux facteurs déterminants les processus du sol (d'après Lavelle et al., 1993)

D'après le modèle, tous les processus sont susceptibles d'être influencés par le climat, puis par les facteurs édaphiques (principalement l'abondance et la nature des argiles et des éléments nutritifs). Viennent ensuite la qualité et la quantité de la matière organique produite par la végétation et apportée au système comme source de carbone et d'énergie. Au plus bas de l'échelle, on trouve les organismes vivants. L'intervention de l'homme, conditionnée par le niveau de la production végétale influence la plupart des facteurs concernés.

Tous les niveaux de ce modèle interagissent entre eux, et, dans certaines situations où les facteurs du haut de l'échelle ne sont pas limitants, la qualité des apports organiques ou l'activité de la faune devient déterminant dans la régulation des processus du sol. C'est le cas, par exemple, dans les sols tropicaux où ni le climat, ni les sols (pauvres en argiles actives) ne sont susceptibles de contrôler la décomposition de la matière organique et la formation de la structure du sol (Lavelle, 1996).

I. 5. La richesse taxonomique des sols

Le sol possède des communautés parmi les plus diversifiées de la planète (Giller et al., 1997). Les estimations font état de quelques 5 à 80 millions d'espèces, appartenant principalement à l'embranchement des arthropodes qui sont eux-mêmes en majorité des organismes vivants dans les sols (Ghilarov, 1977; Behan-Pelletier et al., 1993). Quelques grammes de sol peuvent contenir des centaines d'espèces de micro-organismes (Torvisk et al., 1994).

Malgré cette profusion de formes de vie, la connaissance de la taxonomie des organismes du sol reste très insuffisante (Lavelle, 1996; Giller, 1996; Brussaard et al., 1997; Giller et al., 1997). Selon les dernières estimations, les quelques 3600 espèces de vers de terre actuellement décrites ne représenteraient pas plus de la moitié du nombre réel d'espèces existantes (Reynolds, 1994; Fragoso et al., 1997). Cette méconnaissance est par ailleurs particulièrement prononcée lorsque l'on considère les sols tropicaux, qui sont pourtant actuellement les plus menacés par les changements liés à l'intensification agricole, et par la diminution de la biodiversité qui en découle (Giller et al., 1997).

I. 6. Les principales stratégies adaptatives de la faune du sol

Les invertébrés qui vivent dans le sol doivent faire face à trois contraintes principales. Ils se nourrissent d'une ressource de faible qualité, se déplacent dans un environnement compact et amphibie, et doivent être adaptés à survivre de façon occasionnelle dans des conditions extrêmes de température et d'humidité. Trois grandes stratégies ont été développées par la faune en réponse à ces contraintes, ce qui permet de distinguer (Swift et al., 1979; Lavelle et al., 1992; Beare et al., 1997) :

- **La microfaune** (<0,2 mm), qui a développé un mode de vie aquatique dans les pores du sol remplis d'eau. Elle peut survivre dans des conditions extrêmes de température et d'humidité. Ses représentants digèrent des substrats de faible qualité, mais sont limités par une faible capacité de déplacement leur interdisant l'accès aux ressources énergétiques difficilement accessibles. Ce sont principalement des nématodes et des protozoaires.
- **La mésofaune** (0,2 – 2 mm), qui se déplace dans les macropores et les fissures naturelles du sol. Ses représentants sont incapables de creuser des galeries, et sont donc généralement confinés dans la litière ou les premiers centimètres du sol. Ils ont développé certaines aptitudes à résister aux conditions extrêmes. Ce sont principalement des microarthropodes (collemboles, acariens...) et des petits oligochètes de la famille des enchytraeides.
- **La macrofaune** ou macroinvertébré (>2 mm), qui possède des capacités enzymatiques limitées, est peu apte à supporter des conditions environnementales extrêmes. Certains de ses représentant vivent dans la litière (coléoptères, larves de diptères, isopodes, myriapodes, arachnides...), alors que d'autres ont la capacité de se déplacer dans le profil du sol en y creusant des galeries (vers de terre, termites, fourmis, coléoptères).

La macrofaune est elle-même subdivisée en trois catégories (tableau 1) en fonction de la richesse de la ressource qu'elle utilise, et de l'endroit où se localise son activité dans le profile

du sol (litière, sous-sol, interface...) (Bouché, 1977; Lavelle et al., 1992; Anderson et Ingram, 1993) :

- **Les épigés** vivent et se nourrissent dans la litière. Ils se nourrissent de litière en décomposition, de champignons, de cadavres ou d'autres invertébrés. Ils sont impliqués dans la fragmentation, dispersion et la digestion d'une partie de la matière organique fraîche arrivant au sol.
- **Les anéciques** vivent dans des terriers ou des nids (fourmilières, termitières) et se nourrissent en partie dans la litière. Leur principale action est le morcellement et le transport de la litière de la surface vers les structures particulières de leurs domaines fonctionnels.
- **Les endogés**, vivent et se nourrissent dans le sol, de matière organique du sol (géophages) ou de racines mortes. On les divise en trois sous groupes suivant la richesse relative du sol qu'ils ingèrent (Lavelle, 1979) :
 - i) les polyhumiques quand le sol ingéré est plus riche que la moyenne des 10 ou 15 premiers centimètres
 - ii) les mésohumiques quand le sol ingéré est aussi riche que la moyenne des 15 premiers centimètres
 - iii) les oligohumiques quand le sol ingéré est moins riche que la moyenne des 15 premiers centimètres

UNITES TAXONOMIQUES	CATEGORIES ECOLOGIQUES
Vers de terre	Epigés/Anéciques/Endogés
Termites	Epigés/Anéciques/Endogés
Fourmis	Epigés/Anéciques
Coléoptères	épigés/Endogés
Arachnides	Epigés
Myriapodes	Epigés
Autres	Principalement Epigés

Tableau 1 : Principales unités taxinomiques et leur classification fonctionnelle (catégories écologiques) (d'après Anderson et Ingram, 1993).

I. 7. Classification fonctionnelle de la faune du sol

La fonction des invertébrés du sol dépend en grande partie de l'efficacité de leur système digestif (qui dépend lui-même du type d'interaction qu'il entretient avec la microflore du sol) et de la nature et de l'abondance des structures biogéniques qu'ils créent dans le sol (Lavelle, 1996, 1997). Sur la base de ces critères on distingue trois grands groupes fonctionnels d'invertébrés.

I.7.1. Les microprédateurs

Les invertébrés les plus petits, principalement des protozoaires et des nématodes de la microfaune qui ne produisent aucune structure organo-minérale (Lavelle, 1996, 1997). Leurs relations avec la microflore se limitent à des comportements de prédation. Ils participent aux microchaînes alimentaires incluant plusieurs niveaux de prédateurs (Hunt et al., 1987). L'effet principal de l'activité de ces organismes est une stimulation de la minéralisation de la matière organique, d'autant plus forte que la complexité de ces chaînes est grande (Ingham et al., 1985; Coûteaux et al., 1991).

I.7.2. Les transformateurs de la litière

Ce groupe comprend les représentants de la mésofaune et une partie de la macrofaune (Lavelle, 1996). Les déjections holorganiques de ces invertébrés servent d'incubateurs à la microflore. Leur nature purement organique en fait des structures à durée de vie potentiellement courte. Elles sont ensuite réingérées par les invertébrés qui assimilent alors les métabolites libérés par les activités microbiennes. Après une phase de minéralisation active, la matière organique est protégée dans ces structures, ce qui favorise la formation de molécules humifiées résistantes (Toutain et al., 1982). Dans certains cas, l'accumulation de ces déjections peut influencer de façon significative la formation des humus (Berthelin et al., 1979) ou altérer les minéraux argileux du sol (Jabiol et al., 1992).

I.7.3. Les ingénieurs écologiques

Les "ingénieurs de l'écosystème", ou "ingénieurs écologiques" (*sensu* Jones et al., 1994) sont des organismes produisant des structures physiques pérennes à travers desquelles ils modifient la disponibilité ou l'accessibilité d'une ressource pour d'autres organismes. Leur activité, et la production de ces structures biogéniques, sont susceptibles de conduire à des modifications de l'abondance ou de la structure d'autres peuplements d'organismes vivants sans mettre en jeu la moindre relation directe de type trophique (prédation, parasitisme, mutualisme, compétition) (Jones et al., 1994; Jones et al., 1997).

La notion d'espèces ingénieurs est rapprochée de celle d'espèces "clé de voûte" (*sensu* Paine, 1969) de type "modificateurs" (Mills et al., 1993; Bond, 1994; Blondel, 1995), ou de celle de métabiontes (*sensu* Garrès, 1887) de type pédoturbateur (Waid, 1997; Waid, 1998). Une distinction importante peut être faite entre ces trois concepts. Ainsi, les clés de voûte exercent une régulation sur de nombreuses autres espèces animales ou végétales, alors que les ingénieurs écologiques n'influencent parfois qu'une ou quelques espèces seulement (Jones et al., 1994). De même, les métabiontes sont indispensables à la survie d'au moins une espèce, à la différence des ingénieurs qui peuvent n'avoir qu'un effet discret ou même négatif sur les organismes dont ils régulent les ressources (Jones et al., 1997). Certains ingénieurs

écologiques correspondront donc à la définition d'espèce clé de voûte ou de métabiontes, sans pour autant que cela soit systématiquement le cas.

Parmi les innombrables formes de vie que renferme le sol, un petit nombre de macroinvertébrés (vers de terre, termites et fourmis) se distinguent par leur capacité à creuser le sol et à produire une grande variété de structures organo-minérales (déjections, nids, buttes) et de macropores (galeries, chambres). Ces organismes ont été décrits comme les ingénieurs écologiques du sol, et les structures qu'ils produisent ont été appelées structures biogéniques (Anderson, 1995; Lavelle, 1996, 1997). Le rôle fonctionnel de ces structures au sein de l'écosystème est probablement important puisqu'elles sont souvent les microsites privilégiés de certains processus pédologiques fondamentaux tels que la stimulation de l'activité microbienne, la formation de la structure du sol, la dynamique de la matière organique ou les échanges d'eau et de gaz. Elles sont aussi des éléments de base de la porosité et de l'agrégation du sol, qui déterminent les propriétés hydrauliques du sol et sa résistance à l'érosion (Anderson, 1995; Lavelle, 1996; Beare et Lavelle, 1998).

I. 8. Impact de la macrofaune sur le fonctionnement du sol

Les vers de terre et les macroinvertébrés en général, interviennent dans la régulation d'importantes fonctions du sol au travers des domaines fonctionnels qui leur sont associés.

I. 8. 1. Effets sur la dynamique de la matière organique

La minéralisation de la matière organique est dans un premier temps stimulée lors de sa fragmentation et de son transit dans le tube digestif des vers, puis protégée des phénomènes de décomposition dans les déjections stables (Lavelle, 1997) (Tableau 2). On ne connaît actuellement que peu de choses sur l'effet de tels processus sur le fonctionnement du sol à une plus grande échelle spatio-temporelle (Lavelle, 1997).

TIME	HOURS	DAYS/WEEKS	MONTHS	YEARS/DECADES
STRUCTURE	GUT CONTENT →	FRESH CATS →	AGEING CASTS →	SOIL PROFILE
EFFECT ON SOM	ASSIMILATION COMMINUTION	NUTRIENT RELEASE	PHYSICAL PROTECTION	ACCELERATION OF TURNOVER

Tableau 2. Effets des vers de terre sur la dynamique de la matière organique à différentes échelles de temps et d'espace (Lavelle, 1997). SOM : Soil organic matter

I. 8. 2. Effets sur les propriétés physiques du sol

En ingérant de façon sélective de grandes quantités de matériel minéral et organique, les vers de terre influencent les propriétés physiques du sol (Figure 2). Selon Lavelle (1978), ils consomment annuellement 1200 tonnes de sol par hectare et leur activité conduit à la

production de structures qui influencent directement les propriétés physiques du sol (Lavelle, 2000). La production d'importantes quantités de galeries et de chambres augmente la porosité totale, l'aération, la conductivité hydraulique et le drainage du sol (Aina, 1984; Lee, 1985; Lavelle, 1997).

La structure du sol est aussi influencée par la production d'importantes quantités d'agrégats organo-minéraux dus aux vers de terre (turricules, parois de galeries). Lorsqu'ils sont frais, les turricules sont instables. Par la suite leur stabilité est supérieure à celle des agrégats du sol de même taille (Blanchart et al., 1993; Marinissen, 1994). Par ailleurs, la taille de ces turricules détermine largement leurs effets sur la structuration des sols. Dans les savanes de Côte d'Ivoire, il a été démontré que la production de deux types de turricules par deux groupes de vers de terre qualifiés de "compactants" (produisant des turricules compacts de grande taille) et de "décompactants" (produisant des turricules de petite taille) est responsable de la formation et du maintien de la structure du sol (Blanchart, 1998). Cependant les effets à long terme des vers de terre sur la pédogénèse sont peu connus (Lavelle, 1997).

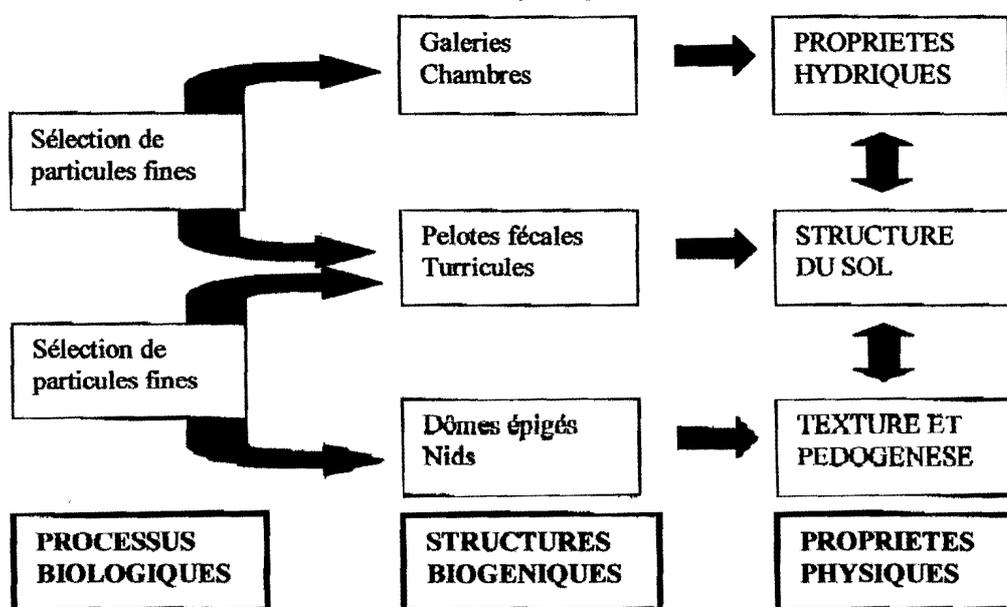


Figure 2 : Effets des ingénieurs écologiques du sol sur les propriétés physiques du sol (Lavelle, 1997).

I. 8. 3. Effets sur la croissance des plantes

Plusieurs travaux réalisés en milieux tempérés ont montré les effets des vers de terre sur la croissance des plantes. Dans leur grande majorité, ces effets ont été positifs, mais des effets nuls ou négatifs ont aussi été observés (Edwards et Lofty, 1980 ; Stephens et al., 1994). Des études similaires ont été réalisées en milieu tropical et ont conduit aux mêmes conclusions (Pashanasi et al., 1992; Spain et al., 1992; Gilot, 1997; Derouard et al., 1997; Boyer et al., 1999). La réponse des plantes semble proportionnelle à la biomasse des vers, et a été estimé que les effets des vers de terre se font sentir de façon significative à partir de 30g de matière fraîche de vers par mètre carré (Brown et al., 1999).

I. 9. Rôle des structures biogéniques

La quantité et la nature des structures biogéniques produites nous renseignent au moins partiellement sur l'importance et le type de fonction remplie par ces organismes (Jones et al., 1994, 1997). L'abondance et la diversité des structures sont sans doute importantes pour le maintien des fonctions du sol dans les écosystèmes. L'exemple des vers "décompactants" et "compactants" montre l'importance fonctionnelle de la diversité des structures produites par les ingénieurs écologiques. Dans des sols fortement perturbés où ne subsiste qu'une espèce du type compactant, la production de turricules conduit parfois à un tassement du sol et à une diminution de la croissance végétale (Barros et al., 1998). Selon l'hypothèse des biodiversités emboîtées (Lavelle, 1996), la reproduction de certaines structures a également des effets significatifs sur l'abondance et la diversité d'autres peuplements d'organismes du sol peu mobiles. La régulation de l'activité microbienne par celle des vers de terre a été documentée dans la littérature (Barois et Lavelle, 1986; Daniel et Anderson, 1992; Boyer et al., 1999) et a été appelée le "paradoxe de la belle au bois dormant" (Lavelle, 1996).

I. 10. Vers de terre, fonctions du sol et intensification agricole

La mise en culture des terres présente la particularité d'être soumise à des pratiques agricoles qui diminuent la richesse spécifique des communautés végétales et/ou animales (Swift et Anderson, 1994 ; Swift et al., 1996 ; Giller et al., 1997). Ces systèmes sont caractérisés par trois catégories d'organismes vivants (Swift et Anderson, 1994) :

1. les producteurs (plantes cultivées et herbivores domestiques)
2. les organismes ressource qui contribuent positivement à la productivité du système sans être directement utilisables par l'agriculteur (plantes de couverture et décomposeurs)
3. Les organismes destructeurs (adventices, ravageurs et parasites).

Les pratiques agricoles sont destinées à optimiser la production et à éliminer les organismes destructeurs et considèrent généralement le maintien des organismes ressource comme un Objectif secondaire (Beare et al., 1997).

Le concept d'intensification agricole décrit des changements dans la structure des agroécosystèmes qui accompagnent le passage d'une agriculture traditionnelle (extensive) à une agriculture moderne (intensive) (Swift et al., 1996). L'intensification sous entend trois types de changements :

1. l'utilisation plus fréquente de la même parcelle de sol (*i.e.* intensification de l'utilisation de la ressource)
2. l'augmentation de la spécialisation des espèces productives (*i.e.* perte de biodiversité de la couverture végétale)
3. le recours accru aux intrants (engrais, pesticides) et à la mécanisation (Swift et Anderson, 1994 ; Giller et al., 1997).

L'intensification agricole et les pratiques qui lui sont associées conduisent à des modifications environnementales qui diminuent le plus souvent la biodiversité du sol (Swift et al., 1996). L'intensité des changements occasionnés aux peuplements de vers de terre dépend grandement de l'amplitude des modifications environnementales induites par l'utilisation agricole du sol. La richesse spécifique est largement diminuée lorsqu'une forêt tropicale ou une savane est convertie en culture annuelle (Lavelle, 2000; Lavelle et Pashanasi, 1989;

Dangerfield, 1990; Decaëns et al., 1994; Fragoso et al., 1997). Inversement, peu de changements sont observés lorsque le système cultivé est fonctionnellement similaire à l'écosystème d'origine, comme par exemple dans le cas d'un pâturage dans une zone de savane (Decaëns, et al., 1994 ; Schneidmal et Decaëns, 1995) ou d'un système agroforestier en milieu forestier (Lavelle et Pashanasi, 1989 : Gilot et al., 1997 ; Fragoso et al., 1997).

Peu de travaux ont réussi à mettre en évidence qu'une perte de la diversité des peuplements de vers de terre peut véritablement conduire à une altération des fonctions des systèmes mis en cause (Giller et al., 1997 ; Fragoso et al., 1997). Néanmoins un certain nombre d'études ont montré la conversion de la forêt amazonienne en pâturages intensifs, qui conduit à une élimination des espèces natives de vers de terre au profit d'une espèce opportuniste dont l'activité intense conduit parfois à une compaction superficielle du sol (Barros et al., 1998). De même il a été observé en Inde dans les cultures de thé, une accumulation des feuilles mortes à la surface du sol corrélée à la disparition des vers de terre anéciques (Senapati, 1994). Le nombre d'espèces per se est peut être moins important pour le maintien des processus du sol que la présence de groupes fonctionnels accomplissant un rôle bien précis dans le système. Certains auteurs pensaient déjà qu'un important degré de redondance fonctionnelle existe au sein des communautés du sol (Andren et al., 1995) conférant ainsi aux systèmes une certaine stabilité fonctionnelle, spécialement face aux perturbations occasionnées par les pratiques agricoles (Giller et al., 1997).

Le concept de durabilité ("sustainability") des systèmes de production fait intervenir des notions écologiques et socio-économiques (Goodland, 1997). Du point de vue des fonctions de l'écosystème, on peut la définir comme la capacité d'un système à soutenir une production constante d'un produit désiré, tout en évitant la dégradation du milieu naturel (Swift et Anderson, 1994). Le sol occupe une place centrale dans les systèmes de production agricole et maintenir sa qualité et sa stabilité (i.e. résistance + résilience) face aux perturbations anthropiques constitue la base fondamentale de toute gestion durable (Thomas et Kevan, 1993 ; Beare et al., 1997).

Plusieurs études sont nécessaires afin de tester et de vérifier l'hypothèse selon laquelle une plus grande abondance et diversité de la macrofaune du sol et en particulier des peuplements de vers de terre pourraient conduire à une plus grande durabilité des agrosystèmes. Des pratiques agricoles adéquates devront ensuite être identifiées pour la conservation de l'activité et/ou de la diversité des peuplements.

I. 11. Sites et objectifs de l'étude

L'apport récent de l'agroforesterie et des couvertures végétales permanentes du sol permet de proposer des systèmes de culture stables dans un environnement protégé. La fixation d'une agriculture durable ne se conçoit qu'à partir de techniques de protection totale du capital sol associant les cultures principales à des couvertures herbacées comme ce la a été démontré dans de nombreuses régions du monde (Hargrove, 1991 ; Monegat, 1991 ; Seguy et al., 1996). Les systèmes de culture avec couverture végétale reposent sur 2 principes fondamentaux :

- i) le travail minimum du sol
- ii) une couverture végétale de façon quasi-permanente.

Durant les quatre dernière années (1999 à 2002), notre travail a consisté à qualifier et quantifier certains systèmes naturels et cultivés à base de couvertures végétales dans différents écologies de la Réunion. Pour ce faire, l'écosystème naturel étudié fut celui de la forêt de Saint Philippe et les agrosystèmes à base de couvertures végétales furent ceux situés dans les Hauts de l'Ouest (Hauts de Saint Paul avec culture de géranium, et dans les hauts de Trois Bassins avec cultures maraîchères) et dans le Sud (Saint Pierre, culture maraîchères). Pour diverses raisons, nous présenterons dans ce mémoire seulement les travaux réalisés dans la forêt de Saint Philippe et ceux dans les hauts de Trois Bassins. Les autres sites étudiés feront avec ceux présentés ici, l'objet de publications ultérieurement.

La première partie de ce travail s'est déroulée sur la commune de Saint Philippe dans le sud-est de l'île de la Réunion à 200 m d'altitude dans la région du Baril. Les parcelles étudiées sont au nombre de quatre : forêt secondaire non exploitée, forêt secondaire partiellement exploitée en sous bois, une parcelle déforestée sélectivement (manuellement) et une parcelle déforestée mécaniquement (machine agricole).

La seconde partie de l'étude, s'est déroulée dans les Hauts de l'Ouest sur la commune de Trois Bassins, au lieu dit Cocâtres à 1000 m d'altitude. Les travaux ont porté sur les cultures associées aux couvertures végétales.

Les principaux objectifs de ce travail ont été :

A Saint Philippe, d'évaluer l'impact des modes de gestion de la forêt sur les fertilités biologiques et chimiques du sol par l'analyse :

- des peuplements de macro-invertébrés du sol (macrofaune)
- des biomasses et des activités de la microflore du sol
- des éléments chimiques du sol

Dans les hauts de la commune de Trois-Bassins (Cocâtres), il s'agissait de vérifier l'impact des couvertures végétales associées aux cultures principales et l'utilisation de pesticides sur :

- les peuplements de macro-invertébrés du sol (macrofaune)
- la microflore du sol
- les éléments chimiques du sol

L'application de cette étude, est d'apporter aux agriculteurs des conseils basés sur la biologie du sol, quand au choix des pratiques culturales à adopter.

II. PRESENTATION ET METHODES

II. 1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

L'Ile de la Réunion se situe par 21° 07 de latitude Sud et 55°32 de longitude Est, dans l'Océan Indien occidental, à 800 km de Madagascar et 200 km de l'Ile Maurice.

D'une superficie de 2510 km², elle possède une forme générale ovoïde dont le grand axe mesure 70 km et l'axe transverse 50 km. Elle est constituée par la partie émergée d'un stratovolcan intraplaque, établi à partir d'un fond océanique de -4000 m (Le Piton des Neiges).

II. 1. 1. Contexte géologique

a) Le massif du Piton des Neiges (Chevalier, 1979)

Le Piton des Neiges a émergé il y a un peu plus de 3 millions d'années et les dernières phases de son activité datent de 10000/15000 ans. Deux unités géologiques ont été mises en place : la série des océanites constitue le bouclier primitif et présente 2 phases d'activité : les océanites anciennes zéolitisées, affleurant au fond des Cirques (phase sous - marine de l'édification); les océanites récentes, formées d'un empilement de coulées d'océanites et de basalte à olivine. La seconde est la série différenciée qui recouvre l'ensemble et se compose de basaltes alcalins et ses produits de différenciation (hawaïtes, mugéarites, benmoréites, trachytes).

Le volcanisme effusif du massif devient explosif dans la phase finale de son activité. C'est la période des laves différenciées concomitante du début de l'activité du Piton de la Fournaise. Les dernières émissions (-40000 à -15000 ans) sont de type pyroclastique.

Ces dépôts cendreux ont saupoudré la majeure partie des "Hauts" de l'île (Raunet, 1991). Ce matériau hétérogène est composé de cendrées, scories, ponces, tufs et lapillis. Il a atténué la topographie et constitue un substrat d'altération rapide sur lequel se sont différenciés les sols profonds de l'île, en particulier les sols andiques des versants Ouest et Sud.

b) Le massif du Piton de la Fournaise

Le Piton de la Fournaise s'est édifié il y a un peu plus de 500000 ans en s'appuyant sur le versant Est du Piton des Neiges et son activité se poursuit actuellement. Volcan de type hawaïen il est caractérisé par l'émission de laves très fluides.

II. 1. 2. Le Climat

L'île doit son climat contrasté à sa situation océanique, à sa latitude australe assez basse et à la "compacité" de son orographie et son altitude élevée.

La Réunion est donc soumise à un climat tropical austral à deux saisons : une saison fraîche et sèche de mai à novembre, durant laquelle l'alizé souffle du S-SE et une saison chaude et humide de décembre à avril, influencée par les courants de mousson du NE.

Sous l'influence de ces courants, l'île est divisée en deux zones : la côte au vent (2000 à 8000 mm de pluie/an) et la côte sous le vent (600 à 2500 mm de pluie/an). Un gradient altitudinal ajoute à la variabilité spatiale des précipitations, principalement sur le versant Est.

Durant la saison chaude, des dépressions tropicales pouvant évoluer en cyclones, sont responsables de la plus grande partie du total pluviométrique annuel et conditionnent la

grande variabilité inter annuelle observée. Les pluies de saison sèche présentent une certaine constance inter annuelle car elles sont généralement de nature orogénique, l'humidité de l'alizé se condensant sur la masse montagneuse de l'île.

L'humidité relative de l'air reste très élevée avec des valeurs minimales d'environ 50% et des maximales de plus de 90% sur la côte (Cadet, 1980). Dans les hauts de l'Ouest, la moyenne est d'environ 85% à 600 m et de 90% entre 1000 et 1500 m du fait des brouillards fréquents (Genere 1985).

L'insolation, importante en zone côtière (8 h/jour en moyenne) est largement réduite (4 à 5 h) dans les Hauts de l'Ouest par l'enneuagement. L'insolation atteint un minimum vers 1 100-1 500 m d'altitude (3h 30/j) (Genere, 1985).

Les températures varient principalement en fonction de l'altitude ; le gradient est de - 0,7°C pour 100 m en moyenne. Sans relation nette avec l'altitude, l'amplitude thermique journalière est comprise entre 6 et 9°C.

II. 1. 3. La végétation naturelle (Cadet, 1980)

La végétation naturelle de la Réunion est zonée en ceintures subcirculaires et étagée suivant l'altitude et la pluviométrie.

Cadet (1980) distingue quatre grands ensembles phyto-écologiques fondamentaux : la série mégatherme semi - xérophile, la série mégatherme hygrophile, la série mésotherme hygrophile et la végétation éricoïde oligotherme des hautes altitudes.

Les séries mégathermes de moyenne et basse altitude ont été en grande partie éliminées ou fortement dégradées par l'homme, les formations végétales naturelles (endémiques ou introduites) occupent principalement les Hauts, les ravines et le littoral Ouest sec.

La végétation forestière s'étend dès 700 m dans l'Est et commence par une bande forestière d'espèces introduites (*Psidium cattleianum*, *Eugenia jambos*...) et passe ensuite à une forêt primitive de bois de couleur, de type mégatherme hygrophile (*Cyathea spp*, *Pandanus montanus*) puis mésotherme (*Acacia heterophylla*, *Nastus bornicus*). Dans l'Ouest, une bande littorale sèche est couverte d'une savane semi-aride (*Heteropogon contortus*) ou arbustive (*Leucaena glauca*). Entre 1200 et 2000 m s'étend tout d'abord une zone à *Acacia decurrens* et *Lantana camara* puis l'étage à tamarins des Hauts et nattes (*Acacia heterophylla*, *Nastus borbonicus*). Au delà de 2000 m l'ensemble est couvert par une végétation éricoïde à base de *Phillippia montana*.

La flore de l'île est d'une grande richesse. Parmi la flore indigène on estime ainsi que 90% des espèces sont endémiques des îles du Sud-Ouest de l'océan Indien (Madagascar, Comores, Mascareignes), 60% n'existent qu'aux Mascareignes (Maurice, Réunion, Rodrigues) et que 30% sont endémiques strictes à la Réunion.

II. 1. 4. Cultures et productions agricoles

Plus de la moitié des surfaces agricoles (53%) est occupée par des cultures industrielles (principalement canne à sucre et plantes à huiles essentielles). La canne à sucre occupe 50% des surfaces agricoles. Le sucre reste la première exportation en volume et en valeur (80%) (Direction de l'Agriculture et des Forêts, 1996). Le système à base de géranium et les cultures vivrières des Hauts sont superposés géographiquement à la couverture de sols andiques d'altitude à fortes contraintes.

a) La canne à sucre

Dans le Nord, l'Est et le Sud de l'île, le littoral jusqu'à 500 m est largement dominé par la canne à sucre. Dans l'Ouest elle s'étend de 400 à 1000 m (33200 ha en 1990 pour une surface agricole utile totale de 63600 ha). La superficie moyenne des exploitations est de 3,17 ha. Le sucre en est le produit principal (195000 tonnes en 1995, essentiellement exporté), accompagné de production de rhum et dérivés (mélasses...).

D'autres spéculations s'associent au système cannier dans l'Est de l'île : la vanille (340 ha et 27 tonnes produites en 1999), les fruitiers tropicaux (bananes et ananas). On observe un développement des cultures légumières (3550 ha en 1990). En altitude, la polyculture-élevage se substitue par place à la canne.

b) Les systèmes de culture à base de géranium

Le géranium (pélargonium à parfum) est une plante ligneuse buissonnante, sarclée et peu couvrante. Cette culture est menacée par la baisse de fertilité, l'érosion des substrats, les problèmes phytosanitaires, ainsi que de profondes mutations socio-économiques (diminution des actifs agricoles de la zone, "professionnalisme" des agriculteurs séduits par d'autres spéculations : élevage, horticulture...).

En 1999 la culture du géranium couvrait 443 ha, dont plus de 50% dans la zone des Hauts de l'Ouest, en une bande de 70 km entre 1000 et 1200 m. Il est associé à des cultures vivrières (maïs, haricot et légumes) et à des fruitiers tempérés. En 1999, 15,3 tonnes d'huiles essentielles ont été produites.

Depuis plusieurs années, la recherche (CIRAD) et le développement (Chambre d'Agriculture, A.P.R., S.A.F.E.R.) s'associent pour proposer des moyens pour augmenter la production agricole. Ces solutions passent par la mise au point et la vulgarisation d'itinéraires techniques adaptés et doivent permettre un nouvel essor pour une spéculation dont on connaît les potentialités et dont l'huile essentielle reste, en valeur, la deuxième production d'exportation après le sucre (Chastel, 1990).

c) Autres productions

Depuis quelques années on observe le développement récent et significatif de deux secteurs :

- l'élevage (naisseur et laitier) entre en concurrence avec le géranium dans les zones d'altitudes de l'Ouest (1300-1500 m), dans les Hauts du Sud et dans les zones des plaines, ou avec la canne dans le Nord. La production laitière totale est passée de 183400 hl en 1986 à 314000 en 1995. Les effectifs des animaux (bovins, caprins, porcins et ovins) sont passés de 132000 en 1986 à 144500 en 1995.

- les cultures légumières et fruitières, alternatives à la canne dans le Sud et le Nord de l'île. Leur production a été multipliée par deux en l'espace de sept années (D.A.F., 1996).

Quelques plantes traditionnelles ont vu leur production chuter ces dernières années ou sont même menacées à court terme (tabac, vétiver...).

La production de céréales est passée de 2 000 q/ha à 131 000 q/ha. Jusqu'à 1992 on rencontrait parmi les céréales la production de maïs et de riz. Depuis seul le maïs est produit. Son rendement est de 33,4 q/ha.

II. 2. Les sols

II. 2. 1. Présentation générale

Raunet (1988) considère que les andosols et les sols à caractères andiques couvrent près de la moitié de l'ensemble de l'île.

En 1960, Riquier classait ces sols en ferralitiques bruns ou beiges. La connaissance analytique des matériaux andiques se précise dès cette époque et l'on décrit des séquences altitudinales et climatiques de sols développés sur matériaux volcaniques dans de nombreux pays (Quantin, 1972; Rosello, 1982).

La toposéquence des sols du flanc Ouest du Piton des Neiges est décrite et montre le déterminisme de l'altitude, donc du climat sur le passage progressif des sols ferralitiques aux andosols, puis à la podzolisation à haute altitude (Zebrowski 1975). A partir de ces résultats, une nouvelle carte est établie et fait apparaître les sols ferralitiques andiques et les andosols (Riquier & Zebrowski, 1975; Brouwers, 1984). Une série d'études à l'échelle de 1/25 000 est réalisée (Brouwers & Raunet, 1981; Brouwers, 1982 et 1984) et aboutit à une carte morphopédologique, établie en 1988 à l'échelle du 1/50 000 (Raunet, 1988).

Gense (1976) a défini les séquences minéralogiques d'altérations dominantes suivantes. Sur les versants humides : Gibbsite+Allophanes/Halloysite/Métahalloysite. Sur le versant Ouest : Gibbsite+Allophanes/Halloysite/Métahalloysite/Smectites.

Dans l'Ouest de l'île depuis le littoral, se succèdent vertisols, bruns ferruginisés, bruns, bruns andiques, andosols. Sur les versants plus humides, la séquence schématique est la suivante : sols ferralitiques à argiles halloysite et kaolinite, ferralitiques andiques, andosols.

II.2.2. Principaux sols

Les principaux sols cultivés sont des andosols andiques (Est, Hauts de l'Ouest et du Sud), des sols ferralitiques (Nord et Sud) et des sols brunifiés (Ouest et Sud).

Les sols colluvionnés et caillouteux des Cirques, souvent andiques ou brunifiés, constituent un substrat agricole à part, très morcelé (îlets).

Les sols peu évolués sur alluvions récentes à galets et les sols argileux sur alluvions fines occupent des zones marginales au plan de la mise en valeur agricole.

II. 3. Sites d'étude

II. 3. 1. Saint Philippe

La région de Saint Philippe est située sur les "roches mères" des sols du massif de la Fournaise. Les "coulées récentes" (dans le sens géologique du terme) se situent au nord et sud de la caldera actuelle et du Grand Brûlé (Enclos), c'est à dire entre les remparts de Basse Vallée et du Tremblet d'une part, entre les remparts de la Ravine Constantin et de Bois Blanc d'autre part. Cette zone appartient à la région la plus humide de l'île, avec 3 500 à 6 000 mm de pluies annuelles (Raunet, 1991).

A basse altitude, la critère "fragmentation racinaire des grattons" avec légère accumulation organique (permettant une certaine utilisation agricole) est le seul élément utilisable pour distinguer les coulées récentes des coulées sub-actuelles.

Sur la côte, seule les coulées récentes entre le Baril et l'Îlet aux Palmistes, en dessous de 300 mètres d'altitudes, permettent, avec difficulté, de cultiver de la canne à sucre.

Dans presque toute la bande située en dessous de 600-650 mètres d'altitude, la végétation forestière naturelle autochtone (forêt hygrophile mégatherme) a été éliminée. Elle est remplacée jusqu'à 150-370 mètres sur les coulées récentes par la culture de la canne. C'est également la région de la vanille sur tuteur (vacoas, filao, goyavier). L'ONF a pratiqué quelques reboisements en exotiques (Cryptomeria et camphrier à Basse Vallée) et régénérations d'indigènes ("Petite Natte" et "Grande Natte"). Il existe une réserve naturelle à Mare Longue, rare témoin de la forêt mégatherme de basse altitude.

Tout ce qui est situé au-dessus de 600 mètres, encore intact (forêt hygrophile mégatherme puis mésotherme) est classé en réserve biologique domaniale

Après une litière peu épaisse, le sol se réduit à un horizon de 10 à 20 cm d'épaisseur, gris sombre à noirâtre, humide, composé de racines et débris organiques peu humifiés mélangés à des graviers et cailloutis anguleux scoriacés, souvent à revêtement jaunâtre. Il n'y pratiquement pas de terre fine. Le pH de ce matériau est de 5,5 à 5,7 près du littoral pour descendre régulièrement jusqu'à 4,0-4,5 à 1 800 mètres d'altitude.

II. 3. 2. Hauts de Trois-Bassins (Cocâtres)

Dans l'Ouest, l'ensemble des sols est développé sur les cendres épanchées lors des phénomènes explosifs marquant la fin de l'activité du piton des neiges. Ces cendres ont recouvert les coulées basaltiques et andésitiques de la phase IV de l'activité effusive du Piton des neiges (-230 000 à -70 000 ans). A Cocâtres, il s'agit d'un andosol chromique désaturé sur cendres. Les andosols non perhydratés des "hauts" sont exposés à l'érosion pour plusieurs raisons combinées : topographiques, climatiques, pédologiques, agro-socio-économiques.

Les andosols non perhydratés sont à l'origine de quelques problèmes agronomiques, d'ordre physique, hydrique, organique et chimique, plus ou moins interdépendants, résultant de leurs propriétés particulières. A cela s'ajoutent naturellement les contraintes topographiques du milieu (Raunet 1991).

II. 4. MÉTHODOLOGIE

II. 4. 1. Échantillonnage de la faune (macrofaune) du sol

La méthode d'échantillonnage utilisée fut celle recommandée par le programme "Tropical Soil Biology and Fertility" (Lavelle & Pashanasi, 1989; Anderson & Ingram, 1993).

Pour chaque parcelle analysée, dix monolithes de sol de 25 x 25 x 30 cm ont été prélevés séparés de cinq mètres d'intervalle sur une ligne dont l'origine et la direction furent déterminées au hasard (Schéma 3). Un cadre de 25 cm de côté est utilisé pour marquer l'emplacement du monolithe, qui est isolé en creusant une tranchée de 20 cm de large tout autour. Après avoir récupéré la litière, on découpe le monolithe en 3 couches successives de 10 cm d'épaisseur. Chaque groupe faunistique est trié et séparé sur le terrain après identification à l'œil nu d'après Bachelier (1978) et Roth (1980) et certaines vérifications ont été effectuées plus tard au laboratoire sous la loupe binoculaire, sur du matériel fixé. Chaque couche de sol étant ensuite triée à la main et tous les invertébrés visibles à l'œil nu sont prélevés et fixés à l'alcool 75°. Les vers de terre sont conservés dans du formol à 4%. Les principaux groupes identifiés sont : les Vers de terre, les larves de Coléoptères, les larves de Diptères, les Fourmis, les Diplopodes, les Chilopodes les Isopodes et un groupe "autre" qui comprend quelques rares Coléoptères adultes, Dermaptères, Némertes, Gastéropodes et stades larvaires de Lépidoptères.

L'étude de la macrofaune porte sur les densités et les biomasses. Les macro-invertébrés conservés dans l'alcool et le formol ont un poids inférieur à leur état d'origine. La biomasse est réajustée en utilisant des coefficients de corrections (déterminés par mesures des animaux vivants). Les différents coefficients sont de 24% pour les Vers de terre (poids du ver de terre frais = poids du ver dans le formol x 1,24; idem pour les autres coefficients), 15% pour les Crustacés, 15% pour les "autres", 12% pour les larves de Coléoptères et les larves de Diptères, 10% pour les Fourmis et 6% pour les Myriapodes.

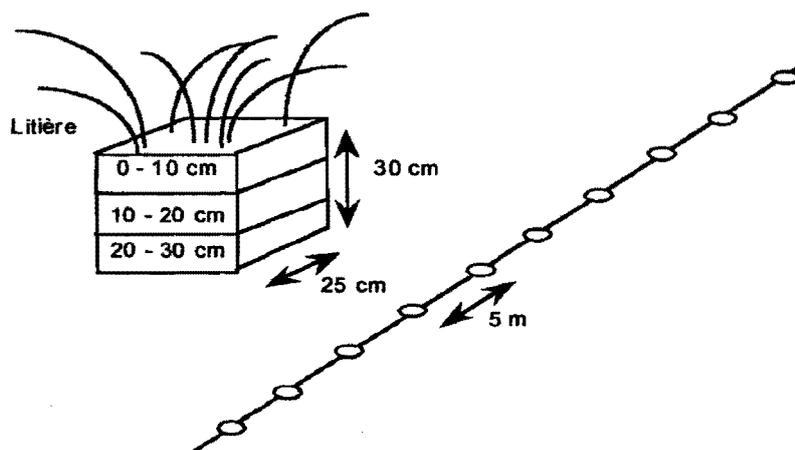


Schéma 1 : Méthode de prélèvement T.S.B.F.(Anderson & Ingram, 1993)

bécher avec 50 ml de CHCl_3 (et quelques pierres ponce) est placé dans le dessiccateur: ce CHCl_3 a été préalablement lavé 3 - 4 fois dans une ampoule à décanter à l'eau déminéralisée (et non distillée, celle ci pouvant contenir des matières organiques), afin d'éliminer l'éthanol utilisé comme stabilisant.

Le dessiccateur est mis sous vide à l'aide d'une pompe. On estime que le vide est suffisamment établi lorsque le CHCl_3 bouillonne légèrement. La fumigation se poursuit pendant 16 h.

Au bout de 16 h, le vide est cassé, on rince à l'air 3 ou 4 fois le dessiccateur en ayant soin de piéger les vapeurs de CHCl_3 . Les échantillons de sol sont récupérés et mis en contact avec 200 ml de K_2SO_4 0,05 N pendant 45 mn à température ambiante et sur un agitateur rotatif. Ils sont ensuite centrifugés à 3500 tr pendant 10 mn.

Parallèlement les échantillons "témoins" ne subissant pas de fumigation sont extraits de la même manière pendant 1 h.

b) Coefficients de minéralisation du carbone

Pour le dosage du gaz carbonique, nous avons utilisé méthode de Dommergues (1960). Les échantillons de sol sont placés dans des bocaux hermétiques avec un flacon de soude dont le titre est connu. A raison d'une fois par semaine durant 5 semaines, la soude est titrée avec du HCl. Les valeurs obtenues sont rapportées au carbone du sol.

c) Analyses enzymatiques

La mesure de l'activité phosphomonoestérase est basée sur la mesure colorimétrique du para-nitrophénol (pN) libéré après incubation du sol dans une solution de para-nitrophénylphosphate disodique tamponnée à pH 6,5 pour l'étude de l'activité phosphatase acide et à pH 11 pour la mesure de l'activité phosphatase alcaline Méthode Tabatabai, 1982). Le choix des valeurs de pH des tampons MUB (Modified Universal Buffer, Skujins et al., 1962) est basé sur des études montrant que le maximum d'hydrolyse enzymatique du substrat survient dans des solutions tamponnées au pH ajusté de 6,5 et 11.

II. 4. 4. Méthodes Statistiques utilisées

Les différentes analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel STAVIEW sur ordinateur Macintosh (Feldman *et al.*, 1987). Le test paramétrique utilisé est celui de l'ANOVA (analyse de la variance) aux seuils de probabilité $\leq 0,05$; $\leq 0,1$.

Les tests non paramétriques utilisés sont ceux de U de Mann-Whitney au seuil de $\leq 0,05$ et de Kruskal-Wallis au seuil de $\leq 0,05$.

III. RESULTATS :

Forêt de Saint Philippe

III. 1. ETUDE DES PEUPELEMENTS DE LA MACROFAUNE DU SOL EN FONCTION DES MODES DE GESTION DES SITES ETUDIES

Cette étude a pour objectif de vérifier si les modes de gestion des parcelles forestières (forêt secondaire non exploitée ou partiellement, parcelle déboisée de façon sélective à la main et mécaniquement au bull), influaient sur les populations de macro-invertébrés (macrofaune) du sol.

III. 1. 1. Densités

Les macro-invertébrés trouvés sur les quatre sites étudiés ont été déterminés et les groupes taxonomiques ont été considérés en fonction de leur fréquence. Sur cette base, les principaux groupes étudiés sont : les Araignées, les Chilopodes, les Coléoptères (adultes), les Crustacés, les Diplopodes, les Fourmis, les larves de Coléoptères, les larves de Diptères, les larves de Lépidoptères, les Vers de terre et le groupe "Autres" (qui comprend quelques rares espèces rencontrées comme des coquilles vides de gastéropodes, punaises ...).

L'étude des densités moyennes totales, exprimées en nombre d'individus par mètre carré (Nb ind.m⁻²) fait apparaître trois groupes de situations pour les prélèvements effectués en Août 1999 (Figure 1) :

1. un groupe où l'on trouve la plus forte valeur dans le cas de la forêt non exploitée (445 ind.m⁻²).
2. un groupe intermédiaire avec des valeurs moyennes (de 192 à 232 ind.m⁻²) retrouvées sous la forêt partiellement exploitée et dans la parcelle déboisée de façon sélective.
3. et enfin le dernier groupe avec la parcelle déboisée de façon mécanique où la plus faible densité de la macrofaune est rencontrée (38 ind.m⁻²).

Six mois plus tard, en Janvier 2000 les mêmes sites ont été échantillonnés et les résultats montrent encore trois groupes (Figure 2) :

1. le premier avec la forêt non exploitée où la plus forte densité est retrouvée comme en 1999 (317 ind.m⁻²).
2. un second groupe intermédiaire qui comprend la forêt exploitée partiellement (181 ind.m⁻²).
3. un troisième groupe avec les parcelles déboisées, manuellement (59 ind.m⁻²) et mécaniquement (45 ind.m⁻²).

En 1999 les différences entre les trois groupes sont significatives ($p \leq 0,05$). En Janvier 2000, les différences ne sont pas significatives entre les deux forêts (partiellement ou pas exploitées), de même qu'entre les deux modes de déforestation (sélective et mécanique).

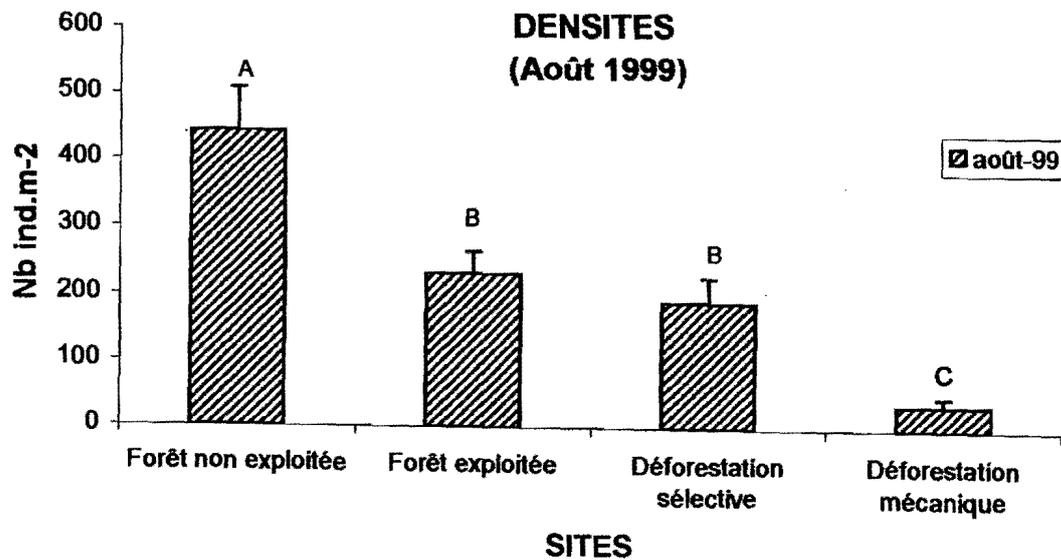


Figure 1 : Densités moyennes totales de la macrofaune du sol, en nombre d'individus par mètre carré (Nb ind.m⁻²). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

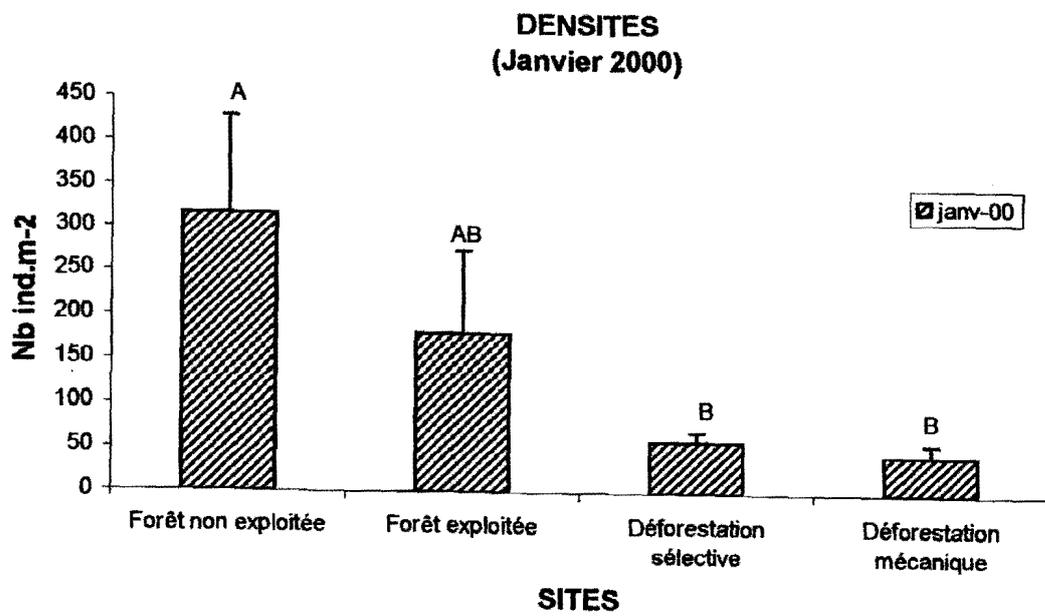


Figure 2 : Densités moyennes totales de la macrofaune du sol, en nombre d'individus par mètre carré (Nb ind.m⁻²). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

III. 1. 2. Biomasses

Les biomasses moyennes totales sont exprimées en gramme par mètre carré (g.m^{-2}).

L'analyse des biomasses moyennes totales des quatre sites fait ressortir trois groupes pour l'année 1999 (Figure 3) :

1. Le groupe où les plus fortes biomasses sont retrouvées avec la forêt non exploitée ($21,52 \text{ g.m}^{-2}$) et la déforestation sélective ($27,79 \text{ g.m}^{-2}$).
2. La forêt partiellement exploitée avec une biomasse de 10 g.m^{-2} .
3. Et la parcelle déboisée mécaniquement avec la plus faible biomasse $0,27 \text{ g.m}^{-2}$.

En janvier 2000 l'analyse montre une diminution significative des biomasses dans les différents sites étudiés (Figure 4) à l'exception de la parcelle déboisée mécaniquement où sa biomasse passe de $0,27 \text{ g.m}^{-2}$ à 1 g.m^{-2} . Les différences observées ne sont pas significatives ($p \leq 0,05$).

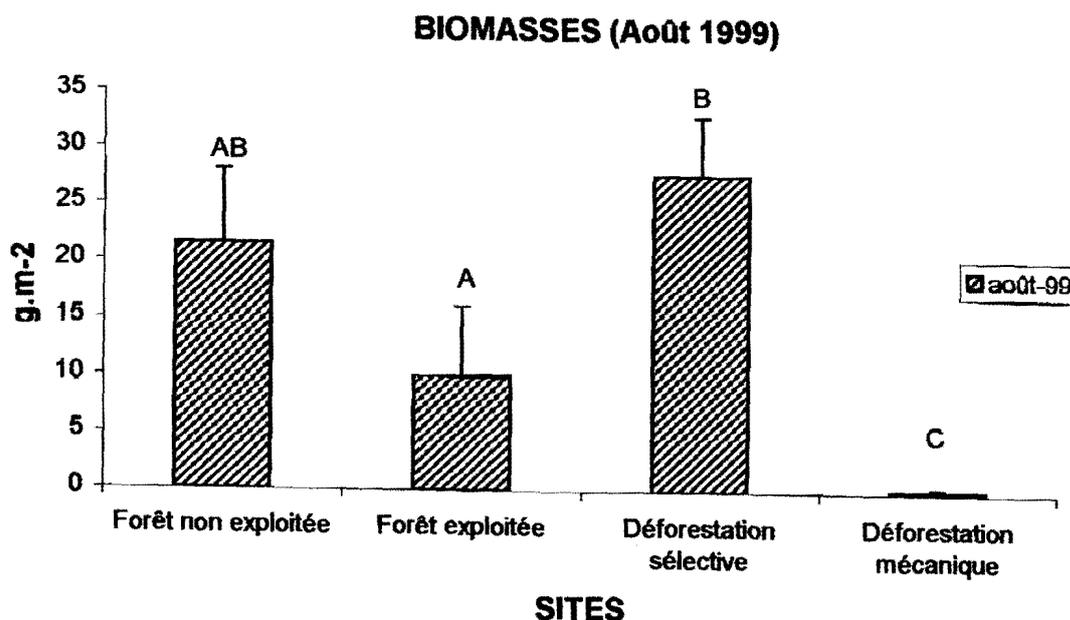


Figure 3 : Biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol, en gramme par mètre carré (g.m^{-2}). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

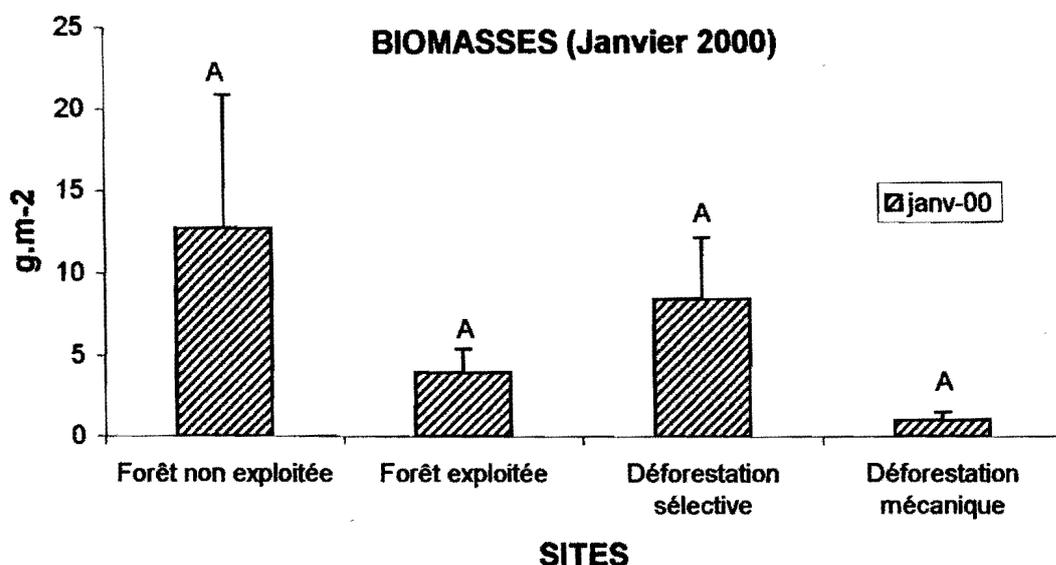


Figure 4 : Biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol, en gramme par mètre carré (g.m⁻²). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

III. 1. 3. Distribution des différents groupes de la macrofaune du sol

Les différents prélèvements effectués sur ces deux périodes (août 1999 et janvier 2000) ont permis de regrouper les différentes espèces animales en 11 groupes taxonomiques.

On observe une diminution de la diversité biologique en fonction du mode de gestion de la forêt. Effectivement, en 1999, on passe de 10 groupes taxonomiques sous forêt non exploitée à 8 sous forêt partiellement exploitée, à 7 sous parcelle déboisée sélectivement et à 3 sous déforestation mécanique (Figure 5).

Pour le mois d'août 1999, l'analyse des densités moyennes par groupes montre que la forêt non exploitée est caractérisée par les densités des vers de terre, des crustacés et des larves de coléoptères (Figure 5). La parcelle déboisée manuellement se caractérise par une forte présence de vers (près de 73% de la population moyenne totale). La parcelle déboisée mécaniquement présente une forte densité pour le groupe "Autres".

L'étude des biomasses par groupe pour la même période (1999) (Figure 6), montre de façon significative l'impact de la biomasse des vers de terre par rapport à la biomasse moyenne totale de la population de macro-invertébrés. Elle représente plus de 80% (jusqu'à 98% pour la parcelle déboisée de façon sélective) de la biomasse totale.

**Densités des différents groupes de la macrofaune
(Août 1999)**

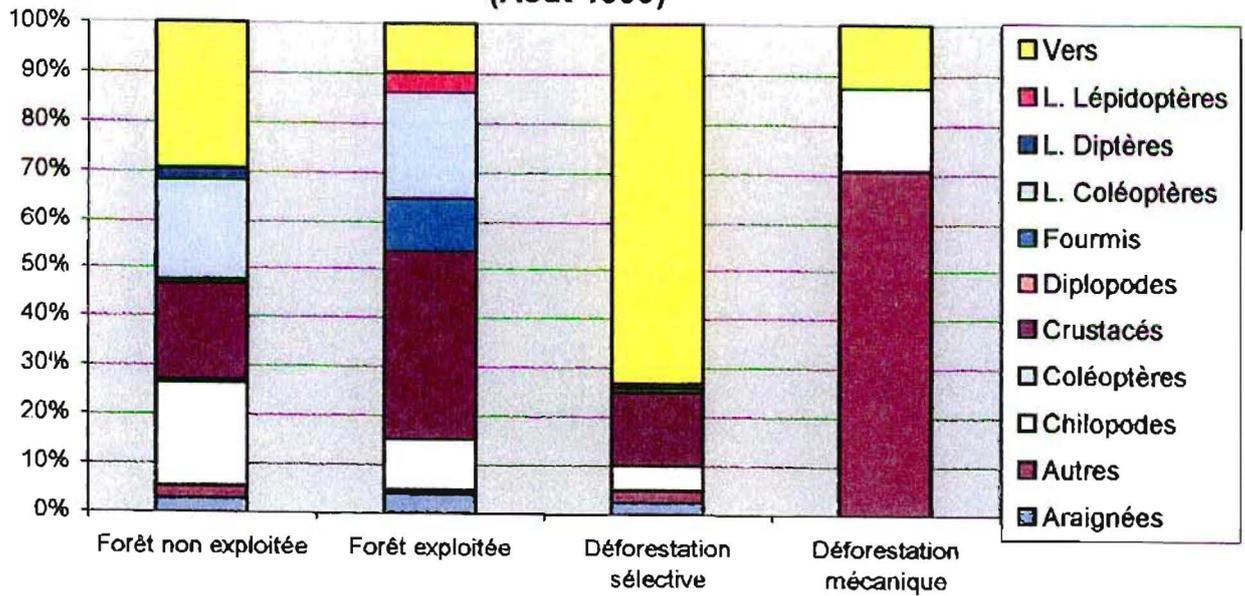


Figure 5 : Densités moyennes de chaque groupe de la macrofaune du sol en pour-cent de la densité moyenne totale pour les quatre sites étudiés (1999).

**Biomasses des différents groupes de la macrofaune
(Août 1999)**

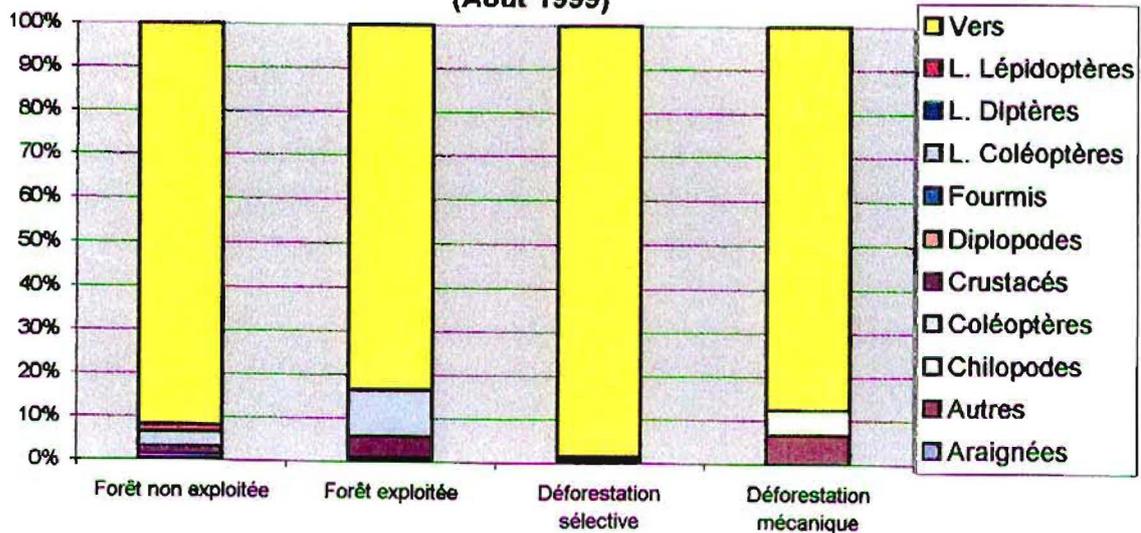


Figure 6 : Biomasses moyennes de chaque groupe de la macrofaune du sol en pour-cent de la biomasse moyenne totale pour les quatre sites étudiés (1999).

La seconde série de prélèvement réalisée en janvier 2000 montre une augmentation de la diversité biologique sous la parcelle déboisée mécaniquement puisqu'elle passe de 3 en 1999 à 6 taxons en 2000. Les forêts (exploitées ou pas) possèdent toujours une plus grande biodiversité (Figure 7).

En comparaison avec août 1999, on observe la présence forte des fourmis dans trois sites. Leurs densités varient de 27% à 46% selon les sites étudiés (Figure 7). Il semble y avoir une répartition plus homogène des différents groupes en cette période de l'année. Comme au mois d'août 1999, la parcelle déboisée manuellement (déforestation sélective) est caractérisée par les fortes densités de vers de terre (73% en 1999 et 65% en 2000) (Figures 5 et 7).

La répartition des biomasses est identique à celle observée en 1999. On constate que lorsque les vers de terre sont présents, leurs biomasses représentent plus de 50% de la biomasse moyenne totale de la population. Elles varient de 94% à 99% selon les sites (Figure 8).

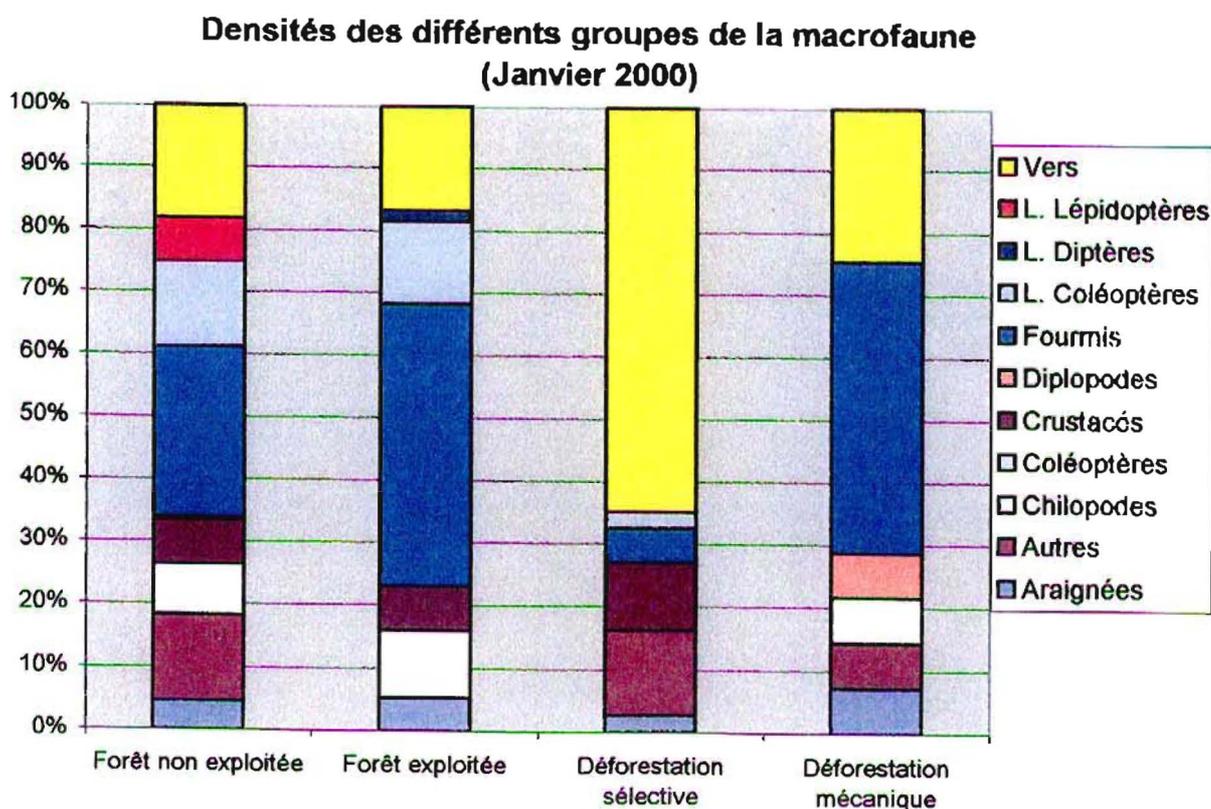


Figure 7 : Densités moyennes de chaque groupe de la macrofaune du sol en pour-cent de la densité moyenne totale de la population pour les quatre sites étudiés (2000).

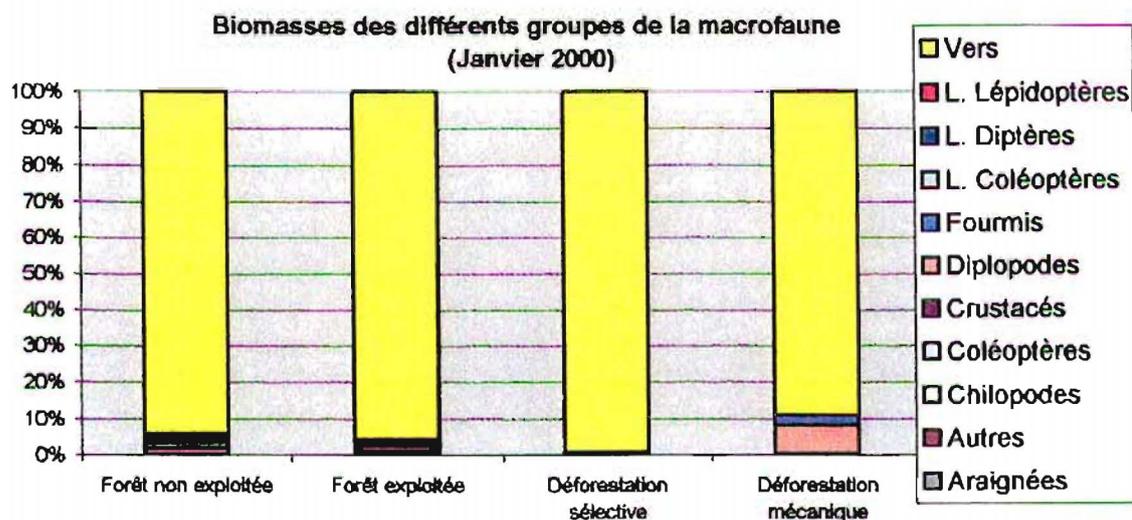


Figure 8 : Biomasses moyennes de chaque groupe de la macrofaune du sol en pour-cent de la biomasse moyenne totale de la population pour les quatre sites étudiés (2000).

III. 1. 4. Discussion

L'analyse des densités et des biomasses moyennes totales en 1999, fait ressortir trois groupes bien distincts :

- a) Un premier groupe correspondant à la forêt non exploitée avec les valeurs de densités et de biomasses les plus élevées. Cette parcelle est caractérisée par les densités de quatre taxons : les vers (29% de la densité moyenne totale), les larves de Coléoptères (21%), les Chilopodes (21%) et les Crustacés (19,78%). En parallèle, la biomasse de ce site est caractérisée par celle des vers de terre qui représente 91,85% de la biomasse moyenne totale.
- b) Un second groupe où l'on retrouve des valeurs intermédiaires, qui comprend la forêt exploitée partiellement et la parcelle déboisée manuellement (déforestation sélective). La forêt exploitée est caractérisée par les densités des Crustacés (38,66%) et des larves de Coléoptères (20%). La parcelle déboisée manuellement se caractérise par la forte densité des vers de terre (73% de la densité moyenne totale de la population). Les biomasses moyennes totales de ces deux sites sont caractérisées par celles des vers de terre (83% pour la forêt exploitée et 98% pour la déforestation sélective).
- c) Un troisième groupe où les plus faibles valeurs de densités et de biomasses sont retrouvées sous la parcelle déboisée mécaniquement. Ce site est caractérisé essentiellement par la densité du groupe "Autres" qui représente 70,86% de la densité moyenne totale de la population. Comme dans les trois précédents sites, sa biomasse est caractérisée par celle des vers de terre (87% de la biomasse moyenne totale).

En janvier 2000, l'analyse des densités montre également trois groupes mais ces derniers sont statistiquement moins définis. Nous avons :

- a) Un premier groupe avec la plus forte densité moyenne totale qui comprend la forêt non exploitée. Ce site en cette période est caractérisé par quatre taxons : les Fourmis (27,27%), les Vers de terre (18,18%), les larves de Coléoptères (13,6%) et le groupe "Autres" (13,6%). La biomasse moyenne totale de la population est, comme en août 1999, caractérisée par celle des vers de terre avec 94%.
- b) Un second groupe où l'on retrouve par sa densité absolue la forêt exploitée. Elle est caractérisée principalement par la densité des Fourmis (45%), celle des Vers de terre (16,86%) et celle des larves de Coléoptères (13%). La biomasse des vers de terre représente 95,6% de la biomasse moyenne totale de la population.
- c) Un troisième groupe comprenant les deux parcelles déboisées avec les plus faibles densités. La déforestation sélective est caractérisée par la densité des vers de terre (64,8%). Les fourmis et les vers de terre sont les plus nombreux sous parcelle déboisée mécaniquement avec respectivement 46% et 24,5%. Dans ces deux sites la biomasse des vers de terre représente plus 90% de la biomasse moyenne totale de la population.

Les valeurs de densités et de biomasses de la population sont plus faibles en 2000 par rapport à 1999. Cela peut s'expliquer par les conditions climatiques et surtout la pluviométrie plus importante en été (janvier 2000), qui lorsqu'elle est trop élevée inhibe le développe de certains groupes de la macrofaune, comme les vers de terre. La diversité biologique est plus élevée dans les parcelles boisées (forêt exploitée ou pas) et elle varie en fonction des saisons.

La parcelle déboisée manuellement, de façon sélective, est caractérisée aussi bien en saison sèche qu'en saison humide (été et hiver austral) par les vers de terre. En période sèche et froide, les vers de terre caractérisent deux sites (forêt non exploitée et déforestation sélective) et les quatre sites en saison chaude et humide (janvier). Quand à la biomasse moyenne totale des populations dans les quatre sites étudiés, on observe qu'elle est caractérisée par celle des vers de terre lorsque ces derniers sont présents. Ces résultats confirment ceux observés dans d'autres études (Decaëns et al., 1994, Boyer et al., 1999, Lavelle et al., 1999).

L'absence de différences statistiquement significatives malgré de fortes valeurs absolues observées (cas des densités moyennes totales des populations en janvier 2000), s'expliquent par le fait que les populations ne suivent pas une loi normale et par les fortes variances observées.

La macrofaune du sol est plus abondante dans les sites arborés (forêt exploitée ou pas) et dans les parcelles où la déforestation a été sélective (manuelle) où la litière (par son abondance et sa qualité), les conditions chimiques et les conditions micro-environnementales du sol, permettent son développement. A l'opposé, dans le site déboisé mécaniquement on observe une diminution quantitative et qualitative (diversité) de la macrofaune, due à l'absence de conditions environnementales et chimiques favorables induites par un couvert végétal (litière) (humidité, température, nutriments).

III. 2. ETUDE DE LA MICROFLORE DU SOL EN FONCTION DES MODES DE GESTION DES SITES

III. 2. 1. Biomasses microbiennes du sol

L'estimation de la taille du compartiment microbien (notion de biomasse) permet de chiffrer les quantités d'éléments stockés dans les micro-organismes et d'évaluer les variations de stock consécutives à des fluctuations de population sous l'influence des conditions de l'environnement ou de l'intervention humaine.

a) Août 1999

L'analyse montre une diminution significative ($p \leq 0,05$) des biomasses microbiennes sous les parcelles déboisées. Les valeurs absolues (exprimées en mg de C/Kg de sol sec) les plus élevées sont retrouvées sous les forêts (exploitées ou pas) et les plus faibles sous parcelles déboisées (manuellement ou mécaniquement) (Figure 9).

Afin de réduire l'hétérogénéité due au sol, les valeurs absolues sont exprimées en pour-cent du carbone total du sol. On constate que les différences observées ne sont plus significatives ($p \leq 0,05$) (Figure 10).

b) Janvier 2000

L'analyse des biomasses microbiennes, exprimées en mg de C/Kg sol sec met en évidence trois groupes (Figure 11) :

- un premier groupe avec la valeur la plus élevée retrouvée sous la forêt non exploitée.
- un second avec des valeurs moyennes retrouvées sous forêt exploitée et sous parcelle déboisée manuellement.
- un troisième groupe avec la parcelle déboisée mécaniquement où l'on rencontre la plus faible valeur.

Les différences observées sont significatives ($p \leq 0,05$) (Figure 11).

Lorsque les valeurs absolues sont exprimées en pour-cent du carbone total du sol les différences observées ne sont plus significatives ($p \leq 0,05$) (Figure 12).

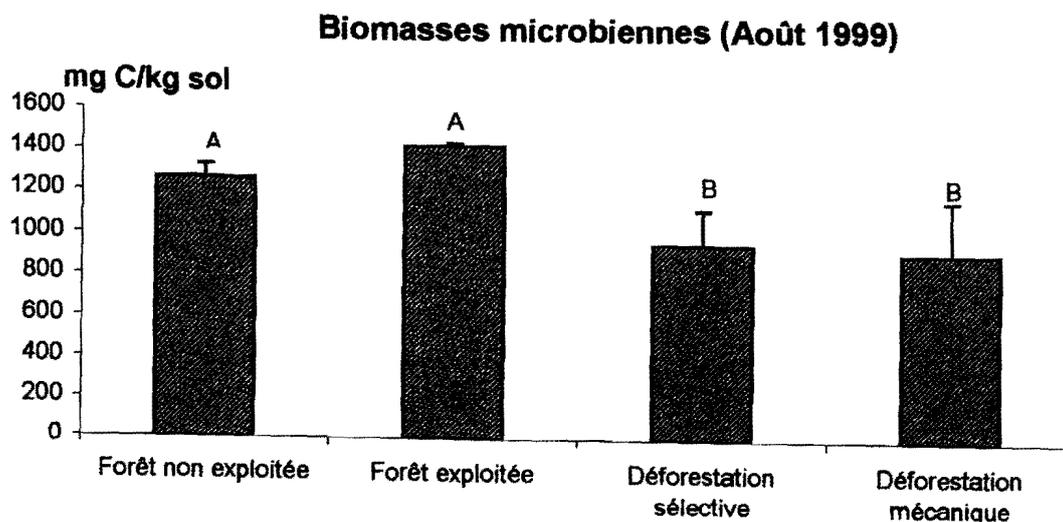


Figure 9 : Biomasses microbiennes exprimées en mg de carbone par Kg de sol sec. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'écart type.

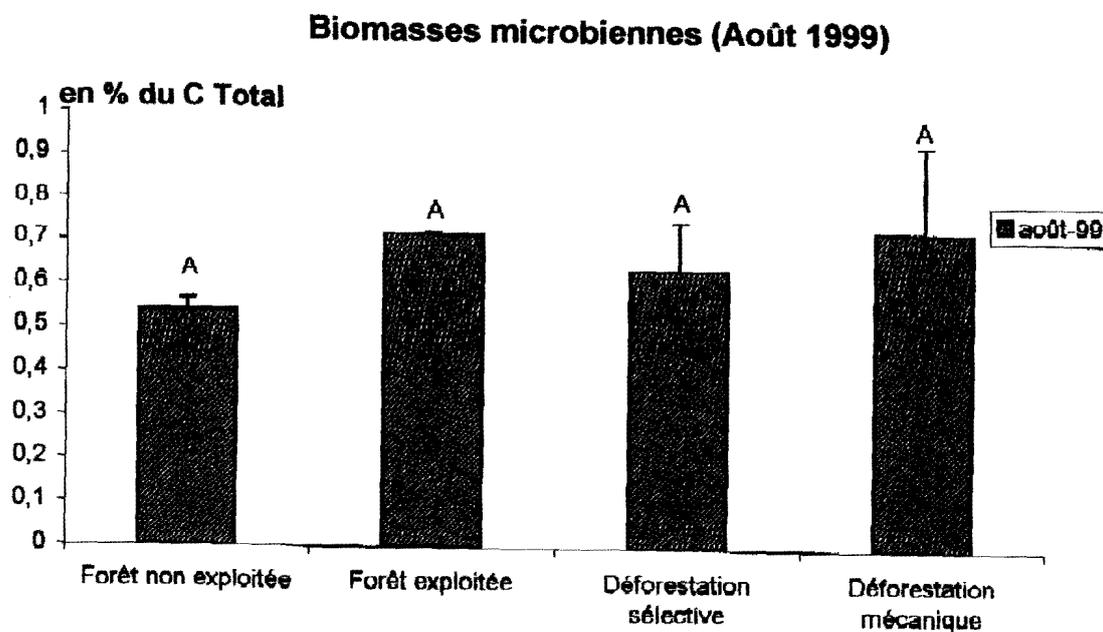


Figure 10 : Biomasses microbiennes exprimées en pour-cent du carbone total. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'écart type.

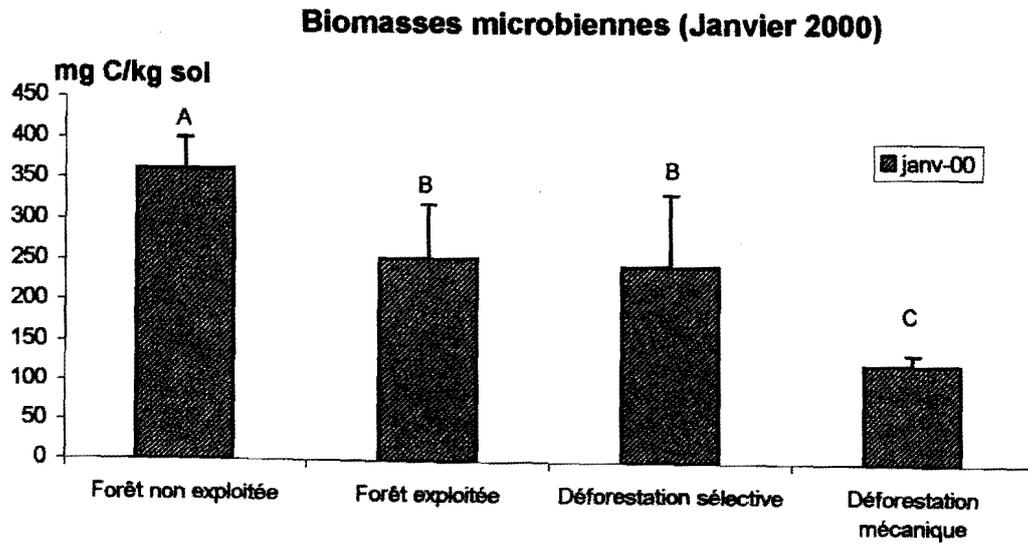


Figure 11 : Biomasses microbiennes exprimées en mg de carbone par Kg de sol sec. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'écart type.

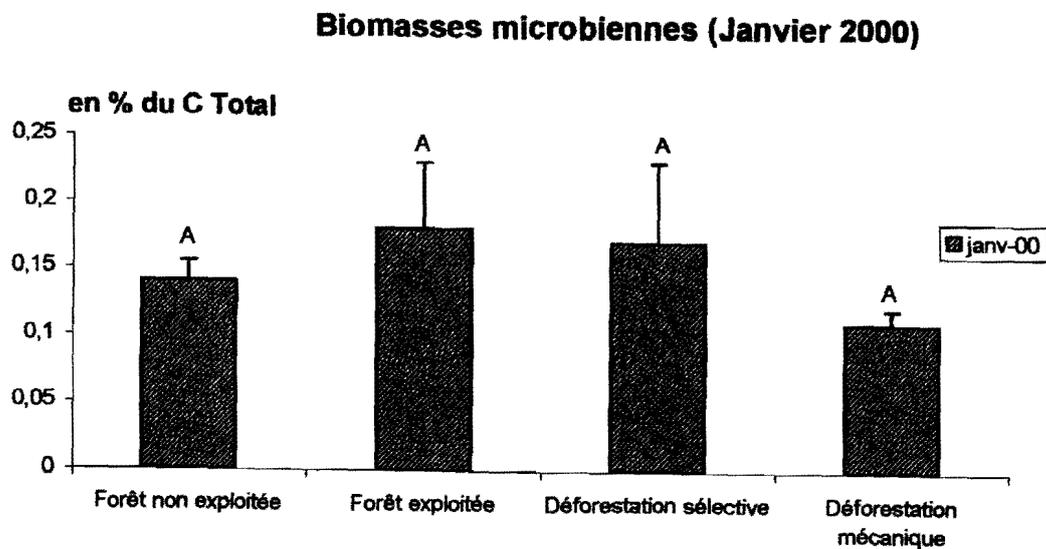


Figure 12 : Biomasses microbiennes exprimées en pour-cent du carbone total du sol. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

III. 2. 2. Coefficients de minéralisation du carbone dans les sols

Le dégagement du gaz carbonique dans les sols est intéressant car "il semble entièrement dû à des activités biologiques". Les analyses (respiration du sol) se sont déroulées sur 7 semaines en 1999 et seulement sur 5 en 2000. Cette différence s'explique par le fait que nous voulions connaître à partir de quelle semaine le sol ne "respirait" plus et qu'on pouvait stopper la manipulation.

a) En 1999

Les résultats obtenus sur 7 semaines sont représentés sous forme de courbes cumulées sur la Figure 13. La minéralisation du carbone est plus importante sous forêt exploitée. A l'opposé, la plus faible activité est observée sous parcelle défrichée mécaniquement. Les 4 sites sont statistiquement différents. La forêt non exploitée et la parcelle déboisée manuellement présentent des valeurs intermédiaires (Figure 13).

b) En 2000

L'étude en 2000 s'est faite sur 5 semaines. Au terme de ce laps de temps, on note que la microflore est plus active sous forêt non exploitée et sous déforestation mécanique. Les valeurs sous déforestation mécanique bien que supérieures à celles calculées sous forêt exploitée et sous déforestation sélective ne sont pas significativement différentes de ces dernières (Figure 14).

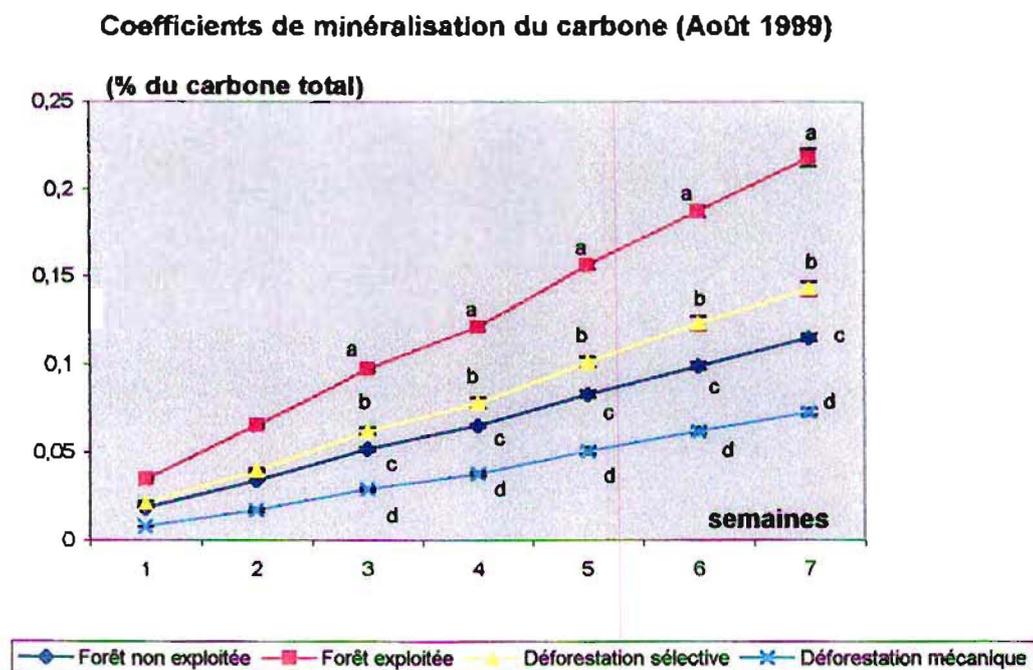


Figure 13 : Coefficients de minéralisation du carbone (courbes cumulées) en fonction des quatre sites étudiés. La même lettre, à la même date indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'écart type.

Coefficients de minéralisation du carbone (Janvier 2000)

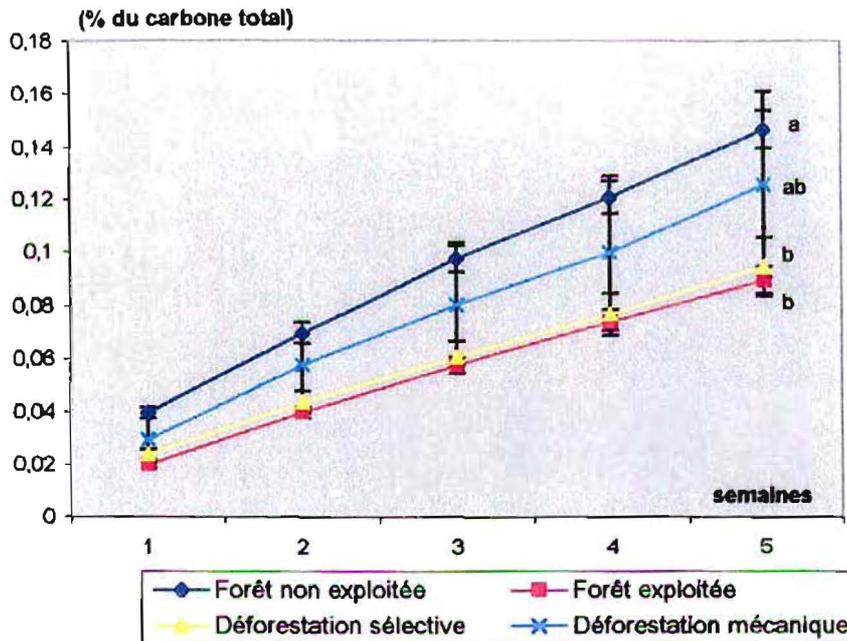


Figure 14 : Coefficients de minéralisation du carbone (courbes cumulées) en fonction des quatre sites étudiés. La même lettre, à la même date indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'écart type.

III. 2. 3. Activités enzymatiques

L'activité phosphatase alcaline a été mesurée pour l'ensemble des 4 sites, à pH 11, dans les couches de sol 0-10 cm et 10-20 cm. L'activité est exprimée en μ gramme de p-Nitrophénol libéré / gramme de sol sec / heure (μ g p-N/g sol/h).

a) Août 1999

Les valeurs calculées des activités phosphatase alcaline pour l'horizon 0-10 cm varient de 125,73 μ g p-N/g sol/h sous la déforestation mécanique à 205,50 μ g p-N/g sol/h sous la forêt non exploitée. Les différences observées pour l'ensemble des quatre sites ne sont pas significatives au seuil de 5% (Figure 15). Quand on compare seules, les deux valeurs extrêmes, sous forêt non exploitée et sous déforestation mécanique, la différence devient significative ($p \leq 0,05$).

Dans l'horizon 10-20 cm de profondeur, les valeurs varient de 89,44 μ g. p-N/g sol/h sous la parcelle déboisée manuellement à 132,81 μ g. p-N/g sol/h sous la forêt non exploitée. Les valeurs calculées ne sont pas significativement différentes ($p \leq 0,05$) (Figure 16).

**ACTIVITES PHOSPHATASE ALCALINE
(Août 1999; Horizon 0-10 cm)**

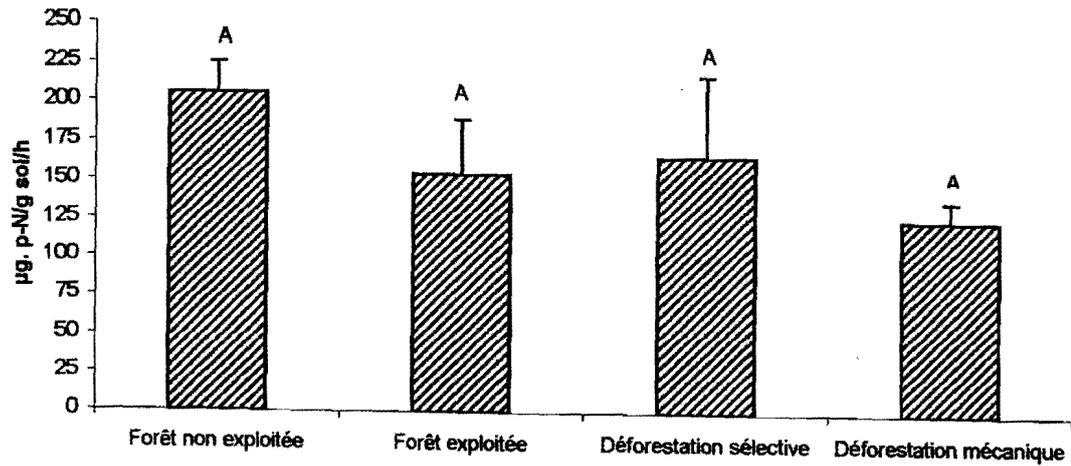


Figure 15 : Activités phosphatase alcaline, en µgramme de p-Nitrophénol libéré/gramme de sol sec /heure (µg.p-N/g sol/h). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

**ACTIVITES PHOSPHATASE ALCALINE
(Août 1999; Horizon 10-20 cm)**

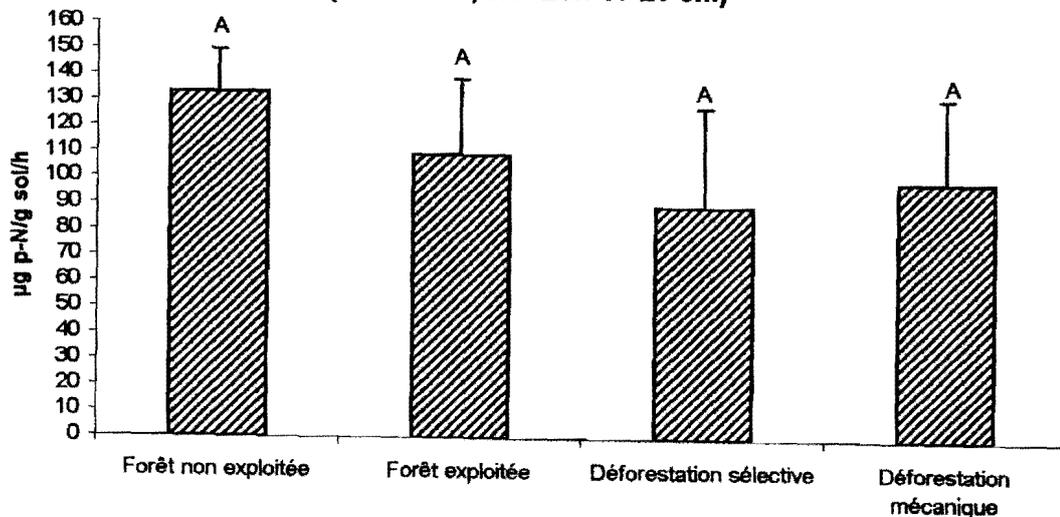


Figure 16 : Activités phosphatase alcaline, en µgramme de p-Nitrophénol libéré/gramme de sol sec /heure (µg.p-N/g sol/h). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

b) *En 2000*

Lors du second prélèvement, en janvier 2000, les calculs des activités de la phosphatase alcaline pour l'horizon 0-10 cm de profondeur, mettent en évidence deux groupes (Figure 17)

- le premier où l'on trouve les plus fortes valeurs et qui comprend les deux forêts (non exploitée et partiellement exploitée) et la parcelle déboisée manuellement (sélective).
- le second, où la plus faible valeur est retrouvée sous la parcelle déboisée de façon mécanique.

Les valeurs observées entre ces deux groupes sont significativement différentes ($p \leq 0,05$).

Dans l'horizon 10-20 cm de profondeur, les valeurs des activités varient de 66,11 $\mu\text{g. p-N/g sol/h}$ pour la forêt exploitée à 130,65 $\mu\text{g. p-N/g sol/h}$ pour la parcelle défrichée manuellement. L'analyse statistique ne montre aucune différence significative entre les quatre sites (Figure 18).

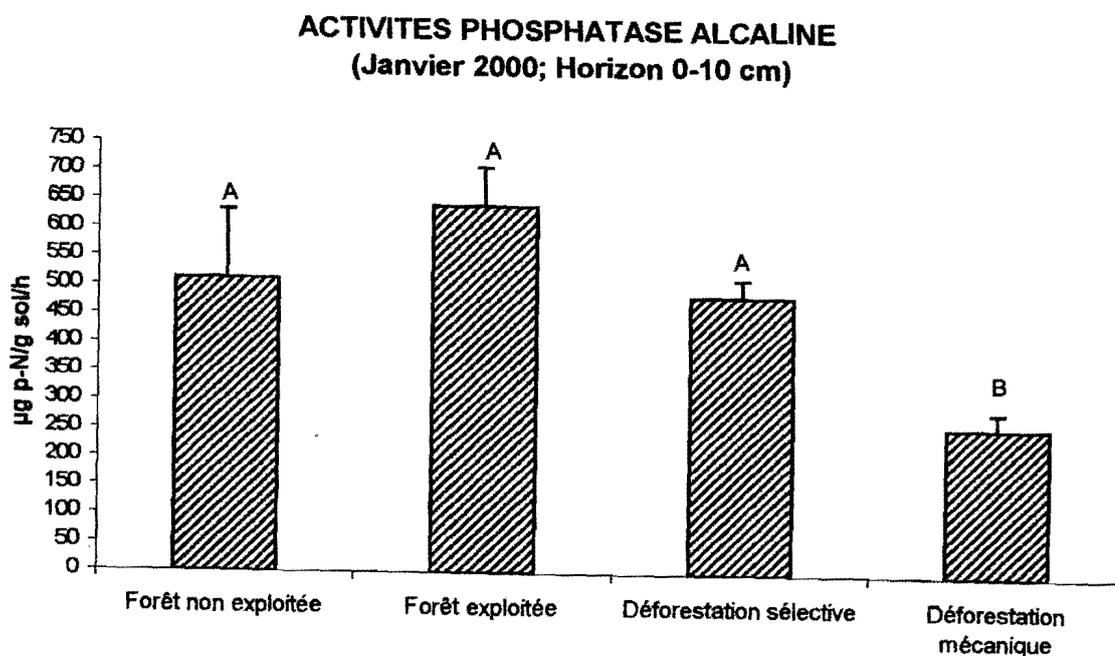


Figure 17 : Activités phosphatase alcaline, en μgramme de p-Nitrophénol libéré/gramme de sol sec /heure ($\mu\text{g.p-N/g sol/h}$). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

**ACTIVITES PHOSPHATASE ALCALINE
(Janvier 2000; Horizon 10-20 cm)**

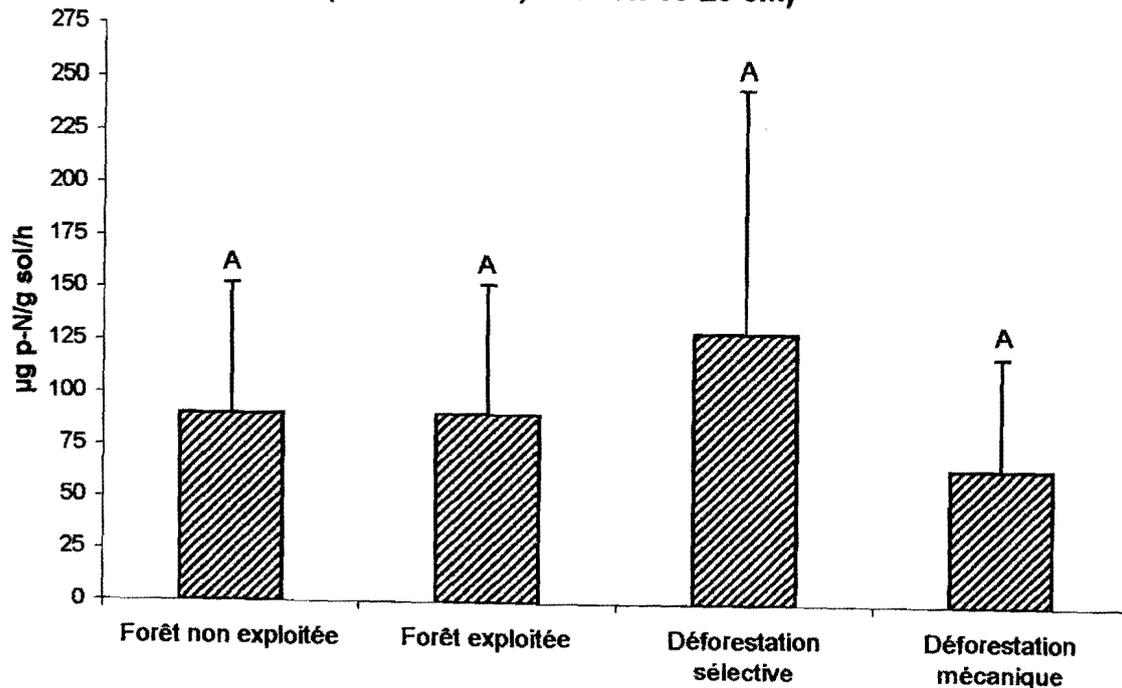


Figure 18 : Activités phosphatase alcaline, en µgramme de p-Nitrophénol libéré/gramme de sol sec /heure (µg.p-N/g sol/h). La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

c) Evolution de l'activité phosphatase alcaline entre 1999 et 2000

On note une augmentation des activités phosphatase alcaline, dans l'horizon 0-10 cm, entre août 1999 et janvier 2000 pour les quatre sites étudiés (pour la forêt non exploitée cette valeur passe de 205,5 à 512,8 µg. p-N libéré/g sol/h ; de 154 à 641 µg. p-N libéré/g sol/h sous la forêt exploitée ; de 165,9 à 485 µg. p-N libéré/g sol/h sous la parcelle déboisée manuellement et de 125,7 à 259 µg. p-N libéré/g sol/h sous la parcelle mécaniquement déboisée). Les valeurs observées sont statistiquement significatives au seuil de 5% pour l'évolution entre les 2 dates pour les 2 forêts (exploitées ou pas) et pour la déforestation sélective (Tableau 1).

Dans l'horizon 10-20 cm de profondeur, à l'exception de la déforestation sélective, on observe une diminution des activités enzymatiques entre août 1999 et janvier 2000. Les différences observées ne sont pas significatives pour l'horizon considéré ($p \leq 0,05$) (Tableau 1).

Tableau 1 : Evolution des activités phosphatase alcaline du sol entre 1999 et 2000 pour les horizons 0-10 cm et 10-20 cm en μ gramme de p-Nitrophénol libéré/gramme de sol sec /heure (μ p-N/g sol/h). Dans la même ligne, pour le même horizon, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). L'erreur standard est entre parenthèses.

Activités phosphatase alcaline (pH 11)				
	1999	2000	1999	2000
	0-10 cm	0-10 cm	10-20 cm	10-20 cm
Forêt non exploitée	205,5 (20,04) a	512,8 (119,4) b	132,8 (16,5) a	90,13 (88,01) a
Forêt exploitée	154,3 (35,16) a	641,2 (67,7) b	109,18 (29,3) a	90,51 (61,9) a
Déforestation sélective	165,9 (51,48) a	485,2 (30,14) b	89,43 (38,27) a	130,65 (115,4) a
Déforestation mécanique	125,7 (12,25) a	259,1 (26,96) a	99,25 (32,4) a	66,11 (53,79) a

d) Coefficients d'activité phosphatase alcaline, reliés à la teneur en carbone du sol

La relation activité phosphatase avec la matière organique a déjà été signalée, notamment par Feller et al. (1994) avec les activités phosphatase acide.

En 1999, les coefficients calculés dans les horizons 0-10 cm et 10-20 cm du sol ne montrent aucune différence entre les quatre sites (Tableau 2).

En 2000, dans l'horizon 0-10 cm on constate que les coefficients sont significativement plus élevés sous la forêt exploitée et sous la parcelle défrichée sélectivement (manuellement) (Tableau 2).

Dans l'horizon 10-20 cm, comme en 1999, les différences ne sont pas significatives (Tableau 2).

Tableau 2 : Coefficients d'activité phosphatase alcaline à pH 11, reliés à la teneur en carbone. Dans la même colonne, pour la même année et pour le même horizon, la même lettre indique la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). L'erreur standard est entre parenthèses.

Coefficients d'activités phosphatase				
	1999		2000	
	0-10 cm	0-10 cm	10-20 cm	10-20 cm
Forêt non exploitée	7,46 (0,72) a	17,65 (4,10) a	6,88 (0,85) a	4,03 (3,93) a
Forêt exploitée	6,60 (1,50) a	35,56 (3,75) b	6,65 (1,78) a	6,69 (4,57) a
Déforestation sélective	9,70 (3,01) a	30,32 (1,88) bc	7,99 (3,42) a	9,62 (8,50) a
Déforestation mécanique	9,47 (0,92) a	23,26 (2,42) ac	8,33 (2,71) a	5,90 (4,80) a

III. 2. 4. Discussion

Les valeurs absolues de biomasse microbienne montrent que les sites boisés et les conditions climatiques agissent sur la microflore du sol. Durant l'hiver austral (août), les forêts (exploitées ou pas) présentent des biomasses microbiennes supérieures aux sites déboisés (manuellement ou mécaniquement). Ces différences pour la période viennent certainement du couvert végétal, des conditions environnementales et climatiques créées. L'apport de matière organique fraîche par le couvert végétal et les conditions climatiques associées permettent d'observer ces fortes biomasses. On observe une chute de près de la moitié des biomasses entre les deux saisons climatiques (entre août 1999 et janvier 2000). Les fortes précipitations durant l'été (janvier) peuvent créer des conditions anaérobiques dans le sol, néfastes au développement d'une partie de la microflore.

Durant l'été austral, en janvier 2000, l'estimation des biomasses microbiennes fait ressortir trois groupes. Les valeurs moyennes (inférieures à celle calculée sous forêt non exploitée) retrouvées sous forêt exploitée et sous déforestation sélective peuvent s'expliquer par une anthropisation du milieu. De même la faible valeur sous déforestation mécanique s'explique par l'absence de couvert végétal et l'impact des machines sur le sol.

En ramenant les valeurs de biomasse microbienne au carbone total du sol, on constate que les différences ne sont plus significatives. Ces résultats confirment que la biomasse microbienne est étroitement liée aux teneurs en argile et en matière organique. Les sols de la

Réunion sont connus pour être très riche en matière organique mais cette dernière est fortement fixée (aux allophanes) et de ce fait devient indisponible à la microflore. Un autre élément fixé dans les sols de la Réunion, est le phosphore. Au maximum seulement 10% du phosphore total est sous forme assimilable.

Cependant en comparaison avec d'autres travaux réalisés sur les sol de la Réunion et concernant la biomasse microbienne, on constate que les valeurs estimées sur les sites de Saint Philippe sont supérieures à celles rencontrées dans l'Ouest de l'île, sous géranium en sol nu ou associé à une couverture végétale (Boyer et al., 1999). Ces différences peuvent s'expliquer par les taux de carbone différents dans les sols.

Au mois d'août 1999, dans l'horizon 0-10 cm, on observe une diminution relative de l'activité enzymatique (phosphatase alcaline) lorsque la forêt a été déboisée mécaniquement. Cette baisse de l'activité peut être corrélée à la faible biomasse absolue microbienne et à l'action des machines détruisant l'horizon considéré.

En janvier 2000, dans l'horizon 0-10 cm, on observe que les activités phosphatase alcaline sont supérieures sous forêts (exploitées ou pas) et sous déforestation sélective en comparaison avec la parcelle déboisée de façon mécanique. Cette faible activité est peut être à corrélée avec la faible biomasse microbienne estimée. Comme pour le mois d'août, les différences observées dans l'horizon 10-20 cm ne sont pas significatives.

Les activités de la phosphatase alcaline sont beaucoup plus élevées en été (janvier) qu'en hiver (août) pour les sites boisés et la déforestation sélective. Les conditions climatiques (notamment la température) et le couvert végétal doivent certainement influencer.

III. 3. PROPRIETES CHIMIQUES DU SOL EN FONCTION DES MODES DE GESTION DES SITES ETUDIES

III. 3. 1. Août 1999

Une diminution significative ($p \leq 0,05$) du carbone total dans les deux horizons étudiés (0-10 cm et 10-20 cm) du sol est observée lors de la déforestation aussi bien mécanique que sélective (manuelle). Les plus fortes valeurs sont trouvées sous les deux forêts (Tableau 3).

La même observation est faite pour l'azote total. Pour l'horizon 0-10 cm de profondeur les plus fortes valeurs sont trouvées sous les deux forêts et la plus faible dans la parcelle déboisée mécaniquement. La déforestation sélective présente une valeur intermédiaire. Pour l'horizon 10-20 cm, les valeurs sont significativement différentes entre la forêt non exploitée et la parcelle déboisée mécaniquement (Tableau 3).

Nous avons une augmentation significative du pH lorsque les parcelles sont déboisées (manuellement ou mécaniquement) pour la couche 0-10 cm. Cette augmentation n'est vérifiée que dans le cas de la parcelle déboisée mécaniquement pour la couche profonde 10-20 cm (Tableau 3).

Dans les deux profondeurs, le phosphore assimilable est significativement plus élevé dans la parcelle mécaniquement déboisée (Tableau 3).

Le pH augmente dans l'horizon 0-10 cm sous les parcelles déboisées.

Très peu de différences sensibles sont observées pour les autres éléments.

III. 3. 2. Janvier 2000

Pour la couche 0-10 cm, le carbone total est plus élevé sous les deux forêts en comparaison avec les deux parcelles déboisées. Dans la couche 10-20 cm, le taux de carbone est significativement plus important sous forêt non exploitée par rapport aux trois autres sites (Tableau 4).

De même on note une diminution de l'azote total du sol sous la forêt exploitée et sous les parcelles déboisées (manuellement et mécaniquement) pour l'horizon 0-10 cm. Pour l'horizon 10-20 cm, cette diminution est plus accentuée (Tableau 4).

En comparaison avec la forêt non exploitée, l'augmentation du pH sous forêt exploitée et les deux parcelles déboisées est significative pour les deux horizons (Tableau 4).

L'augmentation du phosphore assimilable sous parcelle déboisée mécaniquement n'est significative que pour l'horizon 0-10 cm (Tableau 4).

Tableau 3 : Août 1999. Eléments chimiques du sol en fonction des différents sites étudiés (FNE : forêt non exploitée ; FE : forêt exploitée ; DS : déforestation sélective ; DM : déforestation mécanique). Pour le même horizon et dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). Pa, phosphore assimilable, pHe (pH eau).

	Horizon 0-10 cm				Horizon 10-20 cm			
	FNE	FE	DS	DM	FNE	FE	DS	DM
C (g/100g)	27,54 a	23,38 ab	17,1 bc	13,28 c	19,3 a	16,42 ab	11,19 b	11,91 b
N (g/kg)	13,21 a	13,38 a	11,72 ab	10,01 b	13,21 a	10,99 ab	10,21 ab	9,15 b
CEC (mé/100g)	20,08 a	18,42 a	20,86 a	24,56 a	11,77 a	9,76 a	11,86 a	21,06 b
Ca (mé/100g)	5,21 a	5,57 a	7,39 a	11,7 b	1,41 a	1,42 a	1,68 a	9,42 b
K (mé/100g)	0,49 a	0,41 a	0,45 a	0,27 a	0,29 a	0,23 a	0,19 a	0,24 a
Mg (mé/100g)	4,7 a	5,03 a	7,3 ab	10,17 b	1,93 a	1,88 a	2,09 a	8,87 b
Na (mé/100g)	0,52 a	0,42 a	0,34 a	0,35 a	0,28 a	0,67 a	0,17 a	0,29 a
pHe	4,94 a	4,98 a	5,34 b	6,02 c	5 a	5,08 a	5,24 a	5,88 b
Pa (% P_T)	3,21 a	2,28 a	2,23 a	6,32 b	2,22 a	2,15 a	1,85 a	4,3 b

Tableau 4 : Janvier 2000. Eléments chimiques du sol en fonction des différents sites étudiés (FNE : forêt non exploitée ; FE : forêt exploitée ; DS : déforestation sélective ; DM : déforestation mécanique). Pour le même horizon et dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). Pa, phosphore assimilable, pHe (pH eau).

	Horizon 0-10 cm				Horizon 10-20 cm			
	FNE	FE	DS	DM	FNE	FE	DS	DM
C (g/100g)	29,06 a	18,03 b	16 bc	11,2 c	22,96 a	13,53 b	13,57 b	11,19 b
N (g/kg)	16,58 a	10,97 b	10,11 bc	7,8 c	12,95 a	8,6 b	9,69 b	7,78 b
CEC (mé/100g)	20,58 a	19,86 a	12,2 b	20,84 a	14,16 a	13,58 a	9,91 a	20,48 b
Ca (mé/100g)	7,11 a	6,62 ab	3,04 b	10,22 a	3,44 a	2,97 a	1,83 a	10,25 b
K (mé/100g)	0,64 a	0,41 b	0,24 c	0,29 bc	0,49 a	0,28 b	0,25 b	0,27 b
Mg (mé/100g)	5,86 ab	7,8 b	3,88 a	10,65 b	3,29 a	5,3 a	2,75 a	9,59 b
Na (mé/100g)	0,81 a	0,62 b	0,39 c	0,39 c	0,59 a	0,46 ac	0,31 b	0,39 bc
pHe	4,7 a	4,94 b	5,02 b	5,82 c	4,72 a	4,94 b	5 b	5,84 c
Pa (% P_T)	3,28 a	2,62 a	2,58 a	10,9 b	9,99 a	2,22 a	2,17 a	9,75 a

Dans l'horizon 10-20 cm, on constate sous la forêt non exploitée une augmentation significative ($p \leq 0,05$) du calcium, du magnésium, du sodium et du phosphore assimilable entre août 1999 et janvier 2000 (Tableau 6).

Cette augmentation du sodium est aussi vérifiée pour la parcelle déboisée manuellement (déforestation sélective) (Tableau 6).

Tableau 6 : Evolution de certains éléments chimiques du sol entre août 1999 et janvier 2000 pour l'horizon 10-20 cm. FNE : forêt non exploitée ; FE : forêt exploitée; DS : déforestation sélective; DM : déforestation mécanique. Dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est significative pas ($p \leq 0,05$). Ca, Mg, Na (mé/100g), Pa : phosphore assimilable en % du phosphore total).

	FNE99	FNE00	FE99	FE00	DS99	DS00	DM99	DM00
Ca	1,41 a	3,44 b						
Mg	1,93 a	3,29 b						
Na	0,28 a	0,59 b			0,17 a	0,31 b		
Pa	2,22 a	9,9 b						

III. 3. 4. Discussion

La déforestation aboutit à une perte de matière organique aussi bien dans l'horizon superficiel (0-10 cm) que dans l'horizon profond (10-20 cm) et aussi bien en été qu'en hiver. Nous avons une perte de 52% du carbone dans l'horizon 0-10 cm en hiver et de 38% dans l'horizon 10-20 cm pour la même période et le même élément. En été la perte du carbone est de 61% dans l'horizon 0-10 cm et de 51% dans l'horizon 10-20 cm.

Pour l'azote, la perte en hiver, dans l'horizon 0-10 cm est de 24% contre 53% en été et pour l'horizon 10-20 cm de 30% en hiver pour 40% en été. Ces diminutions lors de la déforestation peuvent s'expliquer par l'absence de ré-alimentation du sol pour les éléments considérés qui s'explique par l'absence d'un couvert forestier ou d'un mulch.

III. 3. 3. Evolution des éléments chimiques dans le temps

Dans le Tableau 5 (horizon 0-10 cm) seuls les éléments chimiques dont l'évolution entre 1999 et 2000, est statistiquement significative sont représentés.

Entre août 1999 et janvier 2000, pour l'horizon 0-10 cm, on observe une diminution significative de l'azote et du carbone du sol dans la parcelle déboisée mécaniquement (Tableau 5).

Dans le même laps de temps, sous la déforestation sélective on constate une diminution significative du calcium, du magnésium et de la CEC (capacité d'échange cationique) (Tableau 5).

Sous la forêt non exploitée, on observe une augmentation significative du sodium (Na) au seuil de 5% et de l'azote au seuil de 9% pour la couche 0-10 cm entre 1999 et 2000 (Tableau 5).

Tableau 5 : Evolution de certains éléments chimiques du sol entre août 1999 et janvier 2000 pour l'horizon 0-10 cm. FNE : forêt non exploitée ; FE : forêt exploitée; DS : déforestation sélective; DM : déforestation mécanique. Dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05 \leq 0,09$). C_T (g/100g), N_T (g/Kg), CEC, Ca, Mg, Na (mé/100g).

	FNE99	FNE00	FE99	FE00	DS99	DS00	DM99	DM00
C_T							13,28 a	11,2 b
N_T	13,21 a	16,58 b					10,01 a	7,8 b
CEC					20,86 a	12,2 b		
Ca					7,39 a	3,04 b		
Mg					7,3 a	3,88 b		
Na	0,52 a	0,81 b						

Densités Moyennes Totales de la Macrofaune (2000)

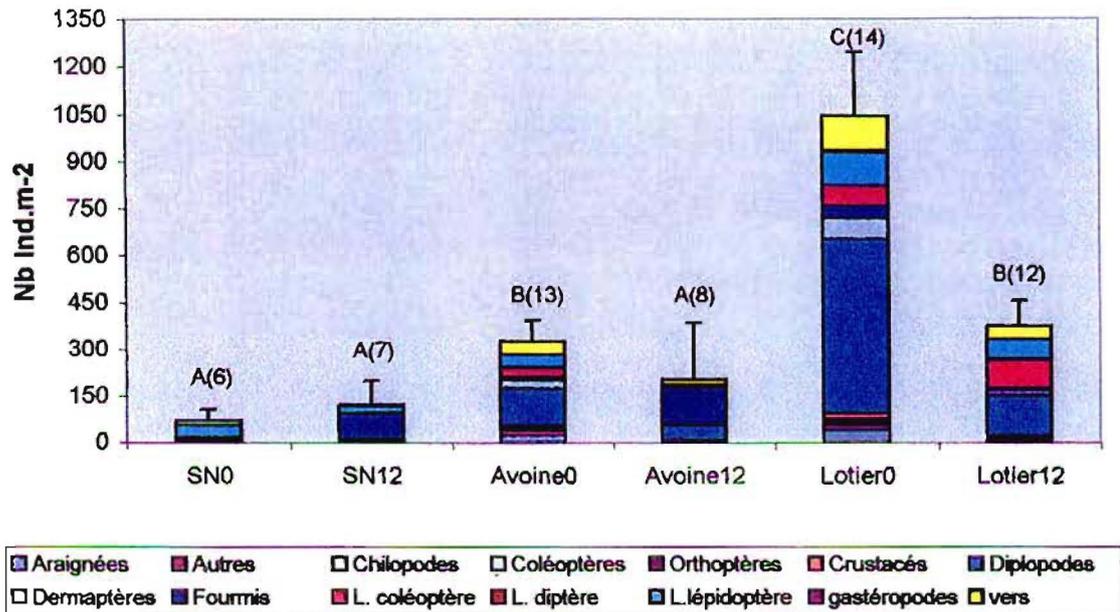


Figure 22 : Densités moyennes totales de la macrofaune du sol, en nombre d'individus par mètre carré (Nb Ind.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard. Entre parenthèses, le nombre de groupes taxonomiques.

Biomasses Moyennes Totales de la Macrofaune (2000)

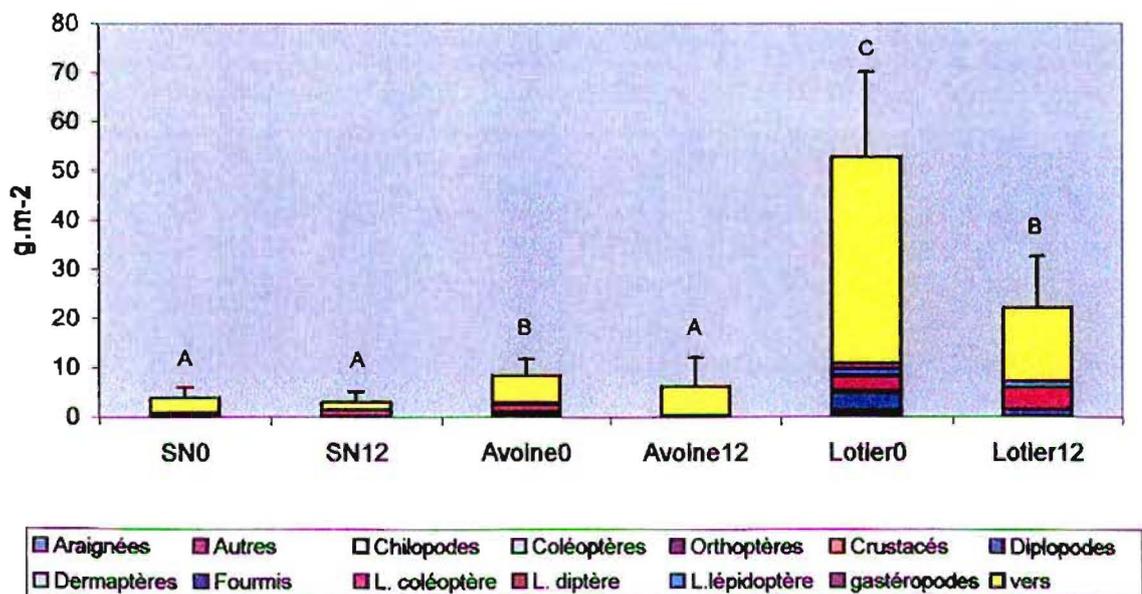


Figure 23 : Biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol, en gramme par mètre carré (g.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

b) Biomasses moyennes totales de la population

Les biomasses moyennes sont exprimées en gramme par mètre carré (g.m^{-2}). Les biomasses moyennes varient de $4,78 \text{ g.m}^{-2}$ sous lotier à $7,35 \text{ g.m}^{-2}$ en sol nu et à $7,79 \text{ g.m}^{-2}$ sous avoine. Les valeurs observées ne sont pas statistiquement différentes ($p \leq 0,05$) (Figure 21).

Les biomasses des parcelles en sol nu et sous avoine sont caractérisées par celles des vers de terre. La biomasse moyenne des vers de terre représente plus de 50% de la biomasse moyenne totale de la population avec exactement ici 77,9% en sol nu et 82,25% sous couverture d'avoine (Figure 21). Sous le lotier les biomasses les plus importantes sont celles des diplopodes avec 42,88% de la biomasse moyenne de la population et des larves de lépidoptères avec 38,3% (Figure 21).

IV. 3. 2. Macrofaune prélevée en 2000

En 2000 la macrofaune fut prélevée lors de la récolte de maïs. Au vu des résultats obtenus au niveau de la production du maïs (IV.2.1), nous avons décidé de n'échantillonner que les traitements suivants : maïs en sol nu sans pesticide (SN0), maïs en sol nu avec le Curater à la dose préconisée (SN12), maïs associé à l'avoine sans pesticide (Avoine0), maïs associé à l'avoine avec le Curater à la dose préconisée (Avoine12), maïs associé au lotier sans pesticide (Lotier0) et maïs avec lotier plus le Curater à la dose conseillée (Lotier12).

a) Densités moyennes totales de la population

L'analyse des densités moyennes de la population en 2000 met en évidence trois groupes statistiquement différents (Figure 22):

- un premier groupe où les plus faibles densités sont observées sous le maïs en sol nu sans pesticide (SN0) avec une densité moyenne de 74 ind.m^{-2} , sous maïs en sol nu à la dose préconisée de Curater (SN12) avec 125 ind.m^{-2} , et le maïs associé à l'avoine plus pesticide (Curater) à la dose conseillée (Avoine12) avec 208 ind.m^{-2} .
- un groupe intermédiaire comprenant le maïs associé à l'avoine sans pesticide (Avoine0) et le maïs avec lotier + le Curater à la dose normale (lotier12) avec respectivement 330 ind.m^{-2} et 379 ind.m^{-2} .
- un troisième groupe où la plus forte densité est trouvée sous maïs associé au lotier sans pesticide (Lotier0) avec densité de 1048 ind.m^{-2} .

IV. 3. ETUDE DES POPULATIONS DE LA MACROFAUNE DU SOL EN FONCTION DES MODALITES EXPERIMENTALES

Les macro-invertébrés du sol observés sous les différentes modalités expérimentales étudiées ont été déterminés et les groupes taxonomiques ont été considérés en fonction de leur fréquence. Sur cette base, les principaux groupes étudiés sont : les Araignées, les Chilopodes, les Coléoptères (adultes), les Crustacés, les Diplopodes, les Fourmis, les Orthoptères, les Dermaptères ("perce-oreille"), les larves de Coléoptères, les larves de Diptères, les larves de Lépidoptères, les Gastéropodes, les Vers de terre et le groupe "Autres" (qui comprend quelques rares espèces rencontrées comme, certaines punaises, des diptères adultes ...).

IV. 3. 1. Macrofaune prélevée en Novembre 1999

Avant de démarrer l'étude de la macrofaune du sol, il nous a fallu avant le semis du maïs, fin novembre 1999 mettre en place les couvertures végétales (avoine et lotier). Le lotier fut semé en mars 1999 et l'avoine en mai-juin. Après installation de l'avoine et du lotier, les prélèvements de la faune et de la microflore furent faits avant le semis du maïs (fin novembre, début décembre 1999). Les parcelles échantillonnées à cette date n'ont subi aucun traitement.

a) Densités moyennes totales de la population

L'étude des densités moyennes totales, exprimées en nombre d'individus par mètre carré (Nb ind.m⁻²) fait apparaître 2 groupes de situations pour les prélèvements effectués en novembre 1999 (Figure 20) :

1. un premier groupe où l'on trouve la plus forte valeur sous la couverture de lotier avant l'installation du maïs (254 ind.m⁻²).
2. un second groupe avec des valeurs moyennes plus faibles retrouvées sous le sol nu (173 ind.m⁻²) et sous la couverture d'avoine (110 ind.m⁻²).

Les différences observées sont significatives au seuil de 5% entre le lotier et les 2 autres traitements (sol nu et avoine) (Figure 20).

Sur les 14 taxons étudiés, seulement 7 sont retrouvés sous sol nu et sous lotier et 8 sous la couverture d'avoine. La couverture de lotier est caractérisée par une forte proportion de diplopodes qui représentent 74,84% de la densité moyenne totale de la macrofaune du sol. Sous la couverture d'avoine, les larves de coléoptères (31,88%) et les vers de terre (20,30%) sont les plus représentés. Sous le sol nu, les fourmis représentent plus de la moitié de la population avec 56,5% de la population totale (Figure 20).

Densités Moyennes Totales de la Macrofaune (1999)

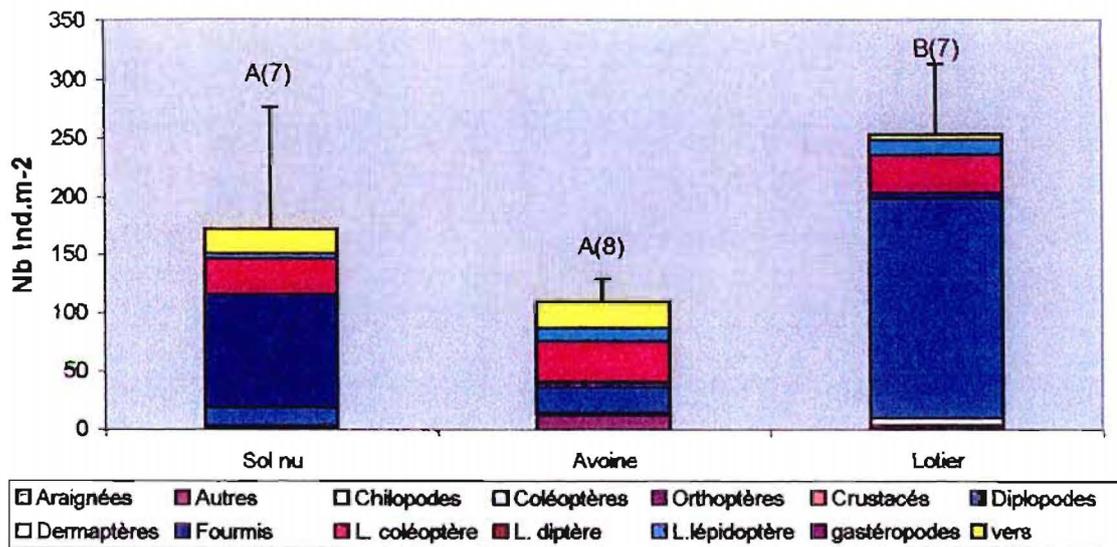


Figure 20 : Densités moyennes totales de macrofaune du sol, en nombre d'individus par mètre carré (Nb Ind.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard. Le nombre de groupes taxonomiques est entre parenthèses.

Biomasses Moyennes Totales de la Macrofaune (1999)

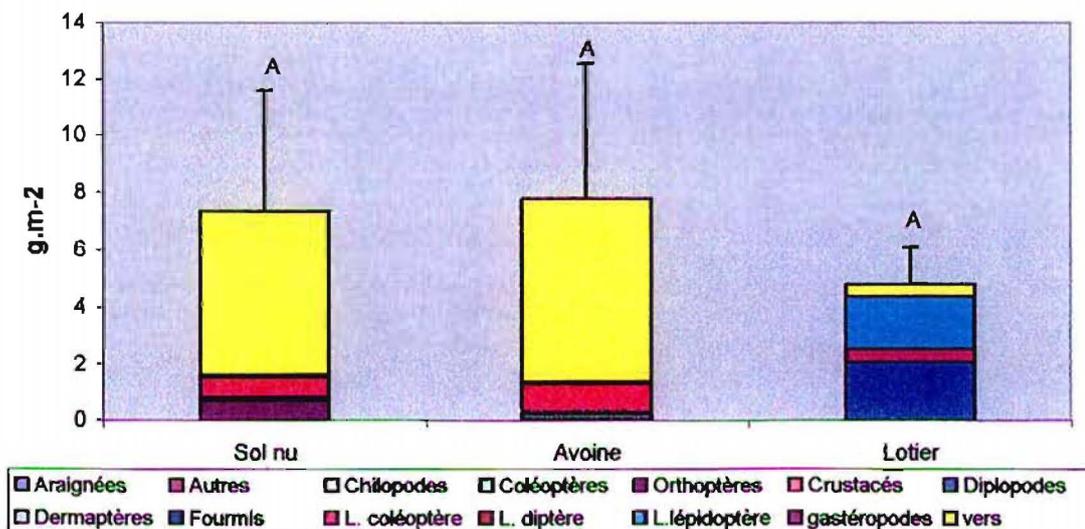


Figure 21 : Biomasses moyennes totales de macrofaune du sol, en gramme par mètre carré (g.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

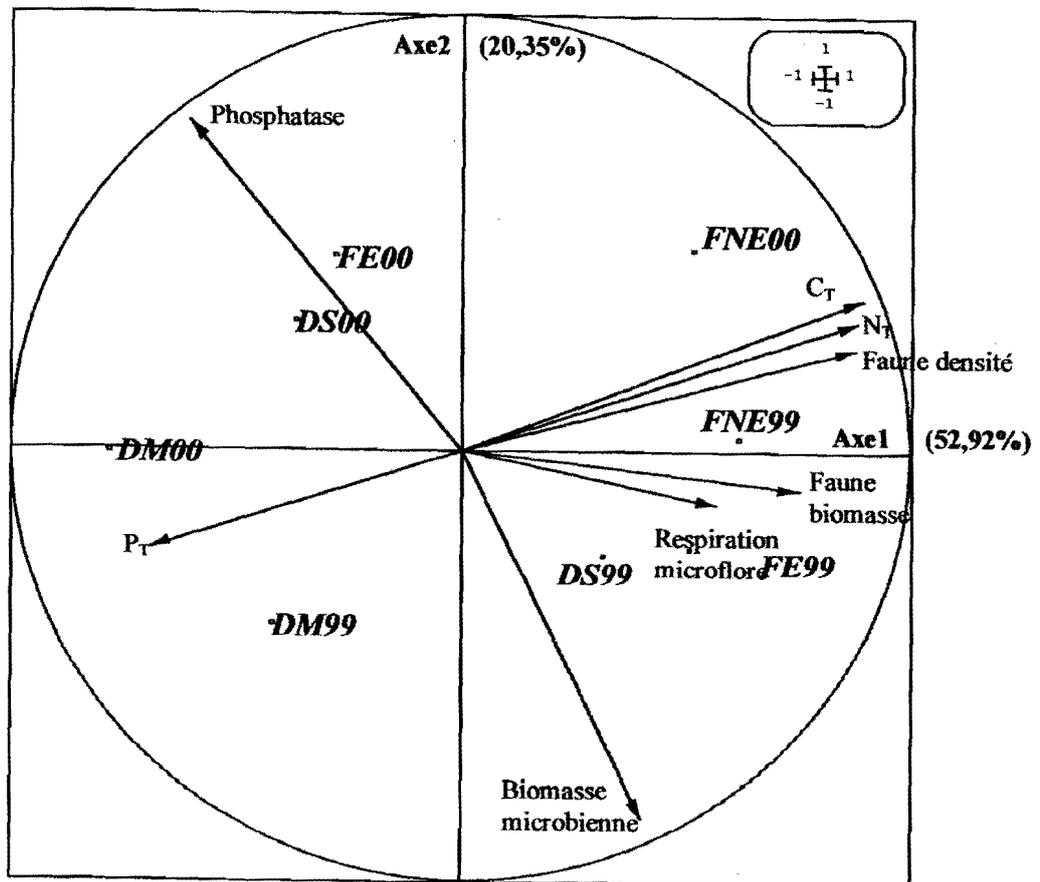


Figure 19 : Graphe issu de l'analyse en composantes principales réalisée sur les données chimiques et biologiques (macrofaune et microflore) du sol menée suivant les quatre sites étudiés en 1999 et 2000 dans la région de Saint Philippe. FNE, forêt non exploitée; FE, forêt exploitée; DS, déforestation sélective (manuelle); DM, déforestation mécanique; P_T, C_T, N_T: phosphore total, carbone total, azote total.

IV. RESULTATS :

Trois Bassins (Cocâtres)

IV. 1. INTRODUCTION

Les expérimentations qui ont porté sur l'étude des agrosystèmes ont démarré durant l'année 1999 sur la commune de Trois Bassins au lieu dit " Cocâtres " à 1000 m d'altitude. Après l'installation des couvertures végétales, les premiers prélèvements furent réalisés en novembre 1999. En altitude, 2 cycles culturaux sont menés par les agriculteurs dont un en hiver et l'autre en été. Dans notre étude seul 1 cycle cultural fut réalisé pendant l'été et en hiver il s'agissait pour nous de reconstituer les couvertures végétales (biomasses). Car dans notre système agronomique nous associons la culture principale à des couvertures végétales mortes (paille) ou pérennes.

L'objectif principale était de vérifier l'impact de certaines pratiques agricoles (cultures en sol nu ou associées à des couvertures végétales) sur la chimie, la macrofaune, les activités de la microflore du sol et les rendements. Seuls seront présentés les résultats obtenus pour les deux premiers cycles culturaux en 2000 et 2001. Les couvertures végétales furent installées durant l'année 1999. Les différentes modalités expérimentales étudiées furent :

- **Pour le premier cycle culturale (1999-2000) :** maïs en sol nu, associé à la couverture de lotier (*Lotus uliginosus*) et à l'avoine (*Avena sativa*). De plus nous avons utilisé 2 pesticides (Curater, matière active carbofuran et Gammacide, matière active le lindane) à 2 doses différentes (la dose préconisée et la moitié de la dose préconisée). Aucun traitement phytosanitaire contre la pyrale du maïs (*Sesamia calamitis*) n'a été fait.
- **Pour le second cycle cultural (2001) :** maïs en sol nu, associé au lotier et à l'avoine avec l'utilisation de 2 pesticides, le Curater et le Mocap20 (matière active, Ethoprophos) à 2 doses (celle préconisée et la moitié de la dose préconisée). Traitement contre la pyrale du maïs fut fait.

IV. 2. PRODUCTION DE MAÏS

IV. 2. 1. Production de maïs en 2000

En altitude le maïs est semé au moment des pluies (novembre-décembre) et le cycle se termine vers le mois de mars. Dans notre étude, le maïs a été semé en décembre 1999 et récolté en mars 2000. Quinze traitements ont été installés. Pour plus de commodité, des sigles ont été attribués à ces modalités :

- SN0 : maïs en sol sans pesticide
- SN11 : maïs en sol nu avec Curater à la moitié de la dose préconisée
- SN12 : maïs en sol nu avec Curater à la dose conseillée
- SN21 : maïs en sol nu avec Gammacide à la moitié de la dose conseillée
- SN22 : maïs en sol nu avec Gammacide à la dose conseillée
- Avoine0 : maïs associé à une couverture d'avoine sans pesticide
- Avoine11 : maïs avec couverture d'avoine et Curater à la moitié de la dose
- Avoine12 : maïs avec couverture d'avoine et Curater à la dose normale
- Avoine21 : maïs avec avoine et Gammacide à la moitié de la dose
- Avoine22 : maïs avec avoine et Gammacide à la dose normale
- Lotier0 : maïs associé au lotier sans pesticide

- Lotier11 : maïs avec lotier et Curater à la moitié de la dose
- Lotier12 : maïs avec lotier et Curater à la dose préconisée
- Lotier21 : maïs avec lotier et Gammacide à la moitié de la dose préconisée
- Lotier22 : maïs avec lotier et Gammacide à la dose préconisée

A la fin du cycle cultural (mars 2000), le maïs est récolté sur les blocs répétés cinq fois, la matière sèche calculée et la production est exprimée en tonne de matière sèche à l'hectare.

Les valeurs obtenues sont regroupées dans le Tableau 7. Malgré les fortes valeurs de matières sèches retrouvées sous Avoine0 et Lotier0, l'analyse de l'ensemble des traitements (15) ne montre aucune différence significative au seuil de 5% pour les valeurs absolues.

Tableau 7 : Production de matière sèche de maïs en 2000, en tonne par hectare (T.ha⁻¹). La même lettre entre les traitements indique que la différence n'est pas significative (p ≤ 0,05). L'écart type est entre parenthèses.

Modalités Expérimentales	Production matière sèche de maïs (T.ha ⁻¹)
SN0	2,89 (0,91) a
SN11	3,92 (1,9) a
SN12	3,38 (2,03)a
SN21	3,66 (2,23) a
SN22	4,17 (2,52) a
Avoine0	6,08 (1,83) a
Avoine11	3,68 (1,7) a
Avoine12	3,74 (1,41) a
Avoine21	4,36 (2,54) a
Avoine22	4,54 (1,39) a
Lotier0	6,23 (1,94) a
Lotier11	4,29 (2,10) a
Lotier12	4,55 (2,01) a
Lotier21	3,18 (0,88) a
Lotier22	3,48 (1,40) a

Pour la suite de nos recherches, un choix devait être fait sur les traitements à analyser pour la macrofaune du sol. En fonction des rendements obtenus et des pesticides utilisés, il fut décidé d'analyser, dans le cadre de la macrofaune pour l'année 2000, les traitements suivants : SN0, SN12, Avoine0, Avoine12, Lotier0 et Lotier12. Effectivement, nous avons gardé le Curater (pesticide1) car il s'agit d'un produit très toxique et couramment utilisé à la Réunion de façon systématique et préventive.

A partir de ce choix, nous avons comparé statistiquement les modalités suivantes : SN0, SN12, Avoine0, Avoine12, Lotier0 et Lotier12, et on constate que les différences entre ces 6 traitements sont significatives (p ≤ 0,05) pour la production de matière sèche du maïs (Tableau 8).

Tableau 8 : Production de matière sèche de maïs en 2000, en tonne par hectare (T.ha⁻¹). La même lettre entre les traitements indique que la différence n'est pas significative (p≤ 0,05). L'écart type est entre parenthèses.

	Modalités Expérimentales					
	SN0	SN12	Avoine0	Avoine12	Lotier0	Lotier12
Production (T.ha ⁻¹)	2,89 a (0,91)	3,38 a (2,03)	6,08 b (1,83)	3,74 ab (1,41)	6,23 b (1,94)	4,55 ab (2,01)

IV. 2. 2. Production de maïs en 2001

A la fin de l'année 2000, avant de démarrer le second cycle cultural du maïs, nous avons remplacé le Gammacide par le Mocap20 dont la matière active est l'ethoprophos. Il s'agit d'un pesticide très toxique et on a constaté qu'il était de plus en plus utilisé à la Réunion. Les nouvelles modalités sont :

- SN0 : maïs en sol sans pesticide
- SN11 : maïs en sol nu avec Curater à la moitié de la dose préconisée
- SN12 : maïs en sol nu avec Curater à la dose conseillée
- SN21 : maïs en sol nu avec Mocap20 à la moitié de la dose conseillée
- SN22 : maïs en sol nu avec Mocap20 à la dose conseillée
- Avoine0 : maïs associé à une couverture d'avoine sans pesticide
- Avoine11 : maïs avec couverture d'avoine et Curater à la moitié de la dose
- Avoine12 : maïs avec couverture d'avoine et Curater à la dose normale
- Avoine21 : maïs avec avoine et Mocap20 à la moitié de la dose
- Avoine22 : maïs avec avoine et Mocap20 à la dose normale
- Lotier0 : maïs associé au lotier (couverture vivante) sans pesticide
- Lotier11 : maïs avec lotier et Curater à la moitié de la dose
- Lotier12 : maïs avec lotier et Curater à la dose préconisée
- Lotier21 : maïs avec lotier et Mocap20 à la moitié de la dose préconisée
- Lotier22 : maïs avec lotier et Mocap20 à la dose préconisée

Afin de protéger la culture contre la pyrale du maïs, tout l'essai a été traité au Decis (delthaméthrine).

Les productions obtenues sur ce second cycle s'échelonnent de 9,40 T.ha⁻¹ pour le SN12 (sol nu avec Curater à la dose conseillée) à 15,07 T.ha⁻¹ pour l'Avoine0. Au seuil de 5%, les différences observées ne sont pas significatives (Tableau 9).

Tableau 9 : Production de matière sèche de maïs en 2000, en tonne par hectare (T.ha⁻¹). La même lettre entre les traitements indique que la différence n'est pas significative (p ≤ 0,05). L'écart type est entre parenthèses.

Modalités Expérimentales	Production matière sèche de maïs (T.ha ⁻¹)
SN0	11,26 (5,66) a
SN11	9,83 (1,94) a
SN12	9,40 (4,16) a
SN21	10,80 (3,61) a
SN22	9,83 (3,54) a
Avoine0	15,07 (5,43) a
Avoine11	13,97 (3,57) a
Avoine12	14,54 (3,97) a
Avoine21	11,87 (2,85) a
Avoine22	14,48 (2,96) a
Lotier0	14,53 (1,70) a
Lotier11	12,62 (2,48) a
Lotier12	11,49 (3,14) a
Lotier21	11,78 (3,77) a
Lotier22	13,31 (1,78) a

IV. 2. 3. Discussion

Les faibles matière sèche du maïs obtenu à la première récolte peuvent s'expliquer par l'absence de traitement contre les attaques de la pyrale du maïs. Nous avons observé que 75 à 85% des pieds de maïs étaient attaqués. De même, on peut penser que le temps nécessaire pour une restauration optimale de la fertilité des sols par les couvertures végétales à travers la libération de matière organique et d'éléments minéraux et par la réactivation de la biologie des sols, est beaucoup plus longue et fonction du potentiel chimique du sol. Malgré cela, on note que sans l'utilisation de pesticides (Avoine0, Lotier0), nous avons des productions supérieures aux pratiques traditionnelles (usage de pesticides en sol nu, cas du SN12). Les couvertures végétales (avoine et lotier) semble atténuer l'impact des pesticides. Malgré cela les résultats obtenus durant l'année 2000 sont très peu différents de ceux obtenus par Michellon (1996) qui note une production de maïs fourrager qui varie de 5 à 6 T.ha⁻¹ de matière sèche.

Nous avons une augmentation très sensible de la production du maïs lors du second cycle. Les valeurs obtenues entre les traitements sont différentes seulement en valeurs absolues. L'augmentation globale de la production en 2001 peut s'expliquer par les traitements contre la pyrale du maïs et le début de certains impacts dus aux couvertures végétales. Impacts qui ne sont pas encore significatifs au seuil imposé.

En comparaison avec la forêt non exploitée, on observe une augmentation du pH dans les trois autres sites et pour les deux profondeurs.

Quelque soit la saison et la profondeur (sauf pour le 10-20 cm en l'été), on note un plus fort taux de phosphore assimilable dans la parcelle déboisée mécaniquement. Cela s'explique par le fait que cette parcelle cultivée en canne à sucre est régulièrement fertilisée. Les valeurs du phosphore assimilable ne représentent qu'au maximum 10% du phosphore totale. Cela vient du fait que les sols de la Réunion sont en grande majorité des andosols qui comporte une structure chimique à feuillets (allophanes) qui fixe fortement la matière organique (C, N et phosphore).

En comparaison avec les sols cultivés, les parcelles forestières possèdent des taux plus élevés de carbone. Ce qui pourrait expliquer les absences de signification entre les sites lorsqu'on travaille sur les coefficients qui sont ramenés au carbone pour les biomasses et les activités respiratoires de la microflore (minéralisation du carbone).

III. 4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales fut réalisée sur les paramètres chimiques, microbiologiques et faunistiques du sol. La distribution des points variables est expliquée à 73,27% par 2 axes. L'axe 1 qui explique 52,92% de la distribution des variables est caractérisé par le carbone et l'azote total pour la partie chimique et par la densité et la biomasse de la macrofaune du sol pour la partie biologique. A l'opposé, l'axe 1 est aussi caractérisé par le phosphore total et l'activité de la microflore par l'activité de la phosphatase alcaline (Figure 19).

La projection des sites étudiés sur le graphe des variables (Figure 19) montre que l'axe 1 oppose la déforestation mécanique où l'on observe de forte concentration en phosphore aux parcelles boisées (forêts non exploitées et exploitées), caractérisées par une partie des éléments chimiques du sol (carbone et l'azote total) et la macrofaune du sol. L'axe 1 est caractérisé par la matière organique et la faune du sol. L'axe 1 définit les modes de gestion de la forêt.

L'axe 2 explique 20,35% de la distribution des variables est caractérisé par la biomasse microbienne et les activités phosphatase. La projection des sites montre que l'axe 2 oppose les sites à fortes activités microbiennes (forêt exploitée ou pas en 2000 et déforestation sélective en 2000) aux sites à fortes biomasses microbiennes (déforestation mécanique, forêt exploitée en 1999 et déforestation sélective en 1999). Cet axe 2 oppose les sites par la microflore du sol et différencie les dates de prélèvements, les saisons.

Dans le groupe où les plus faibles densités sont observées, on note que la biodiversité (nombre de groupes taxonomiques) est faible. Elle varie de 6 groupes sous SN0 à 8 sous Avoine0. La biodiversité est plus élevée sous couverture de lotier sans pesticide (Lotier0) et sous couverture de lotier associée au pesticide (Lotier12) (Figure 22).

L'étude des taxons montre que la couverture de lotier est caractérisée par les diplopodes qui représentent près de 53,28% de la densité moyenne de la population sous lotier sans pesticide (Lotier0). Malgré une diminution importante du pourcentage, les diplopodes sont encore les plus représentés sous lotier avec pesticide (Lotier12) avec 34,6% de la population. De même, sous couverture d'avoine sans pesticide (Avoine0), ils représentent 36,4% de la population (Figure 22).

Avec pesticide (Curater), les fourmis sont les plus importantes sous sol nu (SN12) avec 67,95% et sous avoine (Avoine12) avec 58,46% de la population. Sous sol nu sans pesticide (SN0), les larves de lépidoptères représentent plus de la moitié de la population avec 56,52% (Figure 22).

b) Biomasses moyennes totales de la population

L'étude des biomasses moyennes de la population met en évidence trois groupes statistiquement différents ($p \leq 0,05$) avec :

-un premier groupe où les plus faibles biomasses sont retrouvées sous maïs en sol nu sans pesticide (SN0), sous maïs en sol nu avec pesticide (Curater à la dose conseillée, SN12), et sous maïs avec avoine et pesticide (Curater à la dose conseillée, Avoine12) avec respectivement $3,99 \text{ g.m}^{-2}$, 3 g.m^{-2} et $6,18 \text{ g.m}^{-2}$ (Figure 23).

-un groupe intermédiaire avec des valeurs moyennes rencontrées sous maïs associé à l'avoine sans pesticide (Avoine0) et sous maïs associé au lotier plus pesticide (Lotier12) avec respectivement $8,47 \text{ g.m}^{-2}$ et $22,10 \text{ g.m}^{-2}$ (Figure 23).

-un troisième groupe où la plus forte biomasse est retrouvée sous la couverture de lotier sans pesticide (Lotier0) avec une biomasse moyenne de $52,74 \text{ g.m}^{-2}$ (Figure 23).

On observe que lorsque les vers de terre sont présents, dans la grande majorité des situations rencontrées, leur biomasse représente plus de 50% de la biomasse moyenne totale de la population de la macrofaune du sol. La plus faible proportion des vers de terre est retrouvée sous maïs en sol nu avec pesticide (SN12) où la biomasse des vers ne représente que 47,28% de la biomasse totale de la macrofaune.

Sous parcelles sans pesticide la biomasse des vers reste très importante. Sous le maïs sans pesticide (SN0) elle représente 77,71% de la biomasse totale, sous maïs avec avoine sans pesticide 65,62% (Avoine0) et sous lotier sans pesticide (Lotier0) 79,34%. Sous maïs avec lotier et pesticide, elle représente 67,38% de la biomasse moyenne de la population (Figure 23).

IV. 3. 3. Macrofaune prélevée en 2001

Lors de la mise en place du second cycle de maïs (fin 2000), le lindane (Gammacide) a été remplacé par une autre matière active, l'éthoprophos (Mocap20). Pour une meilleure lisibilité nous avons choisi de présenter les résultats de la macrofaune du sol de ces 15 traitements (IV.2.2) à travers 6 figures (3 pour les densités et 3 pour les biomasses).

a) Densités sous sol nu

L'étude des densités moyennes totales pour les traitements en sol nu montre trois groupes différents qui sont :

-un premier groupe où la plus faible densité est trouvée sous le maïs en sol nu avec le pesticide Mocap20 à la dose conseillée (SN22) avec $17,5 \text{ ind.m}^{-2}$ (Figure 24).

-un groupe intermédiaire avec des valeurs moyennes observées sous sol nu avec le Curater à la moitié de la dose conseillée (SN11), sous sol nu et Curater à la dose conseillée (SN12), et sous sol nu avec Mocap20 à la moitié de la dose (SN21) avec respectivement 80 ind.m^{-2} , 88 ind.m^{-2} et 108 ind.m^{-2} (Figure 24).

-le dernier groupe où la plus forte valeur est rencontrée, sous sol nu sans pesticide avec 180 ind.m^{-2} (Figure 24).

L'absence de différences significatives entre SN12, SN21 et SN22 vient de la grande variabilité observées au niveau des populations (Figure 24).

Sous sol nu, deux taxons sont les plus représentés. Il s'agit des fourmis et des larves de coléoptères. Les fourmis représentent 55,5% sous SN0, 50% sous SN12 et 55,8% sous SN21. Elles sont associées aux larves de coléoptères avec 28,57% sous SN11, et 34,3% pour les larves de coléoptères, 28,6% sous SN22 avec 57,1% pour les larves de coléoptères (Figure 24). La diversité biologique varie de 3 taxons sous SN22 à 7 taxons sous SN12.

b) Densités sous couverture d'avoine

L'analyse des densités sous couverture d'avoine met en évidence un seul groupe où de très fortes valeurs sont observées sous les différents traitements (Figure 25). Ces valeurs sont de 1450 ind.m^{-2} sous Avoine0, de 1618 ind.m^{-2} sous Avoine11, de 1290 ind.m^{-2} sous Avoine12, de 1548 ind.m^{-2} sous Avoine21 et de 863 ind.m^{-2} sous Avoine22. Les différences entre ces valeurs ne sont pas significatives ($p \leq 0,05$).

La biodiversité est plus élevée sous l'avoine en comparaison avec le sol nu. Elle varie de 10 taxons sous Avoine22 à 13 sous Avoine0.

Sous avoine, la macrofaune est caractérisée par la très forte densité des diplopodes qui représentent plus de 70% de la population totale avec respectivement 73,79% pour Avoine0, 72% pour Avoine11, 75,2% pour Avoine12, 82,2% pour Avoine21 et 72,5% pour Avoine22 (Figure 25).

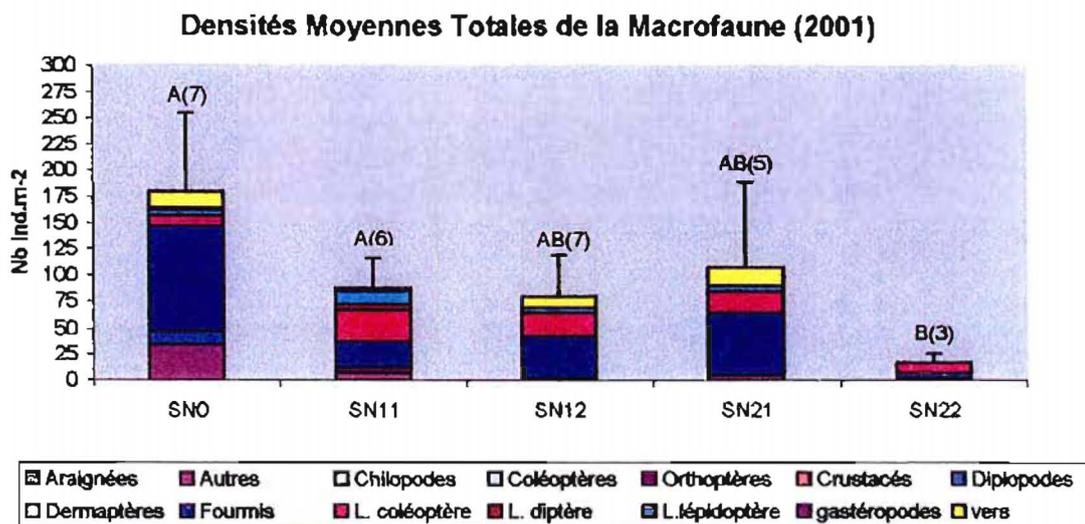


Figure 24 : Densités moyennes totales de la macrofaune du sol, en nombre d'individus par mètre carré (Nb Ind.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard. Entre parenthèses, le nombre de groupes taxonomiques.

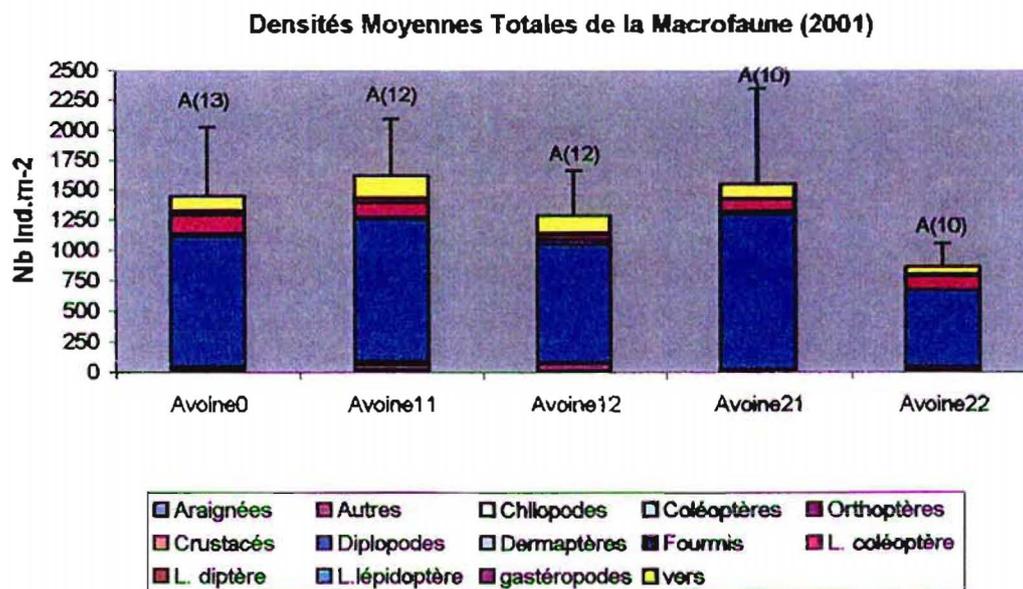


Figure 25 : Densités moyennes totales de la macrofaune du sol, en nombre d'individus par mètre carré (Nb Ind.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard. Entre parenthèses, le nombre de groupes taxonomiques.

c) Densités sous couverture de lotier

L'étude sous couverture de lotier met en évidence 3 groupes :

-un premier groupe où les plus faibles valeurs sont observées, sous lotier avec pesticide (Curater) à la moitié de la dose préconisée (Lotier11) et sous lotier avec le second pesticide (Mocap20) à la dose conseillée (Lotier22). Les valeurs sont de 683 ind.m⁻² et de 685 ind.m⁻² respectivement sous Lotier11 et Lotier22 (avec la moitié de la dose de Curater et la dose normale de Mocap20). La différence entre les deux traitements n'est pas significative ($p \leq 0,05$) (Figure 26).

-un second groupe où des valeurs intermédiaires sont observées sous lotier avec la dose normale conseillée de Curater (Lotier12) et sous lotier avec la moitié de la dose préconisée de Mocap20 (Lotier21). Les valeurs sont de 745 ind.m⁻² et 980 ind.m⁻² respectivement sous lotier avec dose normale de Curater (Lotier12) et sous lotier avec la moitié de la dose préconisée de Mocap20 (Lotier21). La différence entre ces deux traitements n'est pas significative ($p \leq 0,05$) (Figure 26).

-le dernier groupe comprend la couverture de lotier sans pesticide avec la plus forte valeur observée, 1650 ind.m⁻² (Figure 26).

Les différences observées sont significatives entre le lotier sans pesticide (Lotier0) et les deux traitements suivants, lotier avec la moitié de la dose de Curater (Lotier11) et lotier avec la dose préconisée de Mocap20 (Lotier22) (Figure 26).

Les groupes taxonomiques observés entre les traitements avec lotier varie de 10 à 12. Sur les 5 traitements, 4 sont caractérisés par les diplopodes : lotier sans pesticide (Lotier0), lotier avec la dose normale de Curater (Lotier12) et enfin lotier avec la dose normale ou de moitié de Mocap20 (Lotier21 et Lotier22) avec respectivement 60,91% (Lotier0), 46,64% (Lotier12), 60,20% (Lotier21) et 45,99% (Lotier22) de la densité moyenne totale de la macrofaune du sol (Figure 26).

d) Biomasses en sol nu

Les données des biomasses moyennes font ressortir trois groupes :

-un premier où la plus faible biomasse est retrouvée sous sol nu avec pesticide Mocap20 à la dose préconisée (SN22) avec 0,19 g.m⁻² (Figure 27).

-un groupe intermédiaire avec une valeur moyenne de biomasse sous sol nu avec pesticide, le Mocap20 à la moitié de la dose conseillée (SN21) avec 2,65 g.m⁻² (Figure 27).

-un dernier groupe comprenant le sol nu sans pesticide (SN0) et les sols nus avec le Curater aux 2 doses (SN11 et SN12) avec des valeurs qui varient de 1,98 à 4,59 g.m⁻² (Figure 27).

Les biomasses des traitements du sol nu sans pesticide (SN0) et du sol nu avec le Mocap20 à la moitié de la dose (SN21) sont caractérisées par les biomasses des vers de terre avec respectivement 68,6% et 87,5% de la biomasse moyenne totale (Figure 27).

Densités Moyennes Totales de la Macrofaune (2001)

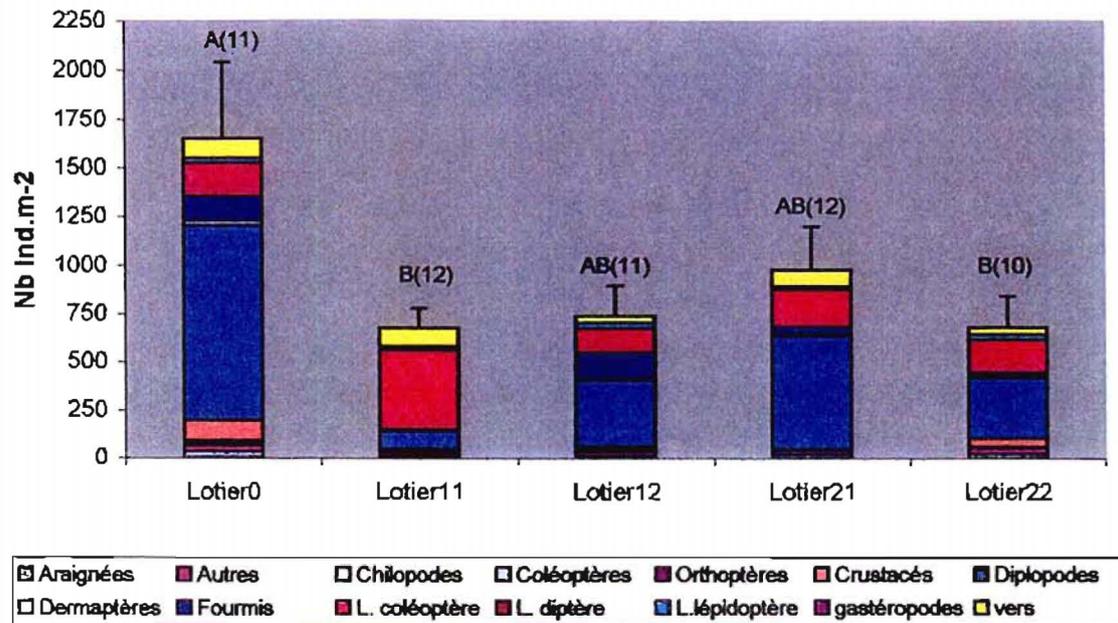


Figure 26 : Densités moyennes totales de la macrofaune du sol sous lotier, en nombre d'individus par mètre carré (Nb Ind.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard. Entre parenthèses, le nombre de groupes taxonomiques.

Biomasses Moyennes Totales de la Macrofaune (2001)

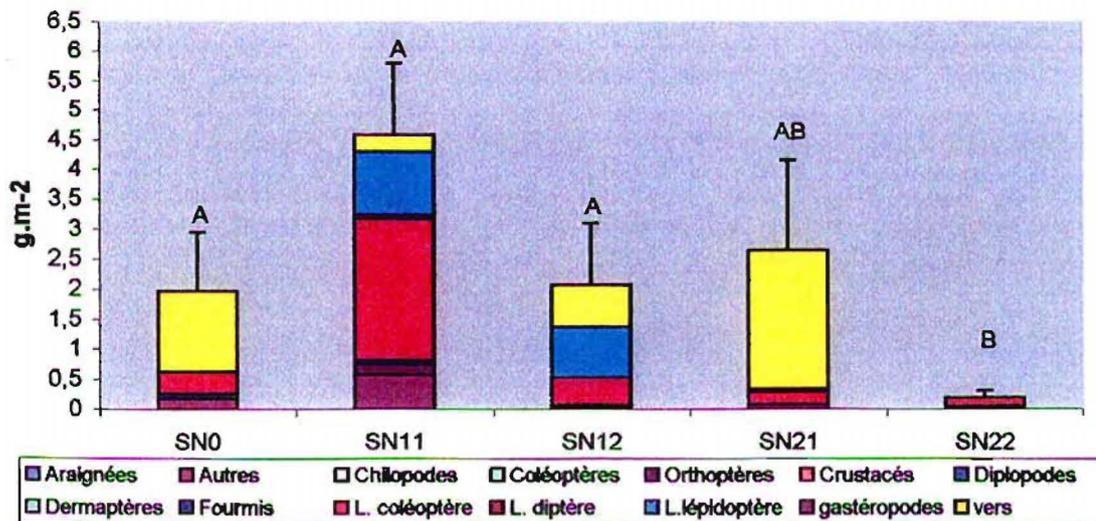


Figure 27 : Biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol sous sol nu, en gramme par mètre carré (g.m⁻²) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

Le sol nu avec le Curater à la dose conseillée (SN12) est caractérisé par les biomasses des larves de lépidoptères et de celles des vers de terre avec respectivement 40,6% et 33,8% de la biomasse totale (Figure 27).

Le sol nu avec la moitié de la dose conseillée de Curater (SN11) est caractérisé par la biomasse des larves de coléoptères qui représente 51,5% de la biomasse totale (Figure 27).

e) Biomasses sous couverture d'avoine

L'étude des biomasses moyennes de la macrofaune pour les différents traitements sous avoine ne montre aucune différence significative ($p \leq 0,05$) entre les différentes modalités. Les valeurs retrouvées varient de 27,4 g.m⁻² à 53,48 g.m⁻² (Figure 28).

On constate que pour la totalité des traitements, la biomasse des vers de terre représente plus 50% de la biomasse totale de la macrofaune. Elle varie de 59,3% sous Avoine sans pesticide (Avoine0) à 72,9% sous avoine avec la moitié de la dose préconisée du Mocap20 (Avoine21) (Figure 28).

f) Biomasses sous couverture de lotier

L'étude des biomasses moyennes permet de dégager trois groupes :

-un premier groupe où la plus faible biomasse est retrouvée sous lotier avec pesticide (Curater) à la dose conseillée (Lotier12) avec une biomasse de 17,5 g.m⁻² (Figure 29).

-un groupe intermédiaire où des valeurs moyennes sont observées sous lotier avec le Mocap20 à la dose prescrite (Lotier22), et sous lotier sans pesticide (Lotier0) avec les valeurs respectives de 23,57 g.m⁻² et de 28,86 g.m⁻² (Figure 29).

-le dernier groupe où les plus fortes biomasses sont retrouvées sous le lotier avec le Mocap20 à la moitié de la dose prescrite (Lotier21) et sous le lotier avec le Curater à la moitié de la dose préconisée (Lotier11) avec respectivement 33,74 g.m⁻² et 56,6 g.m⁻² (Figure 29).

On constate que les traitements avec la couverture de lotier sont caractérisés par deux principaux taxons, les larves de coléoptères et les vers de terre. Les larves de coléoptères sont majoritairement représentées sous lotier avec Curater à la moitié de la dose (Lotier11) avec 60,8%, sous lotier avec Curater à la dose normale (Lotier12) avec 53,2%, sous lotier avec Mocap20 à la dose normale (Lotier22) ou la moitié de la dose prescrite (Lotier21) avec respectivement 53,1% et 46,31% de la biomasse totale de la macrofaune. La biomasse des vers de terre est majoritaire sous lotier sans pesticide (Lotier0) (Figure 29).

Au niveau statistique, on observe trois groupes différents. Un groupe où les plus fortes valeurs retrouvées sous lotier avec la moitié de la dose de Curater et sous lotier avec la moitié de la dose de Mocap20 s'oppose au groupe où la plus faible valeur est obtenue, sous lotier avec la dose normale prescrite de Curater (Lotier12). Entre les deux un groupe où les valeurs moyennes ne diffèrent pas de l'un ou de l'autre des deux premiers groupes avec à l'intérieur le lotier sans pesticide (Lotier0) et le lotier avec le Mocap20 à la dose normale (Lotier22) (Figure 29).

Biomasses Moyennes Totales de la Macrofaune (2001)

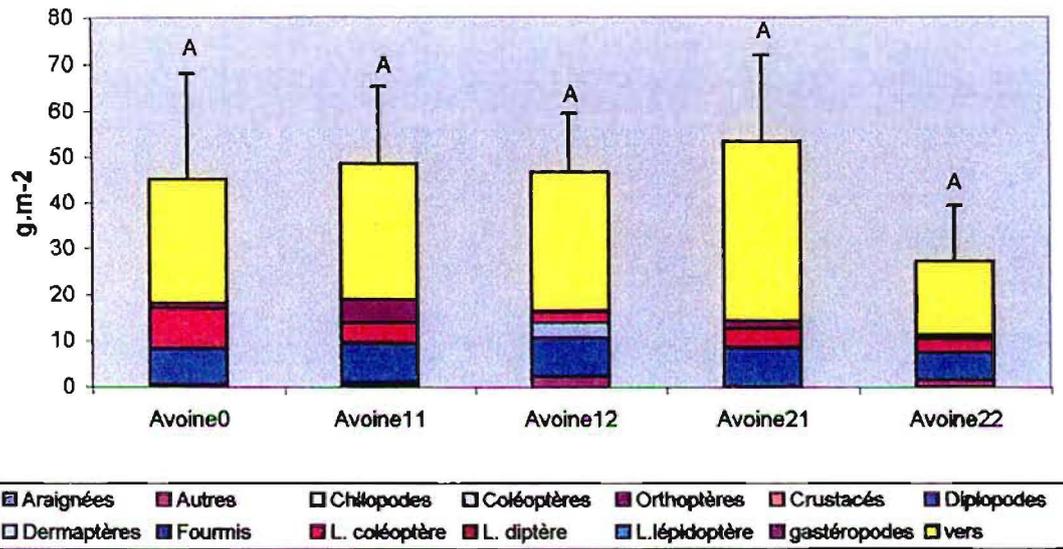


Figure 28 : Biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol sous Avoine, en gramme par mètre carré (g.m^{-2}) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

Biomasses Moyennes Totales de la Macrofaune (2001)

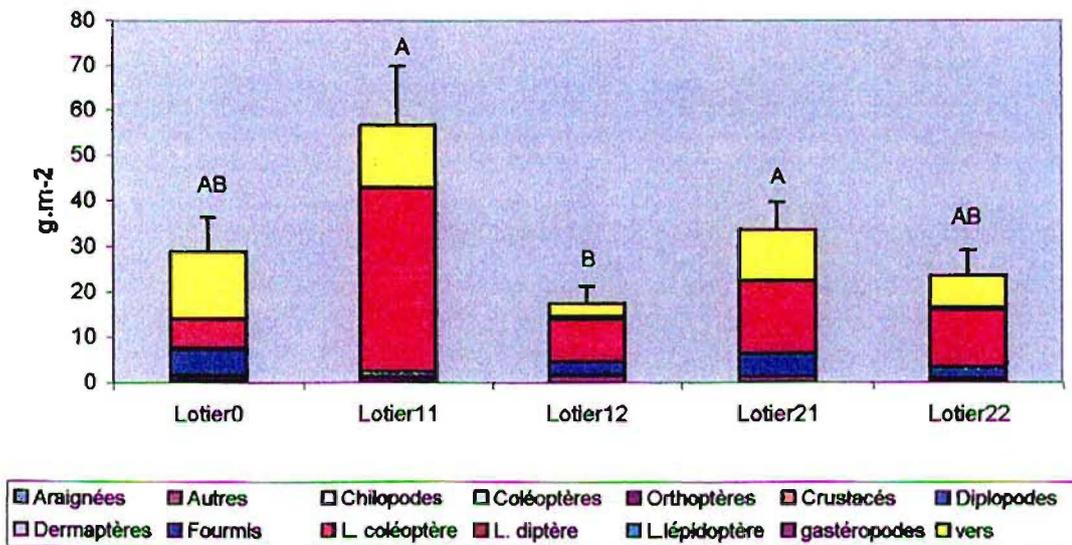


Figure 29 : Biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol sous lotier, en gramme par mètre carré (g.m^{-2}) à Cocâtres. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). La barre verticale représente l'erreur standard.

La comparaison entre le sol nu, l'avoine, le lotier selon les différentes modalités, montre des différences statistiques entre les traitements pour les densités et les biomasses moyennes de la population. Ces différences statistiques sont regroupées dans le tableau 10.

Pour les densités et les biomasses moyennes totales de la macrofaune nous avons deux groupes :

- un premier groupe avec les plus faibles densités et biomasses, comprenant tous les traitements en sol nu (Tableau 10).

- un second groupe comprenant tous les traitements avec les couvertures d'avoine et de lotier où l'on observe les plus fortes densités et biomasses (Tableau 10).

Tableau 10 : Tableau qui montre les différences statistiques entre les quinze traitements pour les densités et les biomasses moyennes totales de la macrofaune du sol pour les prélèvements de l'année 2001. Dans la même colonne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$).

Modalités expérimentales	Densités	Biomasses
Sol nu sans pesticide	ab	a
Sol nu + Curater (dose 1/2) SN11	a	a
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	a	a
Sol nu + Mocap 20 (dose 1/2) SN21	a	a
Sol nu + Mocap 20 (dose 1) SN22	a	a
<hr/>		
Avoine sans pesticide (Avoine0)	c	bc
Avoine + Curater (dose 1/2) Avoine11	c	bc
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	c	bc
Avoine + Mocap 20 (dose 1/2) Avoine21	bc	bc
Avoine + Mocap 20 (dose 1) Avoine22	bc	c
<hr/>		
Lotier sans pesticide (Lotier0)	c	bc
Lotier + Curater (dose 1/2) Lotier11	c	b
Lotier + Curater (dose 1) Lotier12	c	bc
Lotier + Mocap 20 (dose 1/2) Lotier21	c	bc
Lotier + Mocap 20 (dose 1) Lotier22	c	bc

IV. 3. 4. Discussion

L'étude de la macrofaune du sol dans les écosystèmes cultivés montrent clairement l'effet de ces systèmes sur la faune et à plusieurs niveaux.

On observe dès la première année (1999) une plus grande rapidité du lotier à restaurer la faune du sol en comparaison avec la couverture d'avoine et par rapport au sol nu car on note une différence significative entre le lotier et les deux autres traitements (sol nu et avoine). Ce résultat vient du fait que les prélèvements ont été faits juste avant que l'avoine ne soit fauchée et répartie sur les parcelles. De ce fait, les effets possibles de l'avoine (effet tampon sur les variations de température et d'humidité, et l'apport d'éléments nutritifs) ne sont pas encore visibles.

L'année suivante, en 2000, grâce aux couvertures végétales nous observons la restauration de la diversité, des densités et des biomasses de la macrofaune du sol, en comparaison avec les traitements en sol nu.

Au second cycle cultural (2001) les effets cumulés de l'avoine et du lotier semblent plus importante car les densités et les biomasses sont plus élevées. On constate à cette date deux groupes bien distincts au niveau de la macrofaune. Un premier groupe où les plus faibles densités et biomasses sont retrouvées en sol nu quelque soit les traitements et un second groupe où ces paramètres sont significativement les plus élevés avec les couvertures de lotier et d'avoine.

La restauration de la macrofaune du sol par les couvertures végétales s'explique par l'apport d'éléments nutritifs à travers les litières et par leur effet tampon sur l'eau et la température. On note que les groupes taxonomiques sont influencés différemment selon la qualité intrinsèque de la couverture (graminée ou légumineuse).

L'étude réalisée en sol nu montre bien les effets négatifs du Mocap20 à la dose normale sur la faune du sol. A la moitié de la dose, ces effets sont moindres. Le Curater inhibe sélectivement la macrofaune, en inhibant le développement des vers de terre (biomasses plus faibles). Cet effet sélectif du Curater à l'encontre des vers de terre, est aussi observé sous les couvertures en 2000.

Les effets dépressifs des pesticides sont inhibés par les couvertures végétales. Les effets inhibiteurs de l'avoine à l'encontre des effets négatifs des pesticides sur la faune, bien que plus tardives que celles du lotier, sont plus importantes que celles du lotier. Sous l'avoine, les vers de terre semblent mieux se développer.

Les pesticides ont un effet néfaste sur les vers de terre. L'effet du Mocap20 est plus accentué que celui du Curater. La toxicité des pesticides à l'encontre des vers de terre avaient déjà été mise en évidence par les travaux de Potter et al. (1994).

Cette différence entre le lotier et l'avoine vis à vis des pesticides et de la macrofaune du sol trouve certainement son origine dans la qualité des litières, non seulement dans l'apport d'éléments nutritifs mais aussi dans les mécanismes, peu connus, antagonistes aux effets des pesticides.

IV. 4. ETUDE DE LA MICROFLORE DU SOL EN FONCTION DES MODALITES EXPERIMENTALES

IV. 4. 1. Biomasses microbiennes

a) *Prélèvements de Novembre 1999*

L'étude des biomasses microbiennes sur les prélèvements de novembre 1999 montre une plus forte valeur sous la couverture d'avoine. Les valeurs calculées en mg de carbone par rapport à un kilogramme de sol varient de 63,76 mg C/Kg sol sec sous sol nu, à 99 mg de C/Kg de sol sec sous couverture de lotier et à 128 mg de C/Kg de sol sec sous avoine (Figure 30).

Les différences observées sont significatives au seuil de 1% entre le sol nu, le lotier et l'avoine (Figure 31).

Quand nous rapportons les valeurs absolues au carbone total du sol, les plus fortes valeurs sont observées sous les deux couvertures et elles sont significativement ($p \leq 0,01$) plus élevées que celle rencontrée sous sol nu (Figure 31).

b) *Prélèvements de l'année 2000*

Les résultats des biomasses microbiennes obtenus sur les prélèvements d'avril 2000, ne montrent aucune différences significatives ($p \leq 0,05$) entre les traitements malgré des valeurs qui varient de 69,34 mg de C/Kg de sol sec sous sol nu avec le Curater à la moitié de la dose préconisée (SN12) à 140,57 mg de C/Kg de sol sec sous couverture d'avoine avec la moitié de la dose de Gammacide (lindane, Avoine21).

Les 15 traitements sont représentés dans le tableau 11. De même nous avons placé dans le même tableau les valeurs des biomasses microbiennes qui sont exprimées en fonction des taux de carbone dans le sol. Les coefficients varient de 0,107% sous sol nu avec Curater à la dose conseillée (SN12) à 0,199% sous lotier avec la dose normale préconisée pour le Gammacide (Lotier22). Les différences observées ne sont pas significativement différentes ($p \leq 0,05$) (Tableau 11).

c) *Prélèvements de l'année 2001*

L'analyse des biomasses microbiennes sur les prélèvements de 2001 montre des valeurs plus élevées qu'en 2000. Elles varient de 148 mg C/Kg sol sous sol nu avec le Curater à la dose normale (SN12) à 250 mg C/Kg de sol sous l'avoine avec du Mocap20 à dose normale (Avoine22) (Tableau 12).

En rapportant les valeurs absolues au carbone du sol, les données obtenues varient de 0,24% à 0,38%. Globalement sous les couvertures, les coefficients sont plus élevés (Tableau 12).

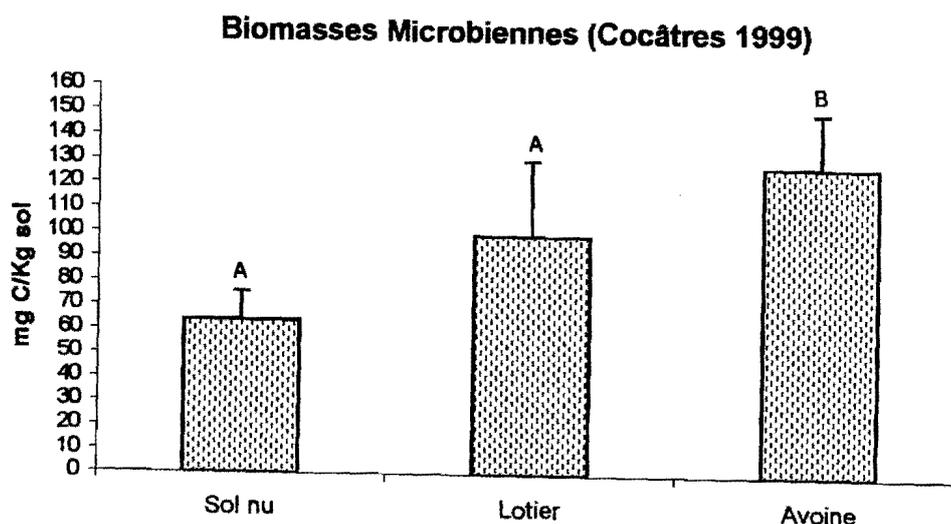


Figure 30 : Biomasses microbiennes exprimées en mg de carbone par kg de sol sec. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,01$). La barre verticale représente l'écart type.

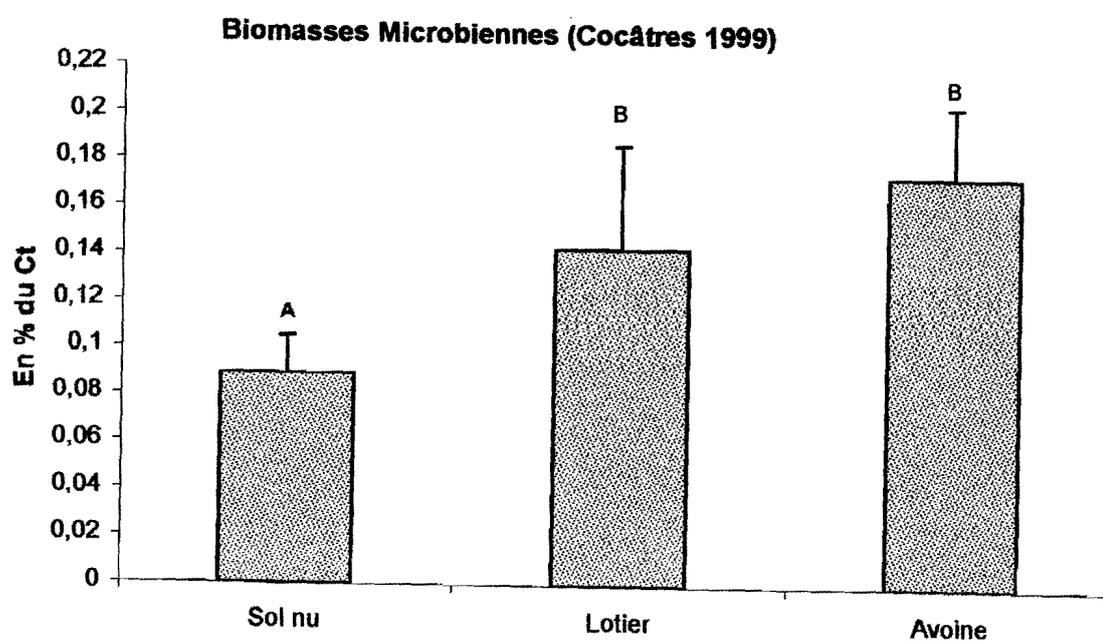


Figure 31 : Biomasses microbiennes exprimées en pour-cent du carbone total du sol. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,01$). La barre verticale représente l'écart type.

Tableau 11 : Biomasses moyennes de la microflore du sol prélevée en 2000 à Cocâtres. Les données sont exprimées en mg C/Kg de sol sec et en pour-cent du carbone du sol. La même lettre, dans la même colonne indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). L'erreur standard est entre parenthèses.

Modalités expérimentales	Biomasses microbiennes (mg C/kg sol sec)	Biomasses microbiennes (en % du carbone total)
Sol nu sans pesticide (SN0)	97,35 a (17,14)	0,127 a (0,022)
Sol nu + Curater (dose ½) SN11	82,79 a (20,04)	0,113a (0,027)
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	69,34 a (8,32)	0,107 a (0,013)
Sol nu + Gammacide (dose ½) SN21	101,31 a (16,69)	0,135 a (0,022)
Sol nu + Gammacide (dose 1) SN22	85,61 a (14,21)	0,123 a (0,02)
Avoine sans pesticide (Avoine0)	100,31 a (23,85)	0,156 a (0,037)
Avoine + Curater (dose ½) Avoine11	109 a (18,36)	0,143 a (0,024)
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	93,34 a (19,66)	0,124 a (0,026)
Avoine + Gammacide (dose ½) Avoine21	140,57 a (6,31)	0,178 a (0,008)
Avoine + Gammacide (dose 1) Avoine22	109,89 a (11,30)	0,143 a (0,015)
Lotier sans pesticide (Lotier0)	119,35 a (22,42)	0,165 a (0,031)
Lotier + Curater (dose ½) Lotier11	100,88 a (5,7)	0,141 a (0,008)
Lotier + Curater (dose 1) Lotier12	111,48 a (23,01)	0,156 a (0,032)
Lotier + Gammacide (dose ½) Lotier21	105,78 a (25,36)	0,166 a (0,04)
Lotier + Gammacide (dose 1) Lotier22	129,86 a (37,16)	0,199 a (0,057)

Tableau 12 : Biomasses moyennes de la microflore du sol prélevée en 2001 à Cocâtres. Les données sont exprimées en mg C/Kg de sol sec et en pour-cent du carbone du sol. La même lettre, dans la même colonne indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). L'erreur standard est entre parenthèses.

Modalités expérimentales	Biomasses microbiennes (mg C/kg sol sec)	Biomasses microbiennes (en % du carbone total)
Sol nu sans pesticide (SN0)	197,81 abcdefghij (11,19)	0,27 abcdefj (0,015)
Sol nu + Curater (dose ½) SN11	183,13 abcefghij (22,73)	0,247 acdff (0,031)
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	148,58 abfj (23,32)	0,24 acdfj (0,038)
Sol nu + Mocap20 (dose ½) SN21	186,56 acdfhij (20,48)	0,248 adcfj (0,028)
Sol nu + Mocap20 (dose 1) SN22	215,74 bcdeghij (26,59)	0,337 bcdeghij (0,042)
Avoine sans pesticide (Avoine0)	165,6 abfhi (17,04)	0,282 cdefgij (0,029)
Avoine + Curater (dose ½) Avoine11	190,06 abcfnij (13,29)	0,318 deg hij (0,022)
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	232,89 cdeghij (28,97)	0,317 deg hij (0,039)
Avoine + Mocap20 (dose ½) Avoine21	210,85 defghij (34,09)	0,303 defghij (0,049)
Avoine + Mocap20 (dose 1) Avoine22	250 eghi (33,21)	0,339 eghij (0,038)
Lotier sans pesticide (Lotier0)	156,66 fg (14,37)	0,235 fj (0,022)
Lotier + Curater (dose ½) Lotier11	247,68 ghi (18,65)	0,355 ghij (0,017)
Lotier + Curater (dose 1) Lotier12	213,94 hij (11,47)	0,38 hi (0,02)
Lotier + Mocap20 (dose ½) Lotier21	228,51 ij (31,7)	0,36 ij (0,05)
Lotier + Mocap20 (dose 1) Lotier22	182,99 j (12,72)	0,282 j (0,02)

d) Evolution des biomasses microbiennes entre 1999 et 2001

La comparaison des biomasses microbiennes (exprimées en pour-cent du carbone du sol) entre 1999 et 2001 montre une augmentation des valeurs entre les systèmes non cultivés (1999) et les systèmes cultivés au cours des temps (2000 et en 2001) (Tableau 13 A).

A l'exception du sol nu où l'augmentation des biomasses est significative de 1999 à 2001, sous les couvertures, l'augmentation ne l'est qu'à partir de la seconde année de culture (Tableau 13 A).

Dans le Tableau 13 A sont regroupées les comparaisons entre le sol nu de 1999 avec les sols nus sans pesticide de 2000 et 2001, le lotier de 1999 avec les lotiers sans pesticide de 2000 et 2001 et l'avoine de 1999 avec les avoines sans pesticide de 2000 et 2001.

Dans le Tableau 13 B, nous avons les comparaisons entre les autres traitements sur les années 2000 et 2001. On observe que les biomasses en 2001 sont significativement plus élevées qu'en 2000 ($p \leq 0,01$).

Tableau 13 A : Comparaison des biomasses microbiennes, exprimées en pour-cent du carbone du sol. Dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$).

	Sol nu en 1999	Sol nu sans pesticide 2000 (SN0)	Sol nu sans pesticide 2001 (SN0)
Coefficients	0,089 a	0,127 b	0,270 c
	Lotier 1999	Lotier sans pesticide 2000 (Lotier0)	Lotier sans pesticide 2001 (Lotier0)
Coefficients	0,143 a	0,165 ab	0,235 b
	Avoine 1999	Avoine sans pesticide 2001 (Avoine0)	Avoine sans pesticide 2001 (Avoine0)
Coefficients	0,174 a	0,156 ab	0,282 b

Tableau 13 B : Comparaison des biomasses microbiennes exprimées en pour-cent du carbone du sol pour les différents traitements entre les années 2000 et 2001. Dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,01$).

	2000	2001
coefficients	Sol nu avec Curater (1/2) (SN11) 0,113 a	Sol nu avec Curater (1/2) (SN11) 0,247 b
coefficients	Sol nu avec Curater (1) (SN12) 0,107 a	Sol nu avec Curater (1) (SN12) 0,240 b
coefficients	Sol nu + Gammacide (1/2) (SN21) 0,135 a	Sol nu+Mocap20 (1/2) (SN21) 0,248 b
coefficients	Sol nu + Gammacide (1) (SN22) 0,123 a	Sol nu+Mocap20(1) (SN22) 0,337 b
coefficients	Avoine + Curater (1/2) (Avoine11) 0,143 a	Avoine+Curater (1/2) (Avoine11) 0,318 b
coefficients	Avoine + Curater (1) (Avoine12) 0,124 a	Avoine+Curater (1) (Avoine12) 0,317 b
coefficients	Avoine+Gammacide (1/2) (Avoine21) 0,178 a	Avoine+Mocap20 (1/2) (Avoine21) 0,303 b
coefficients	Avoine+Gammacide (1) (Avoine22) 0,143 a	Avoine+Mocap20 (1) (Avoine22) 0,339 b
coefficients	Lotier+Curater (1/2) (Lotier11) 0,141 a	Lotier+Curater (1/2) (Lotier11) 0,355 b
coefficients	Lotier+Curater (1) (Lotier12) 0,156 a	Lotier+Curater (1) (Lotier12) 0,380 b
coefficients	Lotier+Gammacide (1/2) (Lotier21) 0,166 a	Lotier+Mocap20 (1/2) (Lotier21) 0,360 b
Coefficients	Lotier+Gammacide (1) (Lotier22) 0,199 a	Lotier+Mocap20 (1) (Lotier22) 0,282 b

IV. 4. 2. Coefficients de minéralisation du carbone

a) Prélèvements de Novembre 1999

Les résultats de l'étude sur cinq semaines du dégagement du gaz carbonique du sol sont exprimés en pour-cent du carbone du sol afin de s'affranchir de l'hétérogénéité du sol. Les résultats pour les prélèvements de 1999 montrent une plus forte activité respiratoire de la microflore sous avoine et lotier. Cependant la différence n'est significative qu'entre le sol nu et la couverture d'avoine (Figure 32). Au bout de cinq semaines les valeurs varient de 0,7% sous sol nu à 1,16% sous couverture d'avoine.

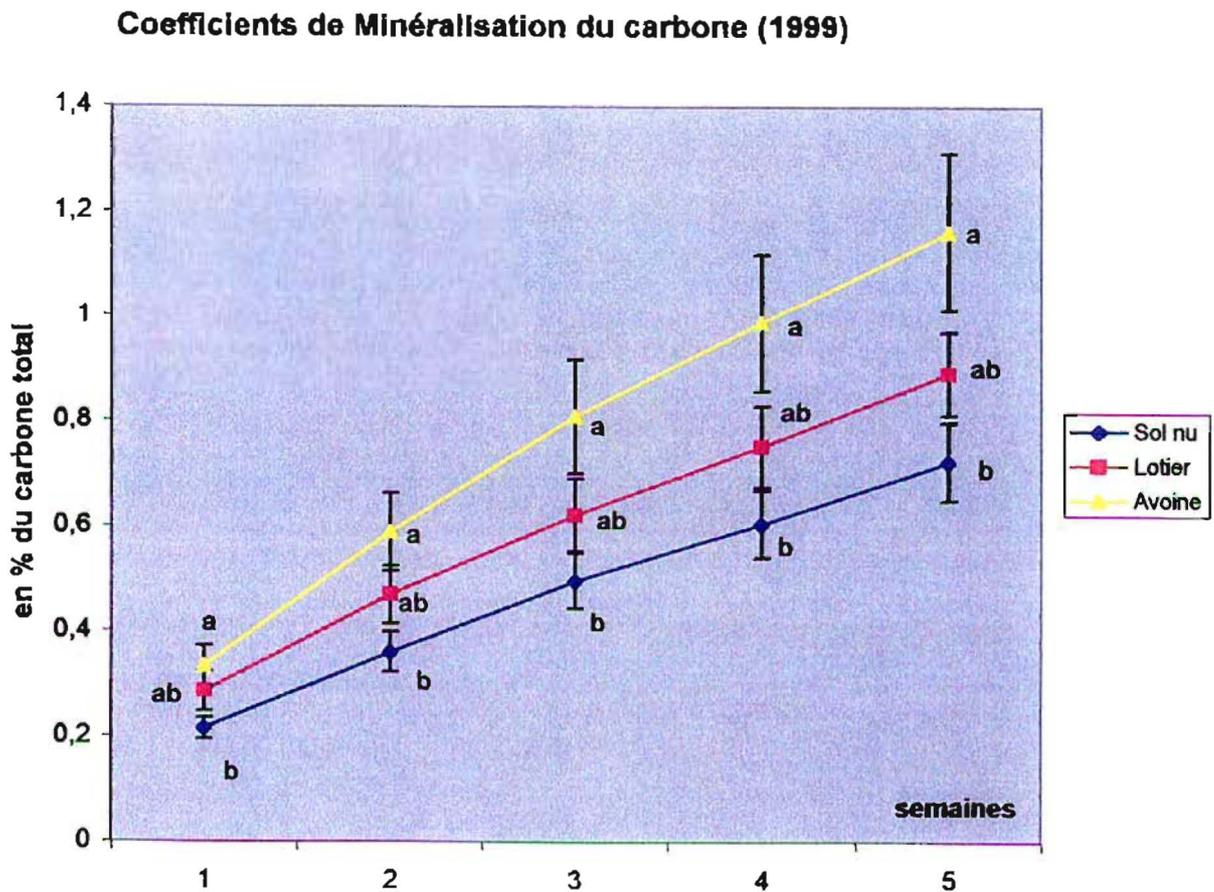


Figure 32 : Coefficients de minéralisation du carbone (courbes cumulées) en fonction des différents traitements en 1999. La même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$) pour la même semaine. La barre verticale représente l'erreur standard.

b) Prélèvements de l'année 2000

Le tableau 14 regroupe les valeurs des différents coefficients de minéralisation du carbone pour les prélèvements réalisés en 2000. Les différences observées au seuil de 5% ne sont pas significatives. Afin de faciliter la lecture du tableau seuls les valeurs cumulées des 5 semaines (somme de la 1^e, 2^e, 3^e, 4^e et 5^e semaine) sont présentées.

Tableau 14 : Coefficients de minéralisation du carbone (prélèvements en 2000). Valeurs cumulées sur 5 semaines. Les valeurs sont exprimées en pour-cent du carbone du sol. Dans la même colonne la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). L'erreur standard est entre parenthèses.

Modalités expérimentales	Coefficients de minéralisation du carbone (en % du carbone total)
Sol nu sans pesticide (SN0)	0,108 a (0,028)
Sol nu + Curater (dose ½) SN11	0,103 a (0,03)
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	0,066 a (0,006)
Sol nu + Gammacide (dose ½) SN21	0,082 a (0,006)
Sol nu + Gammacide (dose 1) SN22	0,121 a (0,034)
Avoine sans pesticide (Avoine0)	0,113 a (0,004)
Avoine + Curater (dose ½) Avoine11	0,122 a (0,012)
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	0,112 a (0,014)
Avoine + Gammacide (dose ½) Avoine21	0,155 a (0,014)
Avoine + Gammacide (dose 1) Avoine22	0,136 a (0,012)
Lotier sans pesticide (Lotier0)	0,145 a (0,007)
Lotier + Curater (dose ½) Lotier11	0,12 a (0,033)
Lotier + Curater (dose 1) Lotier12	0,11 a (0,01)
Lotier + Gammacide (dose ½) Lotier21	0,112 a (0,038)
Lotier + Gammacide (dose 1) Lotier22	0,135 a (0,041)

c) *Prélèvements de l'année 2001*

Le tableau 15 regroupe les valeurs des différents coefficients de minéralisation du carbone pour les prélèvements réalisés en 2001. Les valeurs obtenues en 2001 sont globalement plus élevées qu'en 2000. Afin de faciliter la lecture du tableau seuls les valeurs cumulées des 5 semaines (somme de la 1^e, 2^e, 3^e, 4^e et 5^e semaine) sont présentées.

Tableau 15 : Coefficients de minéralisation du carbone (prélèvements en 2001). Valeurs cumulées sur 5 semaines. Les valeurs sont exprimées en pour-cent du carbone du sol. **Dans la même colonne la même lettre indique que la différence est significative ($p \leq 0,05$).** L'erreur standard est entre parenthèses.

Modalités expérimentales	Coefficients de minéralisation du carbone (en % du carbone total)
Sol nu sans pesticide (SN0)	0,333 ad (0,032)
Sol nu + Curater (dose ½) SN11	0,346 c (0,042)
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	0,174 d (0,033)
Sol nu + Mocap20 (dose ½) SN21	0,329 adefghijklmn (0,088)
Sol nu + Mocap20 (dose 1) SN22	0,314 eo (0,028)
Avoine sans pesticide (Avoine0)	0,349 p (0,044)
Avoine + Curater (dose ½) Avoine11	0,416 fq (0,03)
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	0,523 gr (0,136)
Avoine + Mocap20 (dose ½) Avoine21	0,5 h (0,085)
Avoine + Mocap20 (dose 1) Avoine22	0,433 bcdiopqrs (0,052)
Lotier sans pesticide (Lotier0)	0,386 j (0,026)
Lotier + Curater (dose ½) Lotier11	0,454 k (0,089)
Lotier + Curater (dose 1) Lotier12	0,472 l (0,091)
Lotier + Mocap20 (dose ½) Lotier21	0,502 ms (0,047)
Lotier + Mocap20 (dose 1) Lotier22	0,324 n (0,034)

d) Evolution des coefficients de minéralisation entre 1999 et 2001

La comparaison des coefficients de minéralisation du carbone entre 1999 et 2001 montre que sous les systèmes non cultivés les valeurs sont plus élevées et significativement supérieures à celles rencontrées sous systèmes cultivés en 2000 et en 2001 (Tableau 16 A et B).

On note une diminution significative de la minéralisation lors de la mise en culture. Lors de la seconde culture, en 2001 on observe une reprise significative de l'activité de la microflore par rapport à l'année 2000 (Tableau 16 A).

La comparaison entre les deux systèmes cultivés entre eux montre que les valeurs de minéralisation du carbone sont plus élevées la seconde année (2001) (Tableau 16 B).

Dans le Tableau 16 A sont regroupées les comparaisons entre le sol nu de 1999 avec les sols nus sans pesticide de 2000 et 2001, le lotier de 1999 avec les lotiers sans pesticide de 2000 et 2001 et l'avoine de 1999 avec les avoines sans pesticide de 2000 et 2001.

Dans le Tableau 16 B, nous avons les comparaisons entre les autres traitements sur les années 2000 et 2001. La minéralisation est significativement plus élevée en seconde année de culture.

Tableau 16 A : Comparaison des coefficients de minéralisation du carbone, en pour-cent du carbone du sol (valeurs cumulées sur 5 semaines). Dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,01$).

	Sol nu en 1999	Sol nu sans pesticide 2000 (SN0)	Sol nu sans pesticide 2001 (SN0)
Coefficients	0,72 a	0,108 b	0,333 c
	Lotier 1999	Lotier sans pesticide 2000 (Lotier0)	Lotier sans pesticide 2001 (Lotier0)
Coefficients	0,89 a	0,145 b	0,386 c
	Avoine 1999	Avoine sans pesticide 2001 (Avoine0)	Avoine sans pesticide 2001 (Avoine0)
Coefficients	1,162 a	0,113 b	0,349 c

Tableau 16 B : Comparaison des coefficients de minéralisation du carbone, en pour-cent du carbone du sol (valeurs cumulées sur 5 semaines) pour les différents traitements entre les années 2000 et 2001. Dans la même ligne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,01$).

	2000	2001
coefficients	Sol nu avec Curater (1/2) (SN11) 0,103 a	Sol nu avec Curater (1/2) (SN11) 0,346 b
coefficients	Sol nu avec Curater (1) (SN12) 0,066 a	Sol nu avec Curater (1) (SN12) 0,174 b
coefficients	Sol nu + Gammacide (1/2) (SN21) 0,082 a	Sol nu+Mocap20 (1/2) (SN21) 0,329 b
coefficients	Sol nu + Gammacide (1) (SN22) 0,121 a	Sol nu+Mocap20(1) (SN22) 0,314 b
coefficients	Avoine + Curater (1/2) (Avoine11) 0,122 a	Avoine+Curater (1/2) (Avoine11) 0,416 b
coefficients	Avoine + Curater (1) (Avoine12) 0,112 a	Avoine+Curater (1) (Avoine12) 0,523 b
coefficients	Avoine+Gammacide (1/2) (Avoine21) 0,155 a	Avoine+Mocap20 (1/2) (Avoine21) 0,5 b
coefficients	Avoine+Gammacide (1) (Avoine22) 0,136 a	Avoine+Mocap20 (1) (Avoine22) 0,433 b
coefficients	Lotier+Curater (1/2) (Lotier11) 0,12 a	Lotier+Curater (1/2) (Lotier11) 0,454 b
coefficients	Lotier+Curater (1) (Lotier12) 0,11 a	Lotier+Curater (1) (Lotier12) 0,472 b
coefficients	Lotier+Gammacide (1/2) (Lotier21) 0,112 a	Lotier+Mocap20 (1/2) (Lotier21) 0,502 b
Coefficients	Lotier+Gammacide (1) (Lotier22) 0,135 a	Lotier+Mocap20 (1) (Lotier22) 0,324 b

IV. 4. 3. Activités enzymatiques

L'activité phosphatase alcaline a été mesurée pour l'ensemble des traitements en 1999 et en 2000 à pH 11 dans les couches de sol 0-10 cm et 10-20 cm.

a) Prélèvements de 1999

En valeur absolue, les valeurs calculées dans l'horizon 0-10 cm du sol varient de 116,17 μg p-Nitrophénol/g sol/heure sous sol nu à 160,79 μg p-Nitrophénol/g sol/heure sous couverture de lotier (Tableau 17).

Dans l'horizon 10-20 cm du sol, les valeurs varient de 100,94 μg p-Nitrophénol/g sol/heure sous l'avoine à 123,63 μg p-Nitrophénol/g sol/heure sous lotier. Les différences observées pour les deux horizons ne sont pas significatives ($p \leq 0,05$) (Tableau 17).

Quand on rapporte les valeurs absolues à la matière organique du sol et plus précisément au carbone du sol, les coefficients varient de 17,6 à 24,89 dans la couche 0-10 cm de sol et de 16,44 à 21,5 dans l'horizon 10-20 cm. Les différences ne sont pas significatives ($p \leq 0,05$) (Tableau 17).

Tableau 17 : Activités de la phosphatase alcaline (en μg p-Nitrophénol/gramme de sol sec/heure) et les coefficients (en pour cent du carbone du sol) en 1999 dans les horizons 0-10 cm et 10-20 cm du sol. La même lettre dans la même ligne indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,05$). L'erreur standard est entre parenthèses.

	Traitements		
	Sol nu	Avoine	Lotier
Activités 0-10 cm	116,17 a (48,5)	135,74 a (46,6)	160,79 a (50,00)
Coefficient 0-10 cm	17,62 a (7,36)	20,97 a (7,20)	24,89 a (7,74)
Activités 10-20 cm	122,7 a (18,28)	100,94 a (25,12)	123,63 a (25,94)
Coefficients 10-20 cm	21,15 a (3,15)	16,44 a (4,09)	21,53 a (4,52)

b) Prélèvements de 2000

Les activités phosphatase alcaline sur les prélèvements de 2000 ne montrent aucune différences significatives ($p \leq 0,05$) entre les traitements. La même observation est faite pour les coefficients par rapport au carbone du sol.

IV. 4. 4. Discussion

Les systèmes non cultivés en 1999 (sol nu, avoine, lotier) malgré des valeurs de biomasses microbiennes plus faibles que celles rencontrées sous systèmes cultivés en 2000 et en 2001, mettent en évidence des différences significatives entre les parcelles.

Ces différences ne sont plus retrouvées en 2000, quand les systèmes commencent à être cultivés, aussi bien pour les biomasses que pour les valeurs des coefficients de minéralisation du carbone. On observe au cours du second cycle cultural (2001) une augmentation significative des biomasses et des coefficients de minéralisation par rapport à la première culture. La minéralisation du carbone diminue lors de la mise en culture et augmente à nouveau de façon significative lors du second cycle cultural. Les éléments nutritifs du sol sont au départ immobilisés par les couvertures pour leur propre croissance.

Au stade de ces résultats, on peut observer que les couvertures végétales augmentent les biomasses et les coefficients de minéralisation du carbone du sol. De même, les pesticides étudiés (Curater, Mocap20, Gammacide), n'ont pas d'effets sur la microflore du sol à travers l'étude de sa biomasse et de ses activités (minéralisation du carbone) dans le temps. Les résultats obtenus, notamment en sol nu montrent que les pesticides utilisés à la moitié de la dose normale ont globalement le même effet sur les biomasses et les coefficients de minéralisation que les doses préconisées elles mêmes. On peut donc conseiller de n'utiliser que la moitié de la dose. Certains résultats non significatifs peut venir des forts taux de matière organique qui pourrait masquer les différences.

L'analyse des activités de la phosphatase alcaline ne montre aucune différence entre les différents traitements et dans les différents horizons du sol. Dans notre cas, il semblerait que ce facteur ne soit pas le mieux adapter pour différencier les modalités mises en place. De même, les fortes liaisons qui existent entre le phosphore et les allophanes peuvent expliquer ces résultats.

Cependant contrairement à plusieurs travaux qui localisent les fortes activités de la phosphatase dans le sol dans l'horizon 0-5 et 5-10 cm en fonction des sols, on observe que dans les andosols il existe un fort potentiel d'activité phosphatase alcaline dans l'horizon 10-20 cm.

Par rapport à l'environnement pédologique, le lotier semble en premier agir sur la macrofaune du sol, tandis que l'impact de la couverture d'avoine semble être localisé en premier sur la microflore du sol.

IV. 5. ETUDE DES PARAMETRES CHIMIQUES DU SOL EN FONCTION DES MODALITES EXPERIMENTALES

IV. 5. 1. Résultats

L'analyse des échantillons de sol prélevés en 1999 ne montrent aucune différences significatives ($p \leq 0,05$) entre le sol nu, le lotier et l'avoine pour les éléments chimiques du sol.

Sur les analyses chimiques de sol réalisées sur les échantillons de 2000 les différences ne sont significatives que pour le potassium et le sodium dans l'horizon 0-10 cm et 10-20 cm (Tableau 18A).

Pour l'année 2001, les différences au niveau du potassium ne sont significatives qu'au seuil de 8% alors qu'elles le sont au seuil de 5% pour le sodium (Tableau 18 B).

Dans les Tableaux 18 A et B, seuls les valeurs de potassium et de sodium sont représentés.

Dans l'horizon 0-10 cm on note une augmentation significative du sodium et du potassium sous couverture d'avoine et de lotier (Tableau 18A).

Dans l'horizon 10-20 cm, seule une augmentation significative du potassium sous avoine et du sodium sous lotier est observée (Tableau 18A).

IV. 5. 2. Evolution des éléments chimiques dans le temps

La comparaison entre 1999 et 2001 pour le sol nu (1999) et les sols nus sans pesticide de 2000 et de 2001 montre une évolution significative du carbone total dans le sol (Tableau 19).

La comparaison pour le lotier et l'avoine sans pesticide en 2000 et 2001, ne montre aucune différence significative (Tableau 19). Néanmoins, en 2001 on note une augmentation relative du carbone sous avoine par rapport à l'année 1999.

Les comparaisons pour chaque traitement aux deux dates de prélèvements (2000 et 2001) sont représentés dans les tableaux 20A et 20B.

Une diminution significative du phosphore assimilable est observée sous le sol nu avec Curater à la dose préconisée (SN12) entre les années 2000 et 2001 (Tableau 20 A et B). De même une augmentation significative du carbone total sous couverture d'avoine avec le Curater à la moitié de la dose conseillée (Avoine11) est obtenue.

Tableau 18 A : Résultats des analyses chimiques pour le potassium (mé/100g de sol) et le sodium (mé/100g de sol) de l'année 2000 pour les horizons 0-10 cm et 10-20 cm. Dans la même colonne pour le même élément, la même lettre indique que la différence n'est pas significative ($p \leq 0,01 \leq 0,05$).

Modalités expérimentales	K (0-10 cm)	Na (0-10 cm)	K (10-20 cm)	Na (10-20cm)
Sol nu sans pesticide (SN0)	0,41 ad	0,08 def	0,28 ce	0,07 ade
Sol nu + Curater (dose ½) SN11	0,41 ad	0,05 ad	0,37 cdf	0,05 afg
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	0,27 a	0,05 ad	0,23 dg	0,02 ah
Sol nu + Gammacide (dose ½) SN21	0,35 aef	0,03 a	0,3 cdg	0,03 ai
Sol nu + Gammacide (dose 1) SN22	0,31 ag	0,04 a	0,26 cdg	0,04 aj
Avoine sans pesticide (Avoine0)	0,81 c	0,06 be	0,52 aefgh	0,05 bfk
Avoine + Curater (dose ½) Avoine11	0,69 c	0,05 be	0,46 aefgh	0,05 bdfil
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	0,63 cde	0,05 be	0,49 aefgh	0,04 bfim
Avoine+Gammacide (dose ½) Avoine21	0,77 c	0,05 be	0,55 aefg	0,03 bf
Avoine+Gammacide (dose 1) Avoine22	0,8 c	0,03 b	0,62 aefgi	0,05 b
Lotier sans pesticide (Lotier0)	0,58 bfg	0,09 cf	0,31 befi	0,09 ceghijm
Lotier+Curater (dose ½) Lotier11	0,62 bf	0,11 cf	0,39 befi	0,09 ceghijklm
Lotier+Curater (dose 1) Lotier12	0,67 b	0,12 c	0,37 b	0,12 ceghijklm
Lotier+Gammacide (dose ½) Lotier21	0,65 b	0,11 cf	0,32 befhi	0,08 ceghijklm
Lotier+Gammacide (dose 1) Lotier22	0,6 bf	0,1 cf	0,32 befhi	0,08 ceghijklm

Tableau 18 B : Résultats des analyses chimiques en 2001 pour le potassium (mé/100g de sol) et le sodium (mé/100g de sol) pour les horizons 0-10 cm et 10-20 cm. Dans la même colonne pour le même élément, la même lettre indique que la différence est significative ($p \leq 0,01 \leq 0,05$).

Modalités expérimentales	K (0-10 cm)	Na (0-10 cm)	K (10-20 cm)	Na (10-20cm)
Sol nu sans pesticide (SN0)	0,35	0,07 ab	0,26	0,05 ab
Sol nu + Curater (dose ½) SN11	0,31	0,05 cde	0,31	0,05 cd
Sol nu + Curater (dose 1) SN12	0,25	0,04 fghi	0,21	0,04 efgh
Sol nu + Mocap20 (dose ½) SN21	-	-	-	-
Sol nu + Mocap20 (dose 1) SN22	0,32	0,05	0,28	0,05 ij
Avoine sans pesticide (Avoine0)	0,51	0,08	0,46	0,06 lr
Avoine + Curater (dose ½) Avoine11	0,68	0,09 l	0,47	0,06 mp
Avoine + Curater (dose 1) Avoine12	0,62	0,08	0,42	0,06 nq
Avoine+Mocap20 (dose ½) Avoine21	0,62	0,08	0,45	0,07
Avoine+Mocap20 (dose 1) Avoine22	0,49	0,47 m	0,57	0,07
Lotier sans pesticide (Lotier0)	0,64	0,12 acfj	0,37	0,11 aceiklmn
Lotier+Curater (dose ½) Lotier11	0,53	0,08	0,4	0,08 bfj
Lotier+Curater (dose 1) Lotier12	0,48	0,12 bdgkm	0,28	0,1 dgjopq
Lotier+Mocap20 (dose ½) Lotier21	0,45	0,09	0,38	0,07 k
Lotier+Mocap20 (dose 1) Lotier22	0,64	0,11 ehl	0,35	0,08 h

Tableau 19 : Evolution de certains éléments chimiques du sol entre 1999 et 2001 pour le sol nu, l'avoine, le lotier en 1999 et le sol nu, l'avoine et lotier sans pesticide en 2000 et en 2001. Dans la même colonne, la même lettre en minuscule pour le sol nu, le même signe pour l'avoine et la même lettre en majuscule pour le lotier indique que la différence n'est pas significative au seuil de 5% ou de 1%. Pa : phosphore assimilable (mg/kg), C_T (g/100g), N_T (g/kg), CEC, Mg (mé/100g), P_T (g/kg).

Modalités expérimentales	C _T	N _T	CEC	Mg	pH	Pa	P _T
Sol nu 1999	6,59 a	7,17 a	8,98 a	1,39 a	5,2 a	356,25 a	3,87 a
Sol nu sans pesticide (SN0) 2000	7,75 b	8,53 a	9,64 a	1,23 a	5,1 a	456 a	4,4 a
Sol nu sans pesticide (SN0) 2001	8,16 b	8,85 a	9,75 a	0,78 a	5,18 a	413 a	4,11 a
Avoine 1999	6,47 *	6,98 *	7,02 *	0,83 *	5,32 *	339,6 *	3,87 *
Avoine sans pesticide (Avoine0) 2000	6,89 *	6,46 *	7,68 *	0,71 *	5,28 *	361,5 *	3,81 *
Avoine sans pesticide (Avoine0) 2001	7,34 *	7,66 *	8,11 *	0,72 *	5,18 *	394,5 *	4,07 *
Lotier 1999	6,46 A	6,74 A	7,54 A	0,82 A	5,45 A	326,2 A	3,49 A
Lotier sans pesticide (Lotier0) 2000	6,88 A	6,97 A	8,54 A	1,0 A	5,25 A	316,7 A	3,16 A
Lotier sans pesticide (Lotier0) 2001	6,76 A	6,11 A	10,08 A	0,73 A	5,08 A	428,5 A	3,77 A

Tableau 20 A : Evolution de certains éléments chimiques du sol entre 2000 et 2001 pour tous les traitements en sol nu et avec avoine (sauf sol nu et avoine sans pesticide). Dans la même colonne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative au seuil de 5% ou de 1%. Pa : phosphore assimilable (mg/kg), C_T (g/100g), N_T (g/kg), CEC, Mg (mé/100g), P_T (g/kg).

Modalités expérimentales	C _T	N _T	CEC	Mg	pH	Pa	P _T
Sol nu+Curater (dose ½) SN11, 2000	7,16 a	7,58 a	8,92 a	1,04 a	5,25 a	423,5 a	4,05 a
Sol nu+Curater (dose ½) SN11, 2001	7,25 a	7,47 a	9,19 a	0,76 a	5,3 a	412 a	3,81 a
Sol nu+Curater (dose 1) SN12 2000	6,65 a	6,45 a	7,3 a	0,71 a	5,18 a	385 a	3,22 a
Sol nu+Curater (dose 1) SN12 2001	5,86 a	6,04 a	7,41 a	0,28 a	4,6 a	304,25 b	3,19 a
Sol nu+Gammacide (dose ½) SN21 2000	7,54 a	7,4 a	8,97 a	1,39 a	5,4 a	380,5 a	3,75 a
Sol nu+Mocap20 (dose ½) SN21 2001	-	-	-	-	-	-	-
Sol nu+Gammacide (dose 1) SN22 2000	7,33 a	7,83 a	8,10 a	1,06 a	5,35 a	413,75 a	3,76 a
Sol nu+Mocap20 (dose 1) SN22 2001	7,01 a	6,82 a	9,7 a	0,47 a	5,15 a	387,25 a	4,25 a
Avoine+Curater (dose ½) Avoine11, 2000	7,44 a	7,52 a	9,73 a	1,12 a	5,43 a	385 a	3,88 a
Avoine+Curater (dose ½) Avoine11, 2001	8,52 b	8,2 a	9,84 a	1,32 a	5,28 a	425,75 a	4,04 a
Avoine+Curater (dose 1) Avoine12, 2000	7,5 a	7,06 a	8,47 a	0,94 a	5,28 a	412 a	3,92 a
Avoine+Curater (dose 1) Avoine12, 2001	8,06 a	8,01 a	8,75 a	0,81 a	5,18 a	438,75 a	3,98 a
Avoine+Gammacide (dose ½) Avoine21 en 2000	7,15 a	6,55 a	8,54 a	1,09 a	5,45 a	456,75 a	4,01 a
Avoine+Mocap20 (dose ½) Avoine21, 2001	7,78 a	8,02 a	10,38 a	0,97 a	5,3 a	459,25 a	4,24 a
Avoine+Gammacide (dose ½) Avoine22, 2000	7,31 a	7,56 a	7,74 a	0,96 a	5,55 a	426,75 a	3,84 a
Avoine+Mocap20 (dose ½) Avoine22, 2001	7,01 a	7,19 a	8,6 a	0,81 a	5,25 a	419,5 a	3,89 a

Tableau 20 B : Suite du tableau 20A. Evolution de certains éléments chimiques du sol entre 2000 et 2001 pour tous les traitements avec le lotier (sauf Lotier sans pesticide). Dans la même colonne, la même lettre indique que la différence n'est pas significative au seuil de 5% ou de 1%. Pa : phosphore assimilable (mg/kg), C_T (g/100g), N_T (g/kg), CEC, Mg (mé/100g), P_T (g/kg).

Modalités expérimentales		C _T	N _T	CEC	Mg	pH	Pa	P _T
Lotier+Curater Lotier11, 2000	(dose ½)	6,97 a	7,04 a	7,74 a	0,91 a	5,35 a	382,75 a	3,35 a
Lotier+Curater Lotier11, 2001	(dose ½)	6,83 a	7,18 a	9,38 a	0,59 a	5,1 a	360,5 a	3,52 a
Lotier+Curater 12, 2000	(dose 1) Lotier	6,87 a	7,17 a	8,78 a	1,14 a	5,38 a	364,25 a	3,39 a
Lotier+Curater 12, 2001	(dose 1) Lotier	6,9 a	7,65 a	9,09 a	0,6 a	5,05 a	379 a	4,00 a
Lotier+Gammacide Lotier21, 2000	(dose ½)	6,94 a	6,56 a	8,18 a	0,96 a	5,3 a	332,25 a	3,25 a
Lotier+Mocap20 Lotier21, 2001	(dose ½)	6,54 a	7,15 a	7,98 a	0,45 a	5,15 a	319,5 a	3,46 a
Lotier+Gammacide Lotier22, 2000	(dose 1)	7,02 a	7,04 a	9,68 a	1,17 a	5,43 a	338,75 a	3,54 a
Lotier+Mocap20 Lotier22, 2001	(dose 1)	7,29 a	8,19 a	8,54 a	0,81 a	5,08 a	435,5 a	3,88 a

IV. 5. 3. Discussion

Sur les 18 mois d'expérimentations (de novembre 1999 à mai 2001), pour l'ensemble des traitements on observe une augmentation du potassium et du sodium grâce aux couvertures végétales. A l'intérieur des traitements une évolution significative du carbone est notée sous sol nu entre 1999 et 2001 et sous avoine avec Curater à la moitié de la dose conseillée entre 2000 et 2001.

A ce stade de l'étude, malgré l'absence de différences significatives, on remarque une accumulation du carbone sous les couvertures, plus prononcée sous la couverture de graminée. L'augmentation du carbone sous sol nu peut trouver son origine dans une accumulation qui s'explique par une faible activité biologique (faible minéralisation du carbone) et par un apport du aux mauvaises herbes.

Peu d'éléments chimiques sont différents au bout de 18 mois. On peut penser que la durée de l'expérimentation s'avère trop courte pour noter des changements notables

notamment au niveau de la matière organique du sol (C, N, P). Il faut se rappeler que les andosols sont riches en matière organique mais que cette dernière est fortement liée aux amorphes au sein de microagrégats et nanoagrégats.

Les travaux réalisés par Burle (1993) et Michellon (1996) ont montré des augmentations significatives du carbone, de l'azote, des bases échangeables, en particulier du Ca et du K avec des couvertures végétales (lotier, kikuyu). Mais ces augmentations sont obtenues après plusieurs années et dans les cas précis des travaux de Burle (1993) et Michellon (1996), au bout de 5 années.

Une étude sur un plus long terme permettrait d'obtenir une meilleur cinétique des éléments chimiques du sol en fonction des pratiques culturales et des conditions environnementales.

Dans notre étude (18 mois), les premiers changements s'opèrent au niveau de certaines bases (potassium et sodium) du sol.

IV. 6. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES

1) Analyses en composantes principales réalisées sur les données de 1999

L'analyse en composantes principales réalisée sur les données chimiques (C_T , N_T , Na et K) et biologiques (densités et biomasses de la macrofaune du sol, biomasses microbiennes et minéralisation du carbone) montre que 100% de la variabilité des facteurs étudiés est expliquée par 2 axes.

L'axe 1 qui explique 70,33% de la variabilité est caractérisé par les éléments chimiques du sol. Il oppose le système en sol nu, caractérisé par les éléments chimiques à la couverture de lotier qui est caractérisée par la biomasse microbienne (Figure 33). L'axe 1 définit le mode de gestion des sols par comparaison entre la pratique en sol nu à celle utilisant la couverture végétale. La couverture de lotier se caractérise par sa biologie.

L'axe 2 qui explique 29,67% de la variabilité caractérise la biologie des sols et oppose les couvertures végétales entre elles. Elle oppose la graminée (avoine) caractérisée par une plus forte minéralisation du carbone (respiration de la microflore) à la couverture de lotier caractérisée par la macrofaune du sol (Figures 33). L'axe 2 définit la qualité des couvertures végétales (litières) utilisées. Les couvertures végétales se différencient entre elles par la biologie des sols.

2) Analyses en composantes principales réalisées sur les données de 2000

L'analyse en composantes principales réalisée sur les données chimiques, biologiques et agronomiques (rendement) montre que 78,39% de la variabilité des facteurs étudiés est expliquée par 2 axes.

L'axe 1 qui explique 54,80% de la variabilité est caractérisé principalement par les paramètres biologiques du sol et agronomique. La projection des traitements sur l'axe 1 (Figure 34) montre que l'axe 1 oppose la couverture de lotier sans pesticide au sol nu avec le Curater à la dose normale conseillée (SN12). On constate que le rendement (production de

maïs) est sous l'influence de la couverture de lotier. L'axe 1 définit le mode de gestion des sols et l'utilisation des pesticides. Il oppose les systèmes avec couvertures végétales sans pesticide à ceux qui les utilisent.

L'axe 2 qui explique 23,59% de la variabilité définit la chimie des sols. Il oppose le sol nu sans pesticide caractérisé par les éléments chimiques du sol (carbone et azote) à la couverture d'avoine sans pesticide (Figure 34). Il définit le mode de gestion des sols par opposition entre la pratique en sol nu sans pesticide à celle associée à la couverture végétale sans pesticide.

3) Analyses en composantes principales réalisées sur les données de 2001

L'analyse en composantes principales réalisée sur les données chimiques, biologiques et agronomiques montre que 68,92% de la variabilité est expliquée par 2 axes.

L'axe 1 qui explique 51,41% de la variabilité est caractérisé par les données chimiques (potassium), agronomique (rendement du maïs en 2001) et biologiques (minéralisation du carbone, densité et biomasse de la macrofaune). Il oppose les traitements avec couvertures d'avoine (avec pesticides) aux traitements en sol nu (avec pesticides) (Figure 35). L'axe 1 définit le mode gestion des sols car il oppose la pratique en sol nu avec pesticides à celle associée à la couverture d'avoine avec pesticides. Le mode de gestion est défini par la biologie associée aux valeurs de potassium.

L'axe 2 qui explique 15,51% de la variabilité oppose le sol nu sans pesticide caractérisé par les éléments chimiques du sol (carbone et azote) à la couverture de lotier sans pesticide. Cet axe définit toujours le mode gestion des sols sans pesticide entre le sol nu et la couverture de lotier mais sans pesticide. Il définit les systèmes caractérisés par l'absence de pesticide.

Malgré l'absence nette de différence significative entre les différentes productions de maïs, on constate que les valeurs les plus élevées obtenues avec couverture d'avoine et de lotier sont sous l'influence des couvertures.

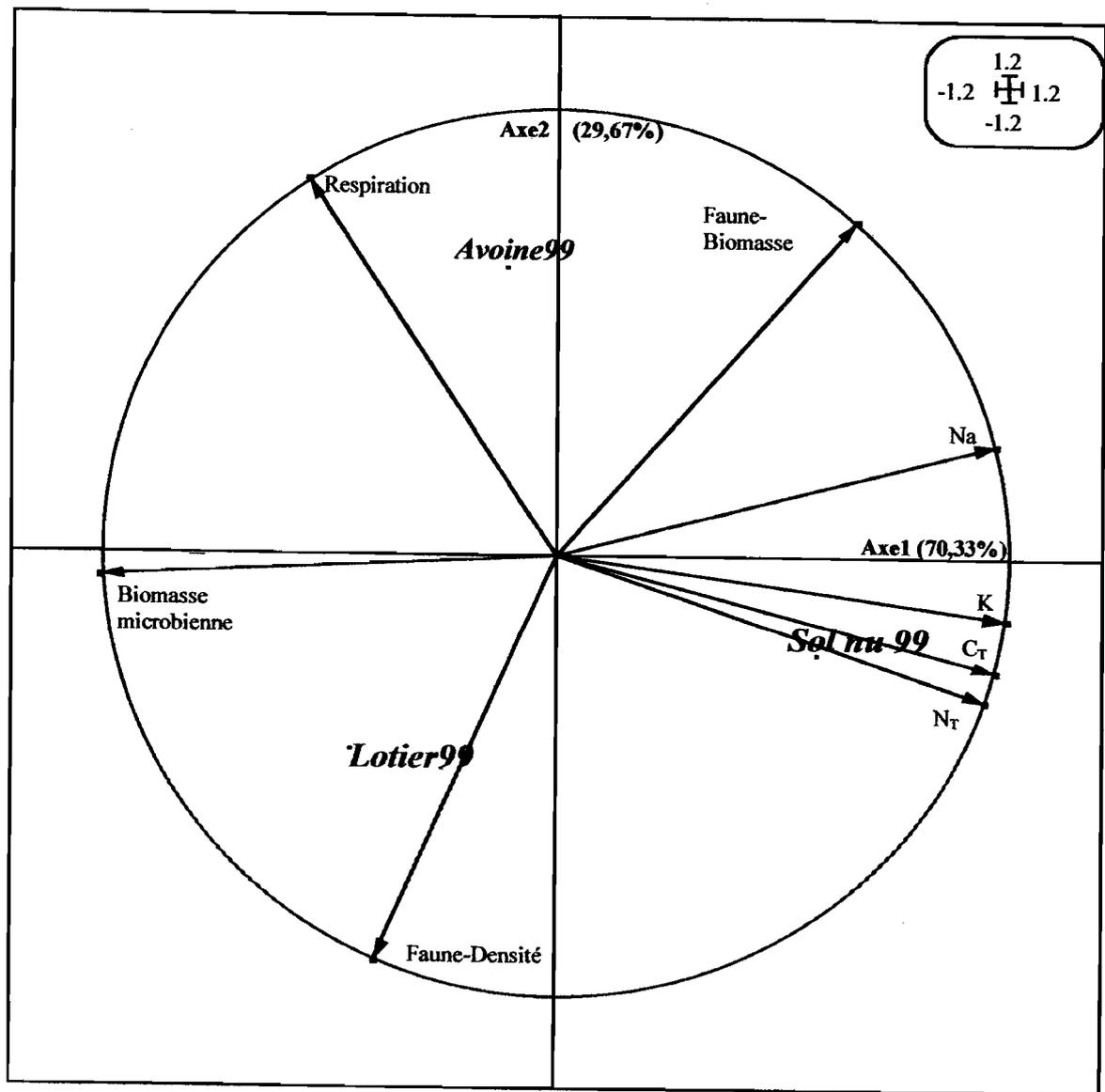


Figure 33 : Graphe issu de l'analyse en composantes principales effectuée sur les données chimiques, biologiques obtenues en 1999, suivant les modalités expérimentales, Lotier, Avoine et Sol nu. La respiration correspond à la minéralisation du carbone du sol.

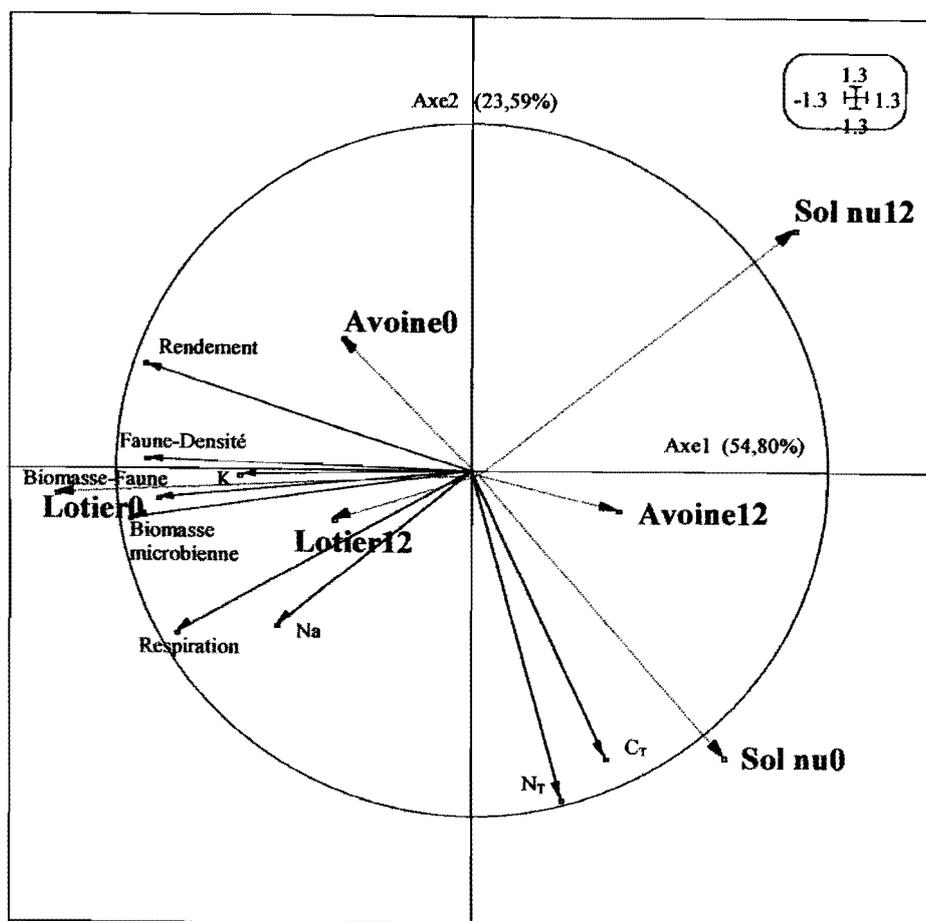


Figure 34 : Graphe issu de l'analyse en composantes principales effectuée sur les données chimiques, biologiques et agronomique obtenues en 2000, suivant les modalités expérimentales, Lotier sans pesticide (Lotier0), Lotier avec Curater à la dose préconisée (Lotier12), Avoine sans pesticide (Avoine0), Avoine avec Curater à la dose conseillée (Avoine12), Sol nu sans pesticide (Sol nu0) et Sol nu avec Curater à la dose préconisée (Sol nu12).

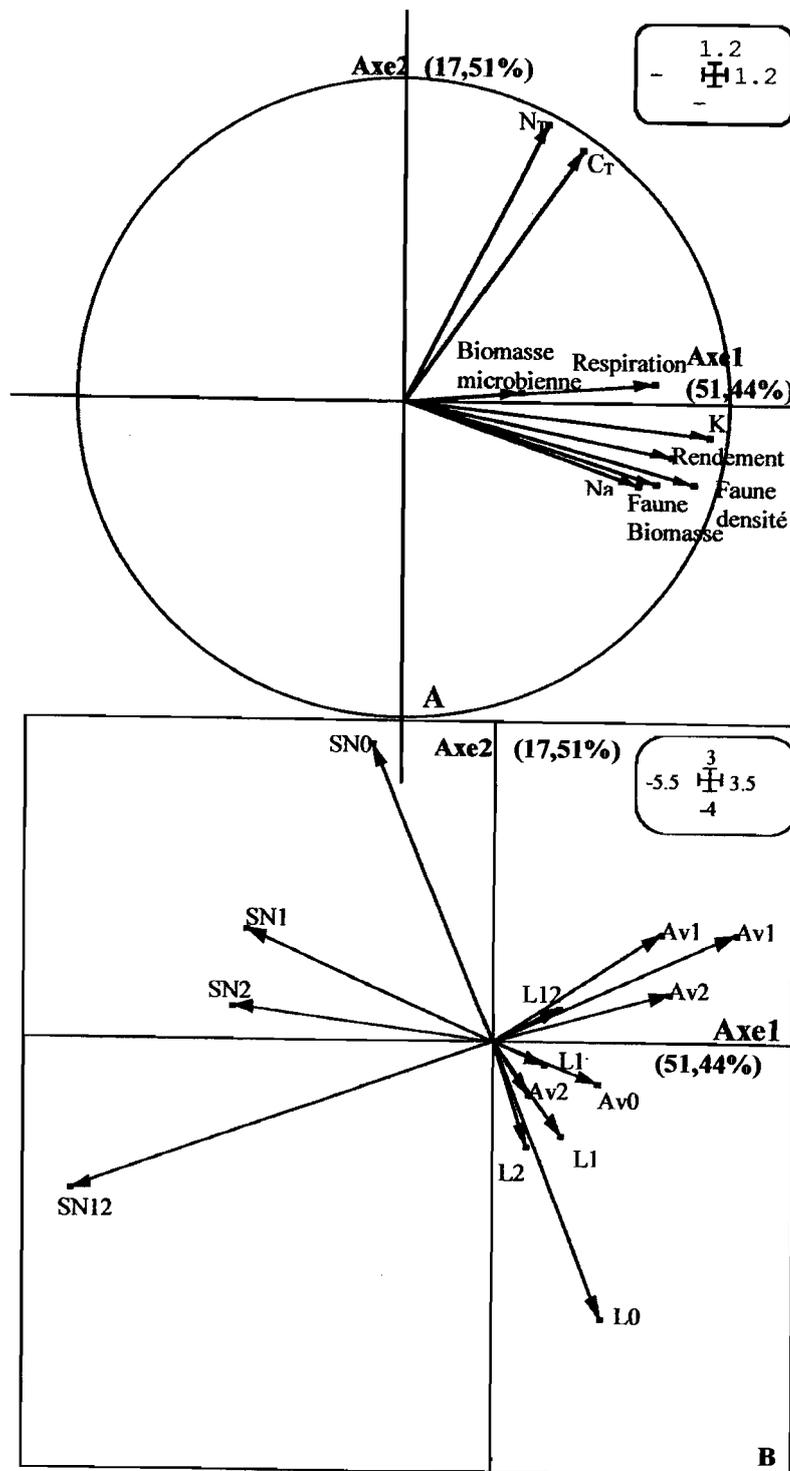


Figure 35 : Graphes issus de l'analyse en composantes principales effectuée sur les données chimiques, biologiques obtenues en 2001 (A), suivant les différentes modalités expérimentales (B).

V. CONCLUSIONS GENERALES

Plusieurs travaux ont montré que l'éradication de la macrofaune de nombre de sols agricoles explique, au moins en partie, la dégradation de ces milieux et le caractère non durable des pratiques agricoles (Lavelle et al., 1999). Les peuplements de la macrofaune du sol sont, en effet, très sensibles aux fluctuations de l'écosystème qui les abrite. En contact permanent avec le substrat, leur présence et leur degré d'activité reflètent fidèlement le fonctionnement des sols par leurs actions biologiques (stimulation sélective de la microflore), mécaniques (bioturbation, construction de galeries et production d'agrégats organominéraux par les organismes ingénieurs, principalement vers de terre et fourmis) et chimiques (humification, minéralisation en interaction avec les micro-organismes) (Lavelle et al., 1997, 1999).

Corréler cette macrofaune à la fertilité du sol qui s'exprimerait par des niveaux différents de production, en passant par les paramètres chimiques, physiques et biologiques (microflore) du sol est une des voies privilégiée depuis des années par les chercheurs.

Notre étude s'est inscrite dans cette voie et le premier constat qui en ressort est qu'étudier les interactions entre la faune, la microflore et les systèmes écologiques (écosystèmes naturels et cultivés) nécessite une étude à long terme afin de voir l'évolution de ces différents compartiments entre eux dans le temps pour les mêmes systèmes étudiés et en comparaison avec d'autres systèmes. L'objectif étant de pouvoir raisonner à une plus grande échelle.

De ces travaux, il en résulte que :

☞ Les forêts, exploitées ou pas, sont caractérisées par des taux élevés de matières organiques dans le sol, plus précisément pour le carbone et l'azote, de même que par une plus grande diversité et de plus fortes densités et biomasses pour la macrofaune du sol.

☞ A l'opposé, le site ayant subi la déforestation mécanique pour sa mise en culture se caractérise par de faibles valeurs pour les mêmes paramètres étudiés et un taux plus élevé d'élément chimique exogène apporté par la fertilisation minérale (phosphore).

☞ Plus proche des forêts se situe la parcelle ayant subi une déforestation "douce" (sélective) qui présente des valeurs en carbone et azote élevées, de même qu'une diversité, des densités et des biomasses plus élevées que la parcelle défrichée mécaniquement pour la macrofaune du sol.

☞ On peut donc affirmer que le carbone et l'azote du sol, en parallèle avec la biodiversité, la densité et la biomasse de la macrofaune du sol, peuvent caractériser les modes de gestion de la forêt.

☞ Au vu de ces résultats, nous pouvons conseiller les acteurs concernés, une exploitation partielle de la forêt (en sous-bois) et si le type de culture l'impose, une déforestation sélective.

Il est certain que l'exploitation de culture telle que la canne à sucre ne peut se faire dans un tel contexte. L'étude réalisée sur deux saisons, ne peut prédire les possibles évolutions des

différents facteurs étudiés. Il serait donc opportun de vérifier ces premiers résultats par des études à plus long terme.

L'apport des couvertures végétales dans les systèmes agronomiques s'opère à plusieurs niveaux et à des pas de temps différents.

☞ Lorsque les systèmes ne sont pas encore cultivés, en comparaison avec la pratique en sol nu, on constate que les couvertures végétales restructurent en priorité et plus rapidement les paramètres biologiques du sol à travers la macrofaune et la microflore du sol selon le type de couverture végétale.

☞ Lorsque les systèmes sont cultivés, la composante biologique est toujours la première à réagir aux impacts des couvertures.

☞ Les pratiques culturales en sol nu sont principalement caractérisées par certains éléments chimiques du sol.

☞ Sur le court terme, les premiers éléments chimiques du sol qui réagissent à la présence des couvertures sont les bases et notamment le potassium et le sodium. Une accumulation relative du carbone apparaît sous la couverture de graminée (avoine).

☞ Les pesticides étudiés ont un effet dépressif sur la macrofaune du sol. Cet effet est plus important dans le cas du Mocap20 (ethoprophos) qui à la dose conseillée aux agriculteurs réduit fortement les populations de la macrofaune du sol. Les effets sont atténués lorsqu'on utilise que la moitié de la dose. De même, il est constaté une diminution moins significative de la macrofaune du sol en présence du Curater (carbofuran).

☞ Les populations de vers de terre sont fortement réduites en présence de Curater et de Mocap20. Notons que l'impact des vers de terre sur les processus physiques, chimiques et biologiques a été largement étudié (Lavelle et al., 1999).

☞ Les couvertures végétales inhibent les effets dépressifs des pesticides sur la macrofaune du sol. Cette inhibition est plus élevée pour la couverture d'avoine. Les vers de terre subissent moins les effets des pesticides sous graminée (avoine) par rapport à la légumineuse (lotier).

☞ Au stade de notre étude, les pesticides testés, n'ont pas d'effet sur la microflore du sol.

☞ Au niveau de la production de maïs, bien que les résultats ne soient pas statistiquement homogènes, les analyses en composantes principales montrent que les rendements sont sous influence des couvertures végétales durant cette courte expérimentation.

☞ Au stade de cette étude, la caractérisation des couvertures végétales est fortement influencée par la biologie des sols (faune et microflore) et certaines bases chimiques du sol (sodium et potassium).

Il est conseillé de vérifier ces résultats sur un plus long terme afin d'avoir une cinétique plus fine des éléments chimiques, des populations de la macrofaune, des activités de la microflore et des rendements. Il serait plus aisée à ce moment, de pouvoir mieux corréler les différents paramètres entre eux et de pouvoir quantifier d'éventuels effets de facteurs exogènes comme d'autres matières actives de pesticides utilisées et de la fertilisation exogènes.

VI. BIBLIOGRAPHIE

Aina P.O. (1984) Contribution of earthworms to porosity and water infiltration in a tropical soil under forest and long-term cultivation. *Pedobiologia*, **26**, 131-136

Anderson J.M. (1995) Soil organisms as engineers : microsite modulation of macroscale processes. In : Jones C.G., Lawton J.H. (Eds) *Linking species and ecosystems*. Chapman and Hall, London, UK, pp. 94-106

Anderson J.M., Ingram J. (Eds) (1993) *Tropical Soil Biology and Fertility. A handbook of methods*. 2d edition. C.A.B., Oxford, UK, pp. 94-106

Andren O., Balandreau J. (1998) Biodiversity and soil functioning – where do we stand today? In : ISSS-AISS-IBG-SICS-AFES (Eds) *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science*. Montpellier, 20-26 August 1998

Andren O., Bengtsson J., Clarholm M. (1995) Biodiversity and species redundancy among litter decomposers. In : Collins H.P., Robertson G.P., Klug M.J (Eds) *The Significance of Soil Biodiversity*. Kluwer, Dordrecht, pp. 141-151

Asner G.P., Seastedt T.R., Townsend A.R. (1997) The decoupling of terrestrial carbon and nitrogen cycles. Human influences on land cover and nitrogen supply are altering natural biogeochemical links in the biosphere. *BioScience*, **47**, 226-234

Bachelier G. (1978). La faune des sols son écologie et son action. ORSTOM, Initiations-Documentations Techniques, n°38: 391pp

Barois I., Lavelle P. (1986) Changes in respiration rate and some physico-chemical properties of tropical soil during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta). *Soil Biology and Biochemistry*, **18**, 539-541

Barros E., Grimaldi M., Desjardin T., Sarrazin M., Chauvel A., Lavelle P. (1998) Conversion of forest into pastures in Amazonia : effects on soil macrofaunal diversity and soil water dynamics. In : ISSS-AISS-IBG-SICS-AFES (Eds) *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science*. Montpellier, France, August 1998, pp.

Beare M., Lavelle P. (1998) Regulation of microbial activity and organic matter dynamics by macroorganisms : integrating biological function in soil. In : ISSS-AISS-IBG-SICS-AFES (Eds) *Proceeding of the 16th World Congress of Soil Science*. Montpellier, 20-26 August 1998, pp.

Beare M.H., Reddy M.V., Tian G., Srivastava S.C. (1997) Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of decomposer biota. *Applied Soil Ecology*, **6**, 87-108

Behan-Pelletier V.M., Paoletti M.G., Bisset B., Stinner B.R. (1993) Oribatid mites of forest habitats in northern Venezuela. *Tropical Zoology*, **1**, 39-54

Berthelin J., Souchier B., Toutain F. (1979) Intervention des phénomènes biologiques dans l'altération. *Sciences du Sol, Bulletin de l'AFES*, **2**, 157-187

Blanchart E. (1998) Earthworms and soil structure and physical properties in kaolinic and smectitic tropical soils. In : ISSS-AISS-IBG-SICS-AFES (Eds) *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science*. Montpellier, 20-26 August 1998, pp.

Blanchart E., Bruand A., Lavelle P. (1993) The physical structure of casts of *Millsonia anomala* (Oligochaeta: Magascolecidae) in shrub savanna soils (Côte d'Ivoire). *Geoderma*, **56**, 119-132

- Blondel J. (1995) *Biogéographie. Approche Ecologique et Evolutive*. Masson, Paris, France, 297p.
- Bouché M.B. (1977) Stratégies lombriciennes. *In* : Lhom U., Persson T. (Eds) *Soil Organisms as Component of Ecosystems*. Ecological Bulletin (Stockholm), Stockholm, pp. 122-132
- Bond W.J. (1994) Keystone species. *In* : Schulze E.D., Mooney H.A. (Eds) *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 237-253
- Boyer J., Michellon R., Chabanne A., Reversat G., Tibere R. (1999). Effects of trefoil cover crop and earthworm inoculation on maize and soil organism in Reunion Island. *Biol and Fert of Soils*, 28/4, p. 364-370
- Brouwers M. (1982). Le milieu physique et les sols de la zone de moyenne altitude de St Paul. Aptitude à la canne à sucre. Document DDA-IRAT: 49p avec annexes et carte morphopédologique au 25000ème
- Brouwers M. (1984). Reconnaissance pédologique de la zone de moyenne altitude de la Saline à St Leu. Aptitude des sols à la culture sous irrigation. Document DDA-IRAT: 27p avec carte morphopédologique au 25000ème
- Brouwers M. & Raunet M. (1981). Inventaire morphopédologique dans les Hauts de la Réunion. Aptitudes agricoles des terres. Etablissement Public Régional, DDA, IRAT: 89p annexes et cartes morphopédologiques au 25000ème
- Brown G., Pashanasi B., Gilot-Villeneuve C., Patron J.C., Senapati B.K., Giri S., Barois I., Blakemore R.J., Boyer J. (1999) Effects of earthworms on plant growth. *In* : Lavelle P., Brussaard L., Hendrix P. (Eds) *The Potential for management of Earthworms Activities in Tropical Agroecosystems*. CAB-I, Wallingford, UK, pp. 87-147
- Brussaard L., al. E. (1997) Biodiversity and ecosystem function in soil. *Ambio*, 26, 563-570
- Burle D. (1993). Effets des couvertures végétales permanentes associées au géranium sur la fertilité des andosols de la Réunion. Mémoire d'Ingénieur des Techniques Agricoles, Ecole nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux, 48p
- Cadet T. (1980). La végétation de l'île de la Réunion. Etude phytoécologique et phytosociologique. Thèse de docteur ès science, Université de la Réunion: 312p
- Chastel J.M. (1990). La filière géranium. *In*: Manuel des techniciens du géranium. Edition 1990. Géranium Conseil (APR-CIRAD-SAFER-SPV-SUAD): 11p
- Chaussod R. & Nicolardot B (1982). Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. I Approche cinétique et estimation simplifiée du carbone facilement minéralisable. *Rev Ecol Biol Sol* 19: 501-512
- Chevalier L. (1979). Structure et évolution du volcan du Piton des Neiges, Ile de la Réunion. Leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université de Nancy I: 83p et annexes
- Coleman D.C., Odum E.P., Jr. D.A.C. (1992) Soil biology, soil ecology and global change. *Biology and Fertility of Soils*, 14, 104-111

- Coûteaux M.M., Mousseau M., Célérier M.L., Bottner P. (1991) Increased atmospheric CO₂ and litter quality : decomposition of sweet chestnut leaf with animal food webs of different complexities. *Oikos*, **61**, 54-64
- Dangerfield J.M. (1989). Abundance, biomasse and diversity of soil macrofauna in savanna woodland and associated managed habitats. *Pedobiologia*, **34**: 141-150
- Daniel O., Anderson J.M. (1992) Microbial biomass and activity in contrasting soil materials after passage through the gut of the earthworm *Lumbricus rubellus* Hoffmeister. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**, 465-470
- Decaëns T., Lavelle P., Jiménez J.J., Escobar G., Rippstein G. (1994) Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. *European Journal of Soil Biology*, **30**, 157-168
- Derouard L., Tondoh J., Vilcosqui L. & Lavelle P. (1997). Effects of earthworm introduction on soil processes and plant growth. *Soil Biol. Biochem.*, Vol 29, 3/4: 541-545
- Direction de l'Agriculture et de la Forêt (1996). Annuaire de statistique agricole. Données de l'année 1995. Ministère de l'Agriculture et de la Forêt D.A.F. Service de Statistique Agricole. S^t Denis: 58p
- Feldman D.S., Hofmann R. Gagnon J. & Simpson J. (1987). Statview II. Abacus concept.
- Dommergues Y. (1960). La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *L'Agronomie Tropicale*, Vol. XV, N° 1, 54-60
- Edwards C.A., Lofty J.R. (1978) The influence of arthropods and earthworms upon root growth of direct drilled cereals. *Journal of Applied Ecology*, **15**, 533-543
- F.A.O. (1995) *Agriculture mondiale*. Horizon 2010. FAO, Rome
- Feldman D.S., Hofmann R., Gagnon J. & Simpson J. (1997). Statview II. A bacus concept.
- Feller C., Frossard E., Brossard M. (1994). Activité phosphatasique de quelques sols tropicaux à argile 1 : 1. Répartition dans les fractions granulométriques. *Can. J. Soil Sci.* **74**, 121-129
- Fragoso C., Brown G.G., Patron J.C., Blanchart E., Lavelle P., Pashanasi B., Senapati S., Kumar T. (1997) Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of earthworms. *Applied Soil Ecology*, **6**, 17-35
- Genere B. (1985). L'altération d'un programme multilocal de recherche agroclimatiques sur la canne à sucre à la Réunion. Thèse de docteur-ingénieur, ENSA Montpellier: 115p
- Gense C. (1976). L'altération des roches volcaniques basiques sur la Côte orientale de Madagascar et à la Réunion. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Institut de Géologie, Strasbourg, 176pp
- Ghilarov M.S. (1977) Why so many species and so individuals can coexist in the soil. In : Lohm U., Persson T. (Eds) *Soil Organisms as Components of Ecosystems*. Stockholm, pp. 593-598
- Giller K.E., beare M.H., Lavelle P., Izac A.-M.N., Swift M.J. (1997) Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology*, **6**, 3-16
- Giller P.S. (1996) The diversity of soil communities, the 'poor man's tropical rainforest'. *Biodiversity and Conservation*, **5**, 135-168

- Gillot C. (1997) Effects of a tropical geophagous earthworm, *M. anomala* (Megascolecidae), on soil characteristics and production of a yam crop in Ivory Coast. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**, 353-359
- Goodland R. (1997) Environmental sustainability in agriculture: diet matters. *Ecological Economics*, **23**, 189-200
- Grime J.P. (1997) Biodiversity and ecosystem function: the debate deepens. *Science*, **277**, 1260-1261
- Hargrove W.L. (Eds.) (1991). Covercrops for clean water. Ankeny, U.S.A., *Soil and Water Conservation Society*, 198p
- Hooper D.U., Vitousek P.M. (1997) The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science*, **277**, 1302-1305
- Hunt H.W., Coleman D.C., Ingham E.R., Ingham R.E., Elliott E.T., Moore J.C., Rose S.L., Reid C.P.P., Morley C.R. (1987) The detrital food web in a shortgrass prairie. *Biology and Fertility of Soils*, **3**, 57-68
- Huston M.A. (1996) *Biological Diversity. The Coexistence of Species in Changing Landscape*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 681p.
- Ingham R.E., Trofymow J.A., Ingham E.R. (1985) Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecological Monographs*, **55**, 119-140
- Jabiol B., Brêthes A., Brun J.J., Ponge J.F., Toutain F. (1992) Une classification morphologique et fonctionnelle des formes d'humus. Propositions du référentiel pédologique 1992. *Revue Forestière Française*, **46**, 152-166
- Jenkinson D. S. (1988). Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: Advances in nitrogen cycling in agricultural agrosystems. J Wilson (eds) CAB Wallingford UK: 368-386
- Jenkinson D.S., Adams D.E., Wild A. (1991) Model estimates of CO₂ emission from soil in respond to global warning. *Ecology*, **72**, 2101-2109
- Joergensen RG (1996). The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass : calibration of the K_{ec} value. *Soil Biol. Biochem.* **28**: 25-31
- Jones C.G., Lawton J.H., Shachak M. (1994) Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, **69**, 373-386
- Jones C.G., Lawton J.H., Shachak M. (1997) Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*, **78**, 1946-1957
- Lal R. (1988) Effects of macrofauna on soil properties in tropical systems. *Agriculture, Ecosystems and Environments*, **24**, 101-116
- Lavelle P. (1978) Les vers de terre de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). Peuplements, Populations et fonctions dans l'écosystème. Thèse de Doctorat. *Publ. Lab. Zool. E.N.S.*, **12**, 1-301
- Lavelle P. (1996) Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, **33**, 3-16
- Lavelle P. (1997) Faunal activities and soil processes : adaptative strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research*, **27**, 93-132

- Lavelle P., Blanchart E., Martin A., Martin S. (1993) A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, **25**, 130-150
- Lavelle P., Blanchart E., Martin A., Spain A.V., Martin S. (1992) Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In : Segoe S. (Eds) *Myths and Science of Soils of the Tropics*. SSSA Special Publication, Madison, USA, pp. 157-185
- Lavelle P., Brussaard L., Hendrix P. (1999) *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. CAB International, Wallingford, UK, 300p.
- Lavelle P., Pashanasi B. (1989) Soil macrofauna and land management in Peruvian Amazonia (Yurimaguas, Loreto). *Pedobiologia*, **33**, 283-409
- Lawton J.H., Brown V.K. (1994) Redundancy in ecosystems. In : Schulze E.D., Mooney H.A. (Eds) *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 225-270
- Lee K.E. (1985) *Earthworms. Their Ecology and Relationships with Soils and Land Use*. Academic Press, Orlando, USA, 411p.
- Lobry-de-bruyn L.A. (1997) The status of soil macrofauna as indicators of soil health to monitor the sustainability of Australian agricultural soils. *Ecological Economics*, **23**, 167-178
- Marinissen J.C.Y. (1994) Earthworms populations and stability of soil structure in a silt loam soil of recently reclaimed polder in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **51**, 75-87
- Michellon R. (1996). Modes de gestion écologique des sols et systèmes de culture à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. CIRAD-CA, Rapport N° 47-96, 97p
- Mills L.S., Soulé M.E., Doak D.F. (1993) The keystone-species concept in ecology and conservation. *BioScience*, **43**, 219-224
- Monegat C. (1991). Plantas de cobertura do solo : características e manejo em pequenas propriedades. Chapeco, Brésil, Monegat (Eds.), 337p
- Mooney H.A. (1991) Biological respond to climate change : an agenda for research. *Ecological Applications*, **1**, 112-117
- Naeem S., Thompson L.J., Lawler S.P. Lawton J.H., woodfin R.M. (1995) Empirical evidence that declining species diversity may alter the performance of terrestrial ecosystems. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **347**, 249-262
- Paine R.T. (1969) A note on trophic complexity and community stability. *The American Naturalist*, **103**, 91-93
- Parkinson D., McLean M.A. (1998) Impacts of earthworms on the community structure of other biota in forest soils. In : Edwards C.A. (Eds) *Earthworm Ecology*. St Lucie Press, Columbus, Ohio, U.S.A., pp. 213-226
- Pashanasi B., Melendez G., Szott L., Lavelle P. (1992) Effect of inoculation with the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae) on N availability, soil microbia biomass and the growth of three tropical fruit tree seedlings in pot experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**, 1655-1659
- Pimm S.T., Sugden A.M. (1994) Tropical diversity and global change. *Science*, **263**, 933-934

Potter D.A., Spicer P.G., Redmond C.T., Powell A.J. (1994). Toxicity of Pesticides to Earthworms in Kentucky Bluegrass Turf. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 52, 176-181

Quantin P. (1972). Les Andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologique, X (3): 273-301

Raunet M. (1988). Carte morphopédologique au 50000^{ème}. Département de la Réunion. CIRAD-IRAT, Conseil Régional de la Réunion: 4 feuilles

Raunet M. (1991). Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD-IRAT/Région Réunion: 438 pp

Reynolds J. (1994) Earthworms of the world. *Global Biodiversity*, 4, 11-16

Riquier J. (1960). Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance, Ile de la Réunion. ORSTOM-IRMS Madagascar, Tananarive: 72 pp

Riquier J. & Zebrowski C. (1975). Pédologie de la Réunion. In: L'Atlas des D.O.M. La Réunion, planche 10, CNRS-IGN: 4 pp et carte

Rose C.J., Wood A.W. (1980) Some environmental factors affecting earthworm populations and sweet potato production in the Tari Basin, Papua New Guinea Highlands. *Papua New Guinea Agriculture Journal*, 31, 1-10

Rosello V. (1982). Compte rendu de recherches bibliographiques concernant l'altération de matériaux volcaniques, ainsi que la formation et les propriétés des sol qui en dérivent. Document DDE - Centre Universitaire de la Réunion, Laboratoire de Géologie-Université Paris VII, Laboratoire de Pédologie: 87 pp

Roth M. (1980). Initiation à la morphologie, la systématique et la biologie des insectes. ORSTOM, Initiations-Documentations Techniques, n°23: 213pp + planches

Schulze E.D., Mooney H.A. (1994) Ecosystem function of biodiversity : a summary. In : Schulze E.D., Mooney H.A. (Eds) *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 497-510

Seguy L., Bouzinac S., Trentini A., Côrtes N.A. (1996). L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. *Agriculture et Développement*, 12, 2-61

Senapati B.K. (1994) Macrofaunal status and restoration strategy in degraded soil under tea cultivation in India. In : Etchevers J.D. (Ed) *Proceedings of the 15th World Congress of Soil Science*. Acapulco, Mexique, ISSA, pp. 64-75

Setälä H., Tyynismaa M., Martikainen E., Huhta V. (1991) Mineralisation of C, N, P in relation to decomposition community structure in coniferous forest soil. *Pedobiologia*, 35, 285-296

Solbrig O.T. (1991a) The IUBS -SCOPE-UNESCO program of research in biodiversity. In : Solbrig O.T. (Eds) *From Genes to Ecosystem : a Research Agenda for Biodiversity*. Mass. : IUBS, Cambridge, UK, pp. 5-11

Solbrig O.T. (1991b) Ecosystem Complexity in Time and Space. In : O Solbrig, G Nicolis (Eds) *Perspectives on Biological Complexity*. IUBS, Paris, pp. 163-188

Solbrig O.T. (1994) Biodiversity : an introduction. In : Solbrig O.T., Emden H.M.V., Oordt P.G.W.J.v. (Eds) *Biodiversity and Global Change*. CAB International, IUSB, Paris, France, pp. 13-20

Spain A.V., Lavelle P., Mariotti A. (1992) Stimulation of plant growth by tropical earthworms. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**, 1629-1633

Stephens P.M., Davoren C.W., Doube B.M., Ryder M.H. (1994) Ability of the earthworms *Aporrectodea rosea* and *Aporrectodea trapezoides* to increase plant growth and the foliar concentration of elements in wheat (*Triticum aestivum* cv. Spear) in a sandy loam soil. *Biology and Fertility of Soils*, **18**, 150-154

Stork N.E., Eggleton P. (1992) Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, **7**, 38-47

Swift M.J., Anderson J.M. (1994) Biodiversity and ecosystem function in agricultural systems. In : Schulze E.D., Mooney H.A. (Eds) *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 15-41

Swift M.J., Heal O.W., Anderson J.M. (1979) *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Studies in Ecology, Vol. 5, Blackwell, Oxford, UK, 372p.

Swift M.J., Vandermeer J., Ramakrishnan P.S., Anderson J.M., Ong C.K., Hawkins B.A. (1996) Biodiversity and agroecosystem function. In : Mooney H.A., Cushman J.H., Medina E., Sala O.E., Schulze E.D. (Eds) *Functional Roles of Biodiversity : A Global Perspective*. SCOPE, John Wiley & Sons Ltd, pp. 261-298

Tabatabai M.A. (1982). Soil enzymes. In *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological Properties*. Agronomy monograph n° 9, ASA-SSSA, Madison, Wisconsin, p903-947

Thomas V.G., Kevan P.G. (1993) Basic principles of agroecology and sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, **6**, 1-19

Tilman D., Downing J.A. (1994) Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, **367**, 363-365

Tilman D., Knops J., Wedin D., Reich P., Ritchie M., Siemann E. (1997) The influence of functional diversity and decomposition on ecosystem processes. *Science*, **277**, 1300-1302

Tilman D., Wedin D., Knops J. (1996) Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, **379**, 718-720

Torvisk V., Goksoyr J., Daae F.L., Sorheim R., Michalsen J., Salte K. (1994) Use of DNA analysis to determine the diversity of microbial communities. In : Ritz K., Dighton J., Giller K.E. (Eds) *Beyond Biomass*. CAB-I, Wye, UK, pp. 39-48

Toutain F., Villemain G., Albrecht A., Reisinger O. (1982) Etude ultrastructurale des processus de biodégradation. Modèle *Enchytraeides*-litières de feuillus. *Pedobiologia*, **23**, 145-156

Vedder B., Kampichler C., Bachmann G., Bruckner A., Kandeler E. (1996) Impact of faunal complexity on microbial biomass and N turnover in field mesocosms from a spruce forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, **22**, 22-30

Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H., Tilman D.G. (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle : sources and consequences. *Ecological Applications*, **7**, 737-750

Waid J.S. (1997) Metabiotic interactions in plant litter systems. In : Cadisch G., Giller K.E. (Eds) *Driven by Nature; Plant Litter Quality and Decomposition*. CAB International, Wallingford, pp. 145-153

Waid J.S. (1998) Does soil biodiversity depends upon metabiotic interactions? In : ISSS-AISS-IBG-SCIS-AFES (Eds) *Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science*. Montpellier, France, 20-26 August 1998, pp.

Wallace A. (1994) Strategies to avoid global greenhouse warning – stashing carbon away in soil is one of the best. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **25**, 37-44

Willson E.O., Peter F.M. (Eds) (1988) *Biodiversity*. Nat. Acad. Press, Washington, DC, USA

Zebrowski C. (1975). Etude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion. Cahiers ORSTOM, série Pédologique, XIII (3-4); 255-278