CIRAD

AMELIORATION DE LA FERTILITE DES ANDOSOLS DE LA REUNION ET DE LA PRODUCTIVITE DES CULTURES DE GERANIUM ROSAT AVEC COUVERTURE PERMANENTE

AMELIORATION DE LA FERTILITE DES ANDOSOLS DE LA REUNION ET DE LA PRODUCTIVITE DES CULTURES DE GERANIUM ROSAT AVEC COUVERTURE PERMANENTE

Avant-propos

Ce projet commun de publication rédigé en 1993-1994 est le fruit d'un travail pluridisciplinaire et pluri-institutionnel.

Seule la première partie a été réactualisée en 1996, la seconde pourrait être complétée (MICHELLON, 1996).

SOMMAIRE

A- Les différents systèmes de gestion des cultures 1

I- Introduction 1

II- Dispositif d'étude et mise au point des différentes techniques de gestion des sols 1

2.1. Choix d'un milieu représentatif 1

2.2. Dispositifs expérimentaux 2

2.3. Les systèmes de culture comparés 2

III- Conséquences des modes de gestion des sols sur les rendements 4

3.1. Dégradation progressive en monoculture 4

3.2. Amélioration par la diversification des cultures 7

3.3. Systèmes durables avec couverture herbacée permanente 8

IV- Intérêt qualitatif et économique des couvertures herbacées 11

V- Conclusions 12

B- Analyse du fonctionnement hydrique, biologique et microbiologique 16

I- Matériel agronomique d'étude 17

1.1. Choix des parcelles expérimentales 17

1.2. Caractéristiques des sols 17

1.3. Propriétés physiques et hydrodynamiques 19

1.4. La mauvaise colonisation racinaire du sous-sol 20

II- Méthode d'étude du fonctionnement biologique et microbiologique du sol 20

2.1. Analyse structurale et microstructurale du sol 21

2.1.1. Transition entre les horizons 21

2.1.2. Microstructures du sol 23

2.2. Activité faunique et profils racinaires 23

2.3. Test de la matière organique et contrôle du pH *in situ* 23

2.3.1. Test de la matière organique 23

2.3.2. pH *in situ* 24

2.4. Conditions d'oxydo-réduction du milieu 24

2.5. Observations microscopiques «*in vivo*» 24

2.6. Test d'activité enzymatique 24

III- Modifications du fonctionnement biologique et microbiologique dans les différents systèmes de culture 24

3.1. Evolution du système forêt, jachère et monoculture de géranium 25

3.1.1. Profils structuraux et activité faunique 25

3.1.2. Distribution comparée et profils racinaires 28

3.1.3. Modification de l'activité microbiologique 30

3.2. Comparaison des systèmes en monoculture et sous couverture permanente 34

3.2.1. Profils structuraux et activité faunique 34

3.2.2. Profils racinaires 36

3.2.3. Activité microbiologique 38

IV- Effets des couvertures permanentes sur la porosité des andosols cultivés 40

4.1. Variations de la conductivité hydraulique à saturation et de la macroporosité 40

4.2. Evolution des teneurs en eau et espace poral 46

Conclusions 49

A- LES DIFFERENTS SYSTEMES DE GESTION DES CULTURES

par MICHELLON R., SEGUY L.

CA970015

I- INTRODUCTION

La monoculture de rente engendre une extrême dégradation du milieu et des rendements, en particulier pour les plantes arbustives à parfum (GRAS, MONTARONE, 1993). Pour y remédier, l'efficacité des outils biologiques dans la conception de systèmes agricoles durables a été démontrée dans de nombreuses régions du monde (SEGUY, 1993 ; MONEGAT, 1991 ; HARGROVE, 1991).

Sur l'île de la Réunion, le géranium rosat, *Pelargonium* x *asperum* Erhart, a permis, vers la fin du XIXème siècle, la mise en valeur des terrains alors inexploités de la zone sous le vent de moyenne altitude.

La culture itinérante traditionnelle, avec jachère arborée, s'est progressivement sédentarisée au cours du dernier quart de siècle sous l'influence de facteurs socio-économiques (BRIDIER, 1985). La suppression de la jachère *d'Acacia mearnsii*, qui restaurait la fertilité, après 5 à 7 ans de culture, a entraîné, en l'absence de changement notable et d'itinéraire technique, une baisse des rendements, accompagnée d'une prolifération des adventices et des maladies (GARIN, 1987). Cette dégradation a contribué à la disparition d'un grand nombre d'exploitations.

Les effets néfastes de la monoculture et leurs conséquences sur l'exode rural ont conduit à la mise en oeuvre du Plan d'Aménagement des Hauts (1983) et d'une démarche de recherche appliquée originale (SEGUY, 1982 ; MICHELLON, BRIDIER, 1988). Les solutions proposées tendent à se généraliser grâce à une orientation de la zone vers la polyculture-élevage.

Mais développées en sol nu, elles maintiennent une érosion intense évaluée en moyenne à 20 t de terre par ha et par an, les pertes atteignant 50 à 200 t par ha au cours d'années avec des précipitations orageuses (BOUGERE, 1988).

La fixation d'une agriculture durable en peut se concevoir qu'à partir de techniques de protection totale du capital sol. La mise au point récente des itinéraires associant le géranium rosat à des couvertures herbacées permanentes permet dorénavant de proposer des systèmes de culture stables, dans un environnement protégé. Les étapes de leur conception et les résultats obtenus au cours des 10 dernières années seront résumées dans cette synthèse.

II- DISPOSITIF D'ETUDE ET MISE AU POINT DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE GESTION DES SOLS

2.1. Choix d'un milieu représentatif

Les sols d'origine volcanique appartiennent tous à une série homogène qui se différencie selon l'altitude (RAUNET, 1991). Les expérimentations sont conduites vers 1000 m d'altitude sur andosol non perhydraté recevant annuellement 1400 mm de pluie, avec une période sèche de mai à octobre, et une température moyenne de 17 °C.

Formés sur cendres volcaniques reposant sur un niveau à «gratons» (matériaux pyroclastiques), drainant, plus ou moins altérés, ces sols présentent 60 à 160 cm d'épaisseur. L'horizon A humifère (10 à 20 % de matière organique), à structure particulaire, atteint parfois 40 cm. En culture continue de plantes sarclées, il devient pulvérulent et hydrophobe en saison sèche et très sensible à l'érosion.

Les matériaux sous-jacents (horizons B) à structure continue, mais friable, présentent une teneur élevée en matière organique (5 à 15 %). Cette matière organique faiblement humifiée est intimement liée aux gels d'allophane et séquestrée dans des microstructures globulaires. Elle est alors difficilement accessible à la minéralisation. L'horizon B est peu exploité par les systèmes racinaires. En effet, il présente une faible macroporosité fissurale, une teneur en eau très élevée et une mauvaise aération.

Les systèmes de culture comparés pendant une décennie ont été mis en place pour la plupart en 1984 après 15 ans de monoculture de géranium, ces conditions étant alors les plus représentatives. En 1983, les ¾ des planteurs cultivaient leur parcelle en monoculture (GARIN, 1987). En 1988, les couvertures végétales ont aussi été évaluées après la canne à sucre qui entre en rotation avec le géranium dans la partie inférieure de la zone.

2.2. Dispositifs expérimentaux

La maîtrise de systèmes nouveaux, diversifiés, nécessite que leur mise au point soit réalisée sur des unités de paysage représentatives, avec la participation effective des agriculteurs et des autres acteurs du développement (MICHELLON, BRIDIER, 1987 ; SEGUY, 1982).

L'évaluation agrotechnique et économique rigoureuse des propositions par rapport aux techniques traditionnelles est réalisée sur des dispositifs d'étude pérennisés, sur un intervalle de temps suffisant de l'ordre d'une décennie, nécessaire pour prendre en compte les variabilités climatiques et économiques. Ils sont conduits sur une dizaine d'ares, représentatives du parcellaire sur forte pente, et permettant d'évaluer :

- les rendements des cultures et leur stabilité, en fonction de la variabilité du milieu,

- les temps de travaux et leur pénibilité, ainsi que le coût des intrants, les marges obtenues et la valorisation des journées de travail (marge brute divisée par le nombre de jours de travail),

- l'effet des accidents climatiques (pluies torrentielles, ...) et leurs préjudices, malgré l'implantation de haies antiérosives. Des lignes de bana grass, (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoïdes*), sont disposées régulièrement tous les 3 mètres de dénivellation (sur des pentes voisines de 20 %).

Les problèmes rencontrés dans chaque système sont résolus à partir d'essais thématiques permettant d'améliorer les itinéraires techniques, de proposer des solutions alternatives et d'expliquer les phénomènes observés.

2.3. Les systèmes de culture comparés

Les alternatives comparées comportent les systèmes de culture mis au point en sol nu (depuis plus de 30 ans) et de nouvelles propositions élaborées par la recherche (depuis 1988) dans un environnement protégé (tableau 1) :

<table>
<tr><td>Systèmes de culture</td><td>Géranium en monoculture</td><td>Géranium avec vivrier associé</td><td colspan="2">Géranium en rotation</td><td>Géranium avec couverture après rotation</td></tr>
<tr><td>Précédents culturaux</td><td colspan="5">Géranium rosat en monoculture traditionnelle, système dégradé sédentarisé depuis 15 ans, puis à partir de 1983 :</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Itinéraire technique</td><td rowspan="2">Culture pure de géranium en sol nu</td><td rowspan="2">Géranium avec culture intercalaire en sol nu</td><td colspan="3">Rotations avec cultures vivrières (haricot, maïs, pomme de terre) ou tabac pendant 3 à 5 ans, puis culture de géranium :</td></tr>
<tr><td colspan="2">en sol nu</td><td>avec couverture herbacée permanente</td></tr>
<tr><td>Entretien</td><td colspan="4">Herbicides de pré et de post-levée associés aux sarclages</td><td>Herbicides de post-levée</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Amendements et fumures</td><td colspan="5">Amendements minéraux pour correction des carences effectués en 1983</td></tr>
<tr><td>Fumure minérale seule</td><td colspan="4">Fumures organiques localisées régulièrement à chaque cycle de culture intercalaire ou en rotation et fumure minérale</td></tr>
</table>

Tableau 1 : Les systèmes de culture comparés après monoculture de géranium

- monoculture de géranium rosat, maintenue pendant un quart de siècle,

- systèmes diversifiés en sol nu, avec cultures vivrières conduites en association ou en rotation avec le géranium,

- gestion des sols avec couverture végétale permanente :

  . de graminée : kikuyu (*Pennisetum clandestinum*)
  . et de légumineuse : lotier velu (*Lotus uliginosus*, variété tétraploïde Maku).

Pour disposer de matériel végétal suffisamment homogène, le cultivar «rosé», le plus répandu de géranium rosat, a été choisi et prélevé chez des producteurs de boutures saines. Il est multiplié végétativement et sa densité est maintenue par remplacement annuel des plantes manquantes.

Les itinéraires techniques définis dans le tableau 2 sont actuellement bien éprouvés en sol nu. Avec couverture herbacée, le géranium a été implanté simultanément aux tapis végétaux. L'expérience montre qu'il est plus intéressant de planter le géranium dans une prairie installée (réduction des temps de travaux).

Pour évaluer la productivité des différents systèmes de culture, les récoltes sont hydrodistillées dans un alambic à feu nu d'une capacité de 1000 l environ. L'huile essentielle obtenue qui est réputée pour sa qualité (Géranium Bourbon), est analysée par chromatographie en phase gazeuse.

III- CONSEQUENCES DES MODES DE GESTION DES SOLS SUR LES RENDEMENTS

3.1. Dégradation progressive en monoculture

Traditionnellement, le géranium est une culture itinérante sur défriche d'*Acacia mearnsii*, avec une durée de cycle de 15 à 20 ans, (*Acacia* : 10 à 12 ans - géranium : 5 à 7 ans).

Du fait de l'enclavement des parcelles, les transferts entre le champ et l'extérieur sont réduits. Durant les deux premières années de culture après jachère, les intrants sont inexistants. A partir de la troisième année, la fumure minérale est jugée indispensable et croît régulièrement avec l'âge de plantation pour tenir compte de la réduction de fertilité du sol (MICHELLON, 1992).

Cette dégradation de la fertilité s'accompagne d'un accroissement de l'enherbement, et donc des temps de sarclage. La baisse de productivité du travail conduit au défrichage d'une nouvelle parcelle et à l'abandon progressif de l'ancienne. Mais ce système traditionnel de culture itinérante s'est marginalisé avec l'augmentation de la pression foncière.

La replantation du géranium rosat sur un sol dégradé ne permet pas d'améliorer son rendement en monoculture (figure 1), même avec des doses d'engrais et amendements minéraux mis au point après de nombreux essais thématiques (MARIOTTI, 1952 ; FRITZ, 1973 ; MICHELLON, 1978).

Opérations culturales	Monoculture en sol nu	Rotation ou intercalaire en sol nu	Couverture de kikuyu	Couverture de lotier
Préparation du terrain	Résidus de la culture précédente détruits au glyphosate (1000 à 1500 g/ha) Sarclage manuel et mise en andains des adventices			
Préparation des boutures de géranium	Boutures traitées avec un mélange d'acide indol butyrique (à 0,1 %) et de captane (10 %) pour faciliter la rhizogenèse et la croissance des boutures			
Plantation des boutures	Manuelle à environ 0,8 m x 0,5 m (50 000 boutures par ha). Plantation en fin de saison des pluies (avril à mai), puis remplacement annuel des plantes manquantes			
*Semis des couvertures ou de l'intercalaire		Semis du haricot dans un inter-rang sur deux à une densité de 40 kg par ha	2 kg de semences/ha complétées par bouturage (1 bouture/m dans l'inter-rang)	3 à 6 kg par ha de semences inoculées et enrobées avec du phosphate naturel
Fertilisation (1)	650 kg par ha d'engrais ternaire 15-12-24 environ 2 mois après la plantation du géranium et en mars-avril lors des années suivantes			
		200 kg par ha de 10-20-20 et 3 t par ha de fumier localisés pour le haricot associé		
		Les apports de fumier (5 t par ha) ont été localisés à chaque cycle de culture en rotation		
Maîtrise de l'enherbement (et de la couverture vive) (2)	- Paraquat (400 g par ha) en dirigé, associé en culture pure à l'Atrazine (1250 g/ha) en hiver, ou au diuron (500 g/ha) en été - Sarclage manuel en mars-avril pour enfouissement de l'engrais		Lutte contre les adventices Atrazine (1000 g/ha)en dirigé sur l'inter-rang en mars-avril	Ioxynil (300 g/ha) lors de l'installation du lotier
			Maîtrise des couvertures Fluazifop-p-butyl en plein à 50 g par ha (hiver) ou 100 g par ha (été)	En été : bentazone en dirigé sous le rang (200 g/ha) ou éventuellement atrazine (250 g/ha)
Lutte contre l'anthracnose	Captane (1600 g/ha) dès les premiers symptômes (novembre) renouvelé tous les 50 mm de pluie			
Lutte contre les insectes	Diméthoate ou deltaméthrine, ... lors de l'apparition des dégâts (*Cratopus humeralis*) en été			

Tableau 6 : Itinéraires culturaux suivis dans les différents systèmes de culture

*Sur les parcelles étudiées, le semis des couvertures a été effectué simultanément à la plantation de géranium. L'expérience montre qu'il est plus intéressant techniquement et économiquement de planter le géranium dans une couverture déjà installée (réduction temps de travaux) en mettant les boutures pendant quelques jours en pépinière.

(1) MARIOTTI, 1952 ; FRITZ, 1973 ; MICHELLON, HEBERT, GARIN, 1986 ; MICHELLON, 1988 ; RAUNET, 1991 ; MICHELLON, 1994

(2) DEJANTE, MICHELLON, VINCENT, 1991 ; TREMEL, 1992 ; MICHELLON 1994

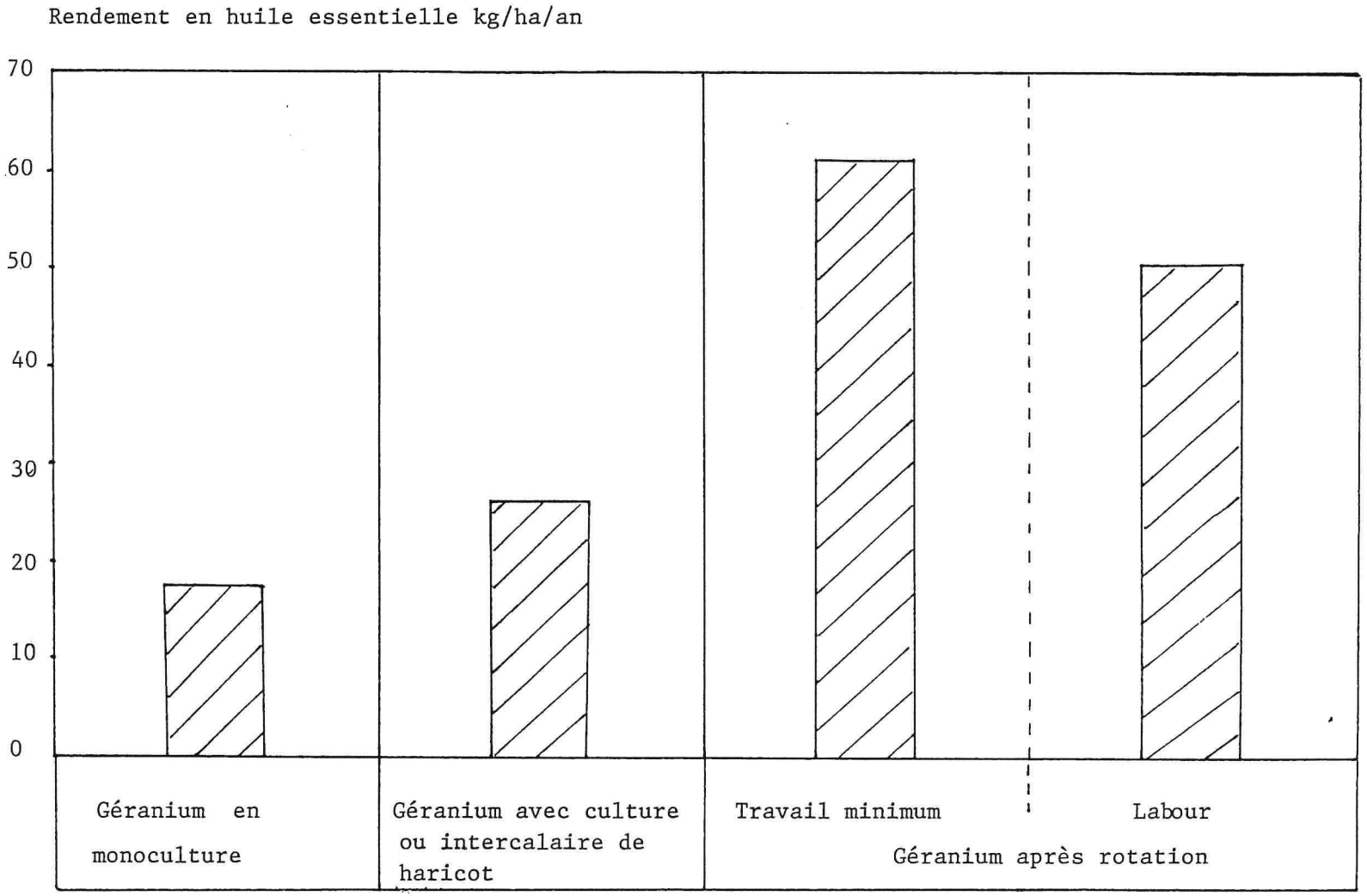


Figure 1 : Comparaison des productions du géranium rosat selon le système de culture en sol nu. Les rendements sont les moyennes des années 1989 à 1992, obtenues après 3 ou 4 ans de cultures vivrières pour les rotations, et 5 années d'association avec haricot (ou pomme de terre en 1983) puis maïs pour les cultures intercalaires. Les labours sont réalisés en mars avant les cultures vivrières ou la plantation du géranium

Les dépérissements, principaux agents de mortalité, sont très élevés en monoculture. Dénommés «maladie de la terre» par les agriculteurs, ils sont dûs essentiellement :

- au flétrissement bactérien, *Pseudomonas solanacearum* biotype 1,

- et à deux pourridiés : *Armillaria heimii* et *Rosellinia necatrix* (BACONNIER, 1988).

Les diminutions de rendements constatées au niveau de la parcelle expliquent l'échec du plan de relance du géranium, mis en oeuvre à l'échelle régionale. Après 3 ans, en 1987, 1000 ha ont été replantés, soit plus de la moitié de la surface totale. La production atteint son niveau le plus bas, avec un rendement moyen de 7 kg/ha dans la zone Ouest, où la monoculture est généralisée (GIGNOUX, 1988).

3.2. Amélioration par la diversification des cultures

En sol dégradé, les apports de matière organique ont toujours une action favorable sur les rendements, en particulier sur les cultures vivrières, qui conservent un statut privilégié auprès des agriculteurs. Ils permettent de régulariser leur production, malgré les incertitudes climatiques et la variabilité de la fertilité du sol (MICHELLON, BRIDIER, 1988). La matière organique localisée en faibles quantités présente, lorsqu'elle n'est pas renouvelée, une action limitée sur la culture suivante. A moyen terme, ses effets cumulés permettent de restaurer la fertilité.

Le géranium rosat assure un approvisionnement aisé et peu onéreux en matière organique grâce aux résidus de sa distillation. Dans les systèmes avec cultures intercalaires, les apports réguliers de compost destinés aux plantes vivrières réduisent la mortalité et augmentent très sensiblement la productivité du géranium associé (figure 1).

Bien adaptées aux exploitations dont la surface est limitée, mais qui disposent d'un accès au marché, les cultures intercalaires améliorent la productivité du sol et la valorisation des journées de travail. Elles permettent de les régulariser malgré les aléas climatiques et conservent la souplesse de l'itinéraire du géranium dans l'organisation du travail, conciliable avec d'autres activités (COURCOL, 1987). Chez les agriculteurs qui bénéficient des structures d'exploitation les plus favorables, les rotations culturales augmentent très sensiblement la production du géranium. Même avec une seule fumure minérale, les rendements sont très supérieurs à ceux obtenus en monoculture. Ils sont accrus lorsque les précédents culturaux reçoivent des apports de compost (figure 1).

Ces techniques de culture sarclées entraînent un déssèchement irréversible de l'horizon de surface, une pénétration difficile des racines en profondeur et augmentent les phénomènes d'érosion (PERRET, 1993).

L'érosion conduit inexorablement à une augmentation des intrants (matière organique, facteur limitant dans les exploitations, mais aussi engrais, traitements phytosanitaires, ...) qui ne suffisent plus pour limiter la baisse de rendement et de l'état sanitaire des cultures. La prolifération des adventices, résistantes aux herbicides (*Cyperus rotondus*, *Nothoscordum inodoratum*, ...) concourt aussi à la dégradation du système et à l'augmentation des temps de sarclage. Afin de réduire ces contraintes, des techniques avec couverture herbacée permanente ont été développées à partir de 1988.

3.3. Systèmes durables avec couverture herbacée permanente

Deux systèmes ont été analysés : d'une part couverture avec graminée (kikuyu), d'autre part couverture avec légumineuse (lotier).

La rusticité et l'agressivité du kikuyu et ses fortes potentialités de production ont conduit localement à sa généralisation dans les prairies. Cette plante pionnière a permis la reconquête des zones dégradées par la monoculture du géranium rosat. Dans d'autres régions tropicales, cette espèce fourragère pérenne à rhizomes et à stolons est aussi utilisée dans les associations forêt-pâturage ou avec verger (FOURNIER, 1981 ; CHOU et al., 1989 ; FIRTH, WILSON, 1995).

En présence d'une couverture végétale, morte ou vive, la prolifération des mauvaises herbes apparaît réduite. Outre les difficultés d'installation des adventices dans un couvert végétal dense, certaines plantes de couverture présentent des effets allélopathiques. Ainsi, les exsudats racinaires de kikuyu, ou les jus de lessivage de ses parties aériennes réduisent la croissance de *Miscanthus* floridulus (CHOU et al., 1989), *Bidens pilosa* et *Cyperus rotondus* (FONTAR, THOMAS, 1992 ; HUMEAU, 1993).

La maîtrise de la couverture est nécessaire en saison chaude pour éviter une concurrence avec la culture. Elle est aisée et peu onéreuse car le fait de disposer d'une flore homogène, quasi monospécifique, permet d'utiliser des doses très faibles d'herbicide. Ainsi, le kikuyu est maîtrisé par une substance de croissance spécifique, le fluazifop-p-butyl (à raison de 60 à 125 g par ha selon la saison), et le lotier par la bentazone (120 g par ha) ou même des apports localisés d'engrais. Les traitements doivent être réalisés avec précautions car il est impératif de ne pas détruire la couverture sous peine de perdre ses effets bénéfiques. Dès que le sol est découvert, à nouveau exposé à la lumière, les adventices agressives prolifèrent (*Cyperus rotondus*, ...). L'association du géranium avec le kikuyu conduit momentanément à une réduction de son rendement en saison chaude (décembre, janvier) par rapport à celui obtenu en sol nu (figure 2). Cet effet qui n'est pas lié à des phénomènes d'allélopathie (FONTAR, THOMAS, 1992) s'accroît lorsque le kikuyu est fauché et n'apparaît pas significativement atténué par une fumure complémentaire (MICHELLON, SEGUY, PERRET, 1996). Avec le lotier maîtrisé, cette concurrence mutuelle en période estivale n'est pas observée, et il peut être exploité pour l'affouragement des animaux, même en association avec le géranium.

Les effets des plantes de couverture apparaissent très bénéfiques lors du passage d'un cyclone (rendement multiplié par 5 avec kikuyu par rapport au sol nu en 1989). Nous retrouvons ainsi l'effet protecteur contre les dégâts du vent et de l'anthracnose, *Glomerella vanillae* var *Pelargonii* Bour., observé en été par les agriculteurs dans les champs envahis par une adventice, *Setaria pallide fusca*.

En année plus séche, l'intérêt des plantes de couverture se maintient, en particulier, pour la légumineuse en sol dégradé après monoculture de géranium (figure 3). A une altitude inférieure, le déficit hydrique est beaucoup plus marqué, ainsi que les dégâts de ver blanc, *Hoplochelus marginalis*, qui infeste la zone. Grâce à la couverture dont le système racinaire joue un rôle de leurre vis-à-vis de sa larve, le rendement est très sensiblement amélioré par rapport au sol nu.

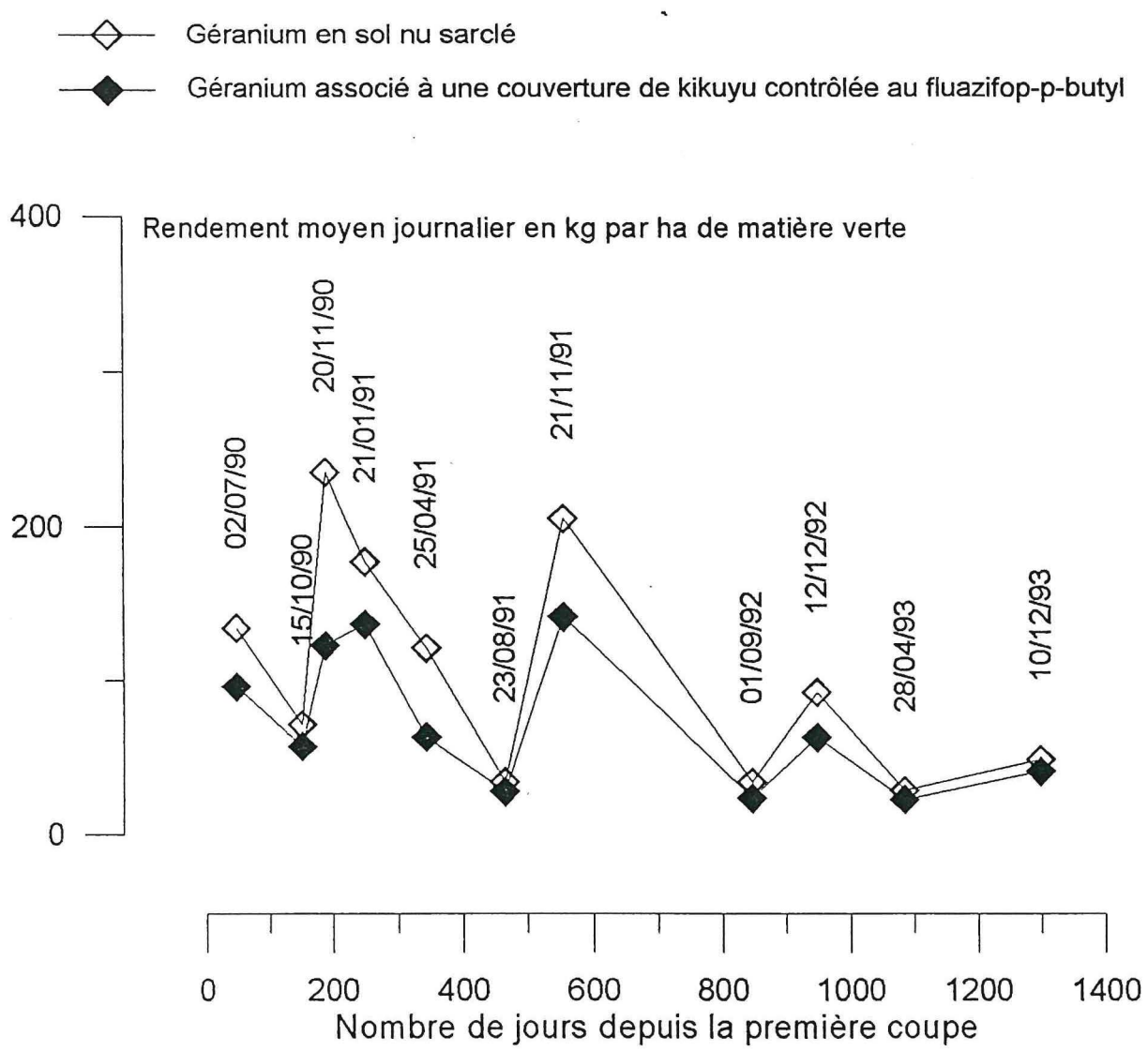


Figure 2 : Vitesse de croissance moyenne du géranium selon le système de culture

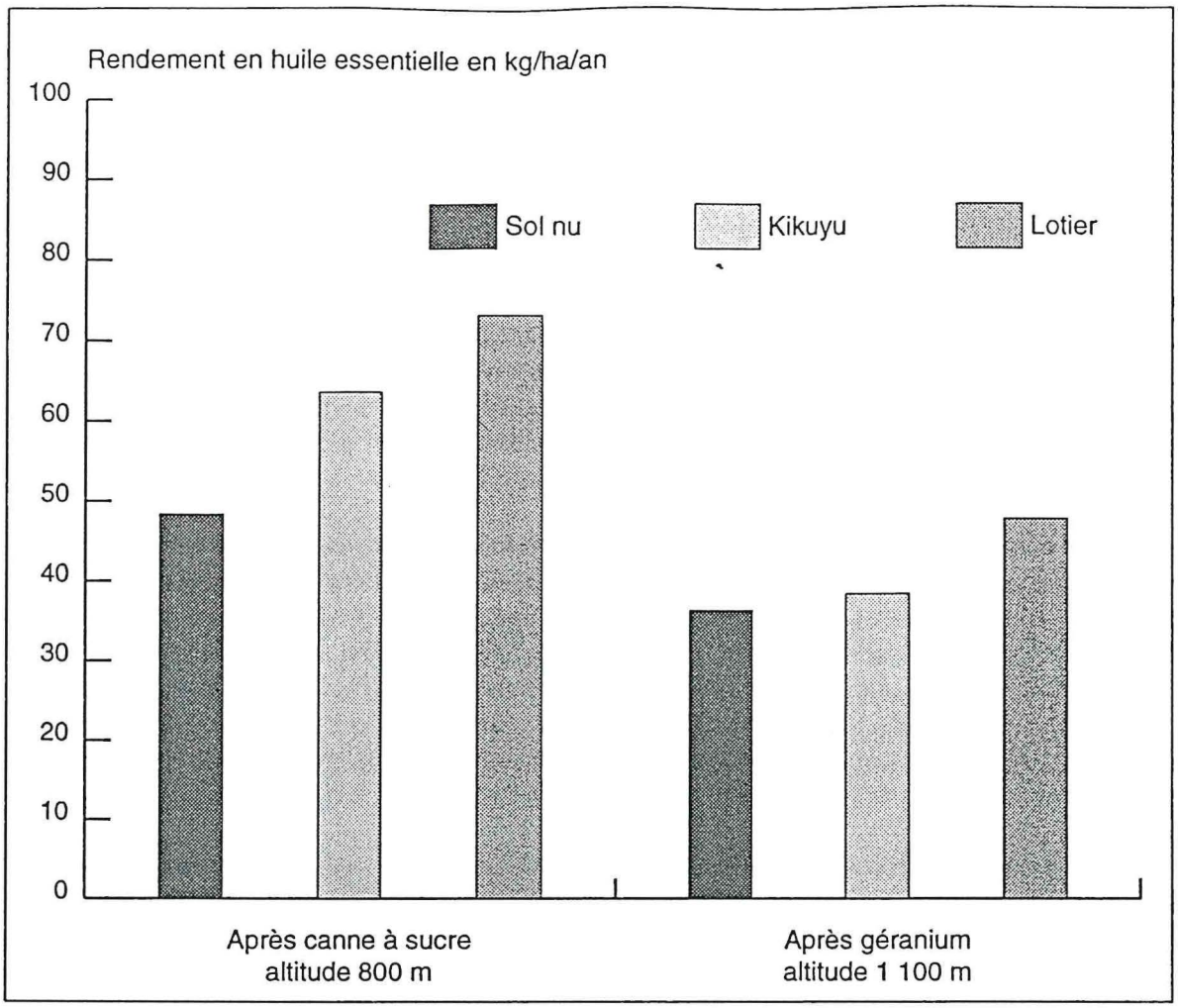


Figure 3 : Effets des couvertures végétales sur les rendements moyens du géranium rosat en fonction du système de culture et de l'altitude (années 1990 à 1991, ou 1992 après canne à sucre)

IV- INTERET QUALITATIF ET ECONOMIQUE DES COUVERTURES HERBACEES

La couverture réduit la prolifération des adventices et supprime les sarclages. Elle assure ainsi économie de main-d'oeuvre et moindre pénibilité du travail.

Les conséquences sont également très favorables sur le milieu (PERRET, MICHELLON, TASSIN, 1994 ; PERRET et al., 1996) : protection totale contre l'érosion (figure 3) et forte réduction du ruissellement, meilleure conservation de l'eau grâce à une infiltration accrue (aucune compétition pour l'eau avec la culture n'est décelée avec ces couvertures maîtrisées), restauration de la fertilité du sol. Les apports de fumier, indispensables en sol nu, peuvent être réduits (MICHELLON, SEGUY, PERRET, 1996) ainsi que les fumures minérales.

Les légumineuses de couverture constituent une source d'azote importante pour les cultures associées, permettant de réduire leur fertilisation. Les études sur la fixation d'azote atmosphérique par la méthode de dilution isotopique en ^{15}N, réalisées par le Laboratoire de Physiologie et Biochimie Végétale de l'Université de Caen, montrent que cette activité est efficace avec le lotier et qu'une part importante de cet azote est transférée au géranium (MICHELLON et al., 1994). En Nouvelle-Zélande, BROCK (1973) évalue sa fourniture annuelle au sol entre 140 et 200 unités par ha selon l'apport de phosphore, qui s'ajoutent respectivement aux 270 à 300 kg exportés dans le fourrage.

L'état sanitaire des cultures est amélioré avec couverture par réduction des dégâts de certains dépérissements tels que maladie de la terre, *Pseudomonas solanacearum* (MICHELLON, SEGUY, PERRET, 1996) ou parasites, comme le ver blanc ou le Cratopus. En été, le géranium subit des attaques d'un charançon phylophage, *Cratopus humeralis*, qui provoque de profondes échancrures dans le limbe des feuilles, malgré les traitements insecticides systématiques. Les adultes du charançon, au comportement réputé grégaire (QUILICI, VERCAMBRE, BONNEMORT, 1992) se regroupent dans la couverture de lotier qui constitue une plante piège très attractive.

La qualité de l'huile essentielle apparaît très semblable avec couverture à celle obtenue en sol nu (tableau 3). Il est cependant conseillé de supprimer la fumure azotée du géranium en présence de lotier pour éviter de l'altérer (tendance à une augmentation de la teneur en isomenthone en été).

Composé	Sol nu	Couverture de kikuyu	Couverture de lotier
Linalol	11,0	9,9	10,5
(Z) oxyde de rose	0,9	1,2	0,8
(E) oxyde de rose	0,3	0,4	0,3
Isomenthone	7,7	10,4	10,1
Citronellol	26,7	23,0	24,5
Géraniol	17,6	17,3	19,4
Formiate de citronellyle	10,0	10,4	8,7
Formate de géranyle	8,4	10,0	8,1
Gaïadiène 6-9	6,5	6,2	5,7

Tableau 3 : Composition moyenne de l'huile essentielle de géranium en rotation avec la canne à sucre, distillé en juillet (Principaux constituants en %)

V- CONCLUSIONS

Sans jachère, la monoculture de géranium a conduit à une extrême dégradation du milieu et des conditions de production. Grâce à des outils biologiques tels que les couvertures végétales il est possible de reconstruire des systèmes agricoles durables. L'ensemble des effets favorables induits par ces nouvelles techniques et, en particulier la protection totale du sol vis-à-vis des accidents climatiques; devrait conduire à moyen terme, à une amélioration très nette des conditions de production, à une diversification et une stabilisation des exploitations agricoles.

Les conséquences dépassent le cadre agricole par la préservation des infrastructures et lagons, la mise en valeur touristique.

BIBLIOGRAPHIE

- BACONNIER C., 1989 : Essais de méthodes de lutte contre *Armillaria* sp. et *Rosellinia* sp., responsables des pourridiés du géranium rosat (*Pelargonium* x *asperum*) à la Réunion. ENSAM, 83 p.

- BRIDIER B., 1985 : Quel avenir pour le géranium et le développement agricole des Hauts de l'Ouest de la Réunion ? L'Agronomie Tropicale vol. n° 4, p. 342-355.

- BROCK J.L. 1973 : Growth and nitrogen fixation of pure stands of three pasture legumes with high/low phosphate. N.Z. Journal of Agricultural Research 16, p. 483-491.

- BOUGERE J., 1988 : Aperçu sur l'érodibilité des andosols cultivés à la Réunion. In : CIRAD : Les andosols de l'île de la Réunion. Séminaire de Saint-Denis 24 mai-1er juin, p. 157-162. CIRAD, CNRS, INRA, ORSTOM, Université.

- CHOU C.H., CHANG S.J., CHENG C.M., WANG Y.C., HSU F.H., DEN W.H., 1989 : The selective allelopathic interaction of a pasture-forest intercropping in Taïwan. II. Interaction between kikuyu grass and three hardwood plants. Plant and Soil 116, p. 207-215.

- COURCOL C., 1987 : Les systèmes de culture intercalaires du géranium rosat dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. IRAT-Réunion ENSSAA, 110 p. + annexes.

- FIRTH D.J., WILSON G.P.M., 1995 : Preliminary evaluation of species for use as permanent ground cover in orchards on the north coast of New South Wales. Tropical Grasslands, vol. XXIX, p. 18-27.

- FONTAR X., THOMAS L., 1992 : Etude des effets allelopathiques d'une couverture de kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) sur géranium, cultures vivrières et certaines plantes adventices. E.S.A. CIRAD, 103 p.

- FOURNIER L.A., 1981 : Importancia de los sitemas agroforestales en Costa Rica. Agronom. Costarr. 5 (1/2), p. 141-147.

- FRITZ J., 1973 : Effet de la fertilisation azotée sur la production du géranium rosat. L'Agronomie Tropicale XXXI, 4, p. 369-374.

- GARIN P., 1987 : Systèmes de culture et itinéraires techniques dans les exploitations à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. L'Agronomie Tropicale 42 (4), p. 289-300.

- GIGNOUX I., 1988 : Analyse évolutive et prospective de la production de géranium à la Réunion. CNEARC IRAT-Réunion, 85 p.

- GRAS R., MONTARONE M., 1993 : Le dépérissement de plantes arbustives à parfum. 1ère partie : la mise en culture. 2ème partie : l'évolution des techniques. PHM Revue Horticole n° 335, p. 17-20, n° 336, p. 19-24.

- HARGROVE W.L. Ed., 1991 : Covercrops for clean water. Ankeny, U.S.A., Soil and Water Conservation Society, 198 p.

- HUMEAU L., 1993 : Etude des effets allélopathiques du kikuyu (*Pennisetum clandestinum* Hochst) sur la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) et deux plantes adventices *Cyperus rotondus* L. et *Bidens Pilosa* L. CIRAD, Université de la Réunion, 26 p.

- MARIOTTI A., 1952 : Culture du géranium : tests de fumure et d'écartement à la station du Tampon. Informations agricoles. Publication de la Direction Départementale des Services Agricoles de la Réunion, Ministère de l'Agriculture n° 5, p. 9-22.

- MICHELLON R., 1978 : Le géranium rosat à la Réunion : l'intensification de sa culture et les perspectives d'amélioration génétique. L'Agronomie Tropicale 3 (1), p. 80-89.

- MICHELLON R., 1988 : Systèmes de culture sur les sols andiques de l'île de la Réunion, p. 95-111. In CIRAD : Les andosols de l'île de la Réunion. Préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires. Séminaire de Saint-Denis 24 mai-1er juin. CIRAD CNRS INRA ORSTOM Université.

- MICHELLON R., 1992 : Les systèmes de cultures. In : Le géranium à la Réunion. C.A.H. Ed. Saint-Denis, Réunion. Graphica, p. 15-22.

- 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 Programme APAFP n° 47-96, 103 p.

- MICHELLON R., BRIDIER B., 1988 : Evolution d'un programme de recherche sur les systèmes d'exploitation des Hauts de l'Ouest de la Réunion. L'Agronomie Tropicale 43 (4), p. 317-325.

- MICHELLON R., DEJANTE P., VINCENT G., NATIVEL R., 1994 a : Gestion d'une couverture de kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) associée au géranium rosat. CIRAD-CA Réunion n° 3, 41 p. + annexes.

- MICHELLON R., DEJANTE P., VINCENT G., NATIVEL R., 1994 b : Gestion d'une couverture de lotier (*Lotus uliginosus*) associée au géranium rosat. CIRAD-Réunion, fiche n° 9, 42 p.

- MICHELLON R., HEBERT A., GARIN P., 1986 : Tests par les agriculteurs de nouvelles techniques de culture du géranium rosat dans les Hauts de l'Ouest. Fiche d'essai IRAT-Réunion n° 24, 16 p.

- MICHELLON R., SEGUY L., PERRET S., 1996 : Association de cultures maraîchères et du géranium rosat à une couverture de kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) maîtrisée avec le fluazifop-p-butyl. ANPP, Quatrième Colloque «Les substances de croissance, partenaires économiques des productions végétales», Paris, 6 février 1996, 8 p.

- MONEGAT C., 1991 : Plantas de cobertura do solo : caracteristicas e manejo am pequenas propriedades. Chapecb, Brésil, Monegat Ed., 337 p.

- PERRET S., 1993 : Propriétés physiques, hydriques et mécanique des sols andiques de la Réunion. Facteurs d'évolution des horizons culturaux. Implications agronomiques et écologiques. Thèse ENSAM CIRAD-SAR, 278 p + annexes.

- PERRET S., MICHELLON R., TASSIN J., 1994 : Soil loss control and soil properties improvment based on cropping systems with cover plants and hedgerows in Reunion Island. Proc. 3rd ESA Congress, 18-22 septembre, Abano-Padova, Italie, p. 737-738.

- PERRET S., MICHELLON R., BOYER J., TASSIN J., 1996 : Agroecological practices as tools for sustainable management of erosion-exposed tropical catchments : quantifying their effects on soil restoration and erosion control in Reunion Island (Indian Ocean, French Overseas Territoires). J. WILEY Ed. Londres U.K. A paraître. In : Sustainable Management of Tropical Catchment.

- QUILICI S., VERCAMBRE B., BONNEMORT C., 1992 : Les insectes ravageurs. In : Le géranium rosat à la Réunion. C.A.H. Saint-Denis Réunion. Graphica, p. 79-80.

- RAUNET M., 1991 : Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion : Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD-Réunion Région Réunion, 426 p.

- SEGUY L., 1982 : Mise au point de modèles de systèmes de production en culture manuelle à base de riz pluvial utilisables par les petits producteurs de la région de Goais au Maranhao Nord-Est du Brésil. Etat du Maranhao. Agronomie Tropicale, vol. 37 (3), p; 233-261.

- SEGUY L. et al., 1993 : Os sistemas de culturas para a regiâo do médio norte do Mato Grosso. Recomandacôas tecnicas. CIRAD, C.L., RHODIA, Brésil, 58 p.

- TREMEL L., 1992 : Lutte contre les mauvaises herbes. In : C.A.H. Le géranium rosat à la Réunion. C.A.H. Ed., Saint-Denis Réunion, 108 p.

B- ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDRIQUE, BIOLOGIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DU SOL

par BOURGUIGNON C.*, CALLOT G**, GABUCCI L.*, MICHELLON R.***, PERRET S.***, RAUNET M.**** et SEGUY L.*****

* L.A.M.S. Marey-sur-Tille - 21120 Is-sur-Tille
** Laboratoire de Science du Sol - INRA - 9, place Viala - 34000 Montpellier
*** C.I.R.A.D. - Agence de la Réunion - 97487 Saint-Denis Cédex Réunion
**** C.I.R.A.D. - avenue du Val de Montferrand - B.P. 5035 - 34032 Montpellier cédex 1
***** C.I.R.A.D. - a/c Dr Tasso de Castro - B.P. 504 - Agencia Central CEP - 74000 Goiânia Goias - Brésil

Introduite en 1882 sur l'île de la Réunion, à la demande des parfumeurs français (SCHERER, 1985), la culture du géranium (géranium rosat) couvrait 10 000 ha au début du siècle. Elle n'occupe actuellement que 1000 ha localisés surtout dans la régions des Hauts de l'Ouest, sur andosols entre 600 et 1300 m d'altitude. Cette culture pérenne est installée pour des périodes de 5 à 7 ans. Autrefois, la culture s'effectuait sur défriche de jachère avec l'*Acacia mearnsii*, légumineuse arborescente, qui restaurait la fertilité des sols. Mais depuis sa sédentarisation, la jachère fertilisante a été supprimée et remplacée par la monoculture du géranium sur de longues périodes (30 ans parfois). Cette monoculture menée, en sol nu avec apports d'engrais minéraux a entraîné une érosion intense et une perte de la fertilité des sols : les andosols sont très sensibles à l'érosion surtout sous un climat tropical à régime cyclonique (RAUNET 1991).

Des études antérieures (GOUBAND, 1992 ; GAUDY, 1990 ; PERRET, 1993) ont mis en évidence, la diminution importante de l'érosion par l'utilisation d'une couverture permanente du sol avec légumineuses et graminées. GUILLUY et PERRET (1991) ont montré que cette disparition de l'érosion n'était pas liée uniquement à l'effet protecteur des couvertures herbacées, mais surtout à l'amélioration des propriétés structurales et de la conductivité hydraulique de l'horizon cultural, assurant une meilleure infiltration de l'eau dans le sol.

Les cultures intercalaires et l'introduction de rotations (canne à sucre, cultures vivrières, ...) avec apport d'engrais organiques (5 à 10 t/ha de fumier) ont amélioré la productivité. C'est surtout grâce à l'installation de système de cultures de géranium avec couverture permanente de graminées et de légumineuses que des résultats plus durables ont été obtenus.

Les premières observations soulignaient, sous couverture une augmentation de l'activité de la faune du sol avec une diminution des dégâts de vers blancs (*Hoplochelus marginalis*), par rapport aux cultures en sol nu. Une augmentation de l'activité des vers de terre avait également été relevée dans certaines zones (DOREE, 1989).

Dans cette synthèse nous montrerons comment des systèmes de gestion avec couverture sont capables de modifier les propriétés physiques, biologiques et microbiologiques des sols et d'augmenter la fertilité.

I- LE MATERIEL AGRONOMIQUE D'ETUDE

1.1. Choix des parcelles expérimentales

Les parcelles étudiées intéressent des superficies moyennes de l'ordre de 10 ares. Elles sont situées à une altitude de 1000 m sur un système de pente générale de 20 %. La pluviométrie moyenne est de 1400 mm avec 6 à 7 mois secs, à moins de 100 mm.

Six systèmes de gestion sont analysés :

- une jachère arborée d'*Acacia mearnsii* avec couvert de *Lantana camara*. La parcelle a subi depuis 1920 plusieurs cycles alternatifs géranium (5-7 ans) / acacia (10-15 ans) ; elle est depuis 15 ans en jachère.

La forêt primaire de bois de couleur n'est plus présente à cette altitude, mais elle a parfois été observée à 1300 m.

- deux systèmes de monoculture de géranium conduits en sol nu après défriche de la jachère :

  . M5 site en monoculture depuis 5 ans,
  . M25 site en monoculture depuis 25 ans (la culture actuelle a 10 ans).

- des systèmes diversifiés avec rotations et apports de fumier (5 t/ha) sur les cultures vivrières,

- deux systèmes de culture du géranium avec couverture permanente :

  . K couverture avec graminée : kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) - 4 ans de plantation,
  . L couverture de légumineuse : lotier (*Lotus uliginosus* Maku) - 3 ans de plantation.

Toutes les parcelles cultivées ont reçu 600 kg/ha d'engrais (15-12-24) deux mois après plantation et les années suivantes en mars-avril.

1.2. Caractéristiques des sols

L'ensemble des parcelles appartient à une série de sols homogènes définis comme des andosols non perhydratés (RAUNET, 1991) (figure 4). La base du sol est constitué par un niveau à «gratons» constitués par des matériaux pyroclastiques. Ce niveau drainant est situé entre 60 et 160 cm de profondeur. Le profil type des sols se présente comme suit :

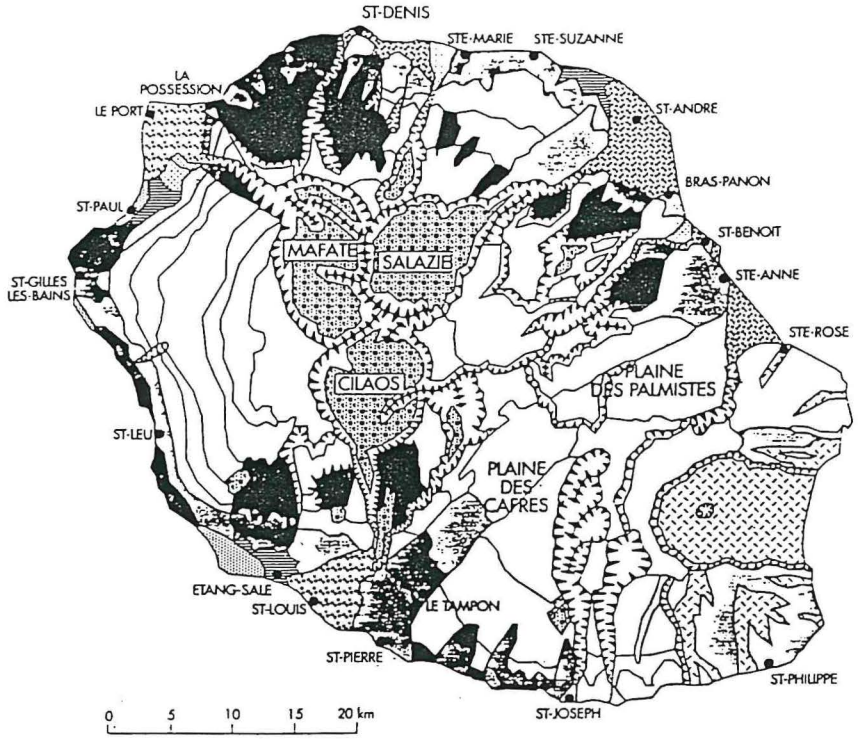
- un horizon A de couleur foncée, à structure particulaire (de 10 à 40 cm d'épaisseur),

- un horizon B sablo-argileux de couleur brun clair, à structure continue, mais friable (40 à 150 cm d'épaisseur),

- un sous-sol à «gratons», drainant brun gris, plus ou moins altéré.

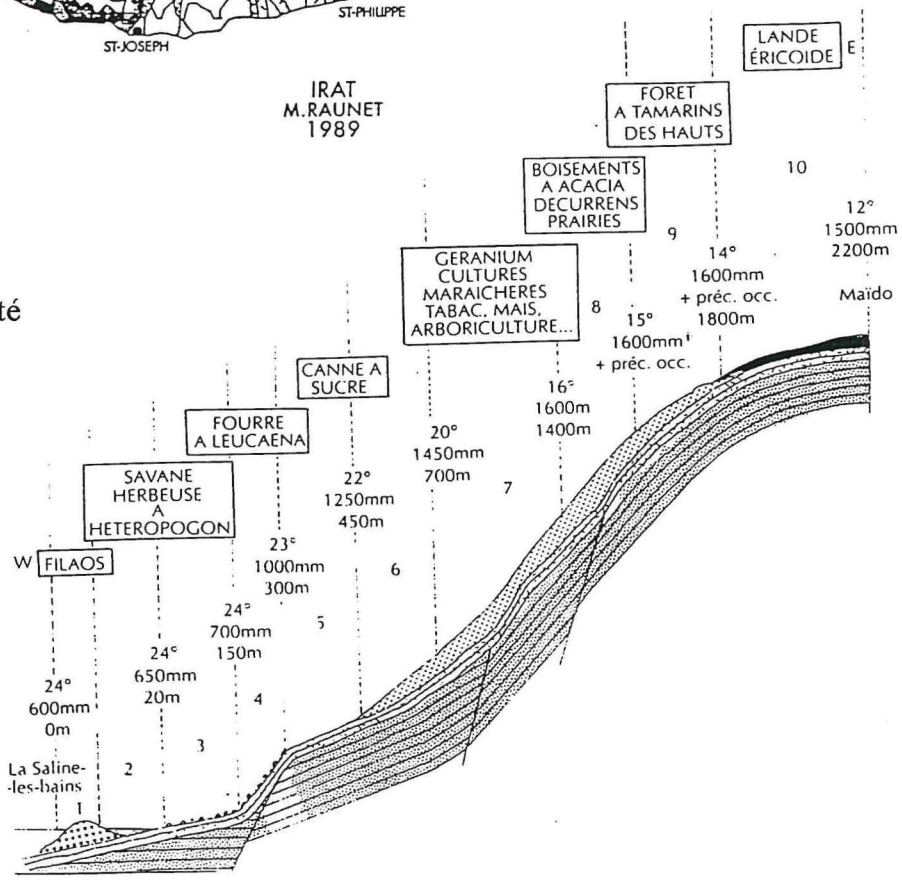
Le pH est de l'ordre de 4,5 à 5 sur l'ensemble du profil.

La teneur en matière organique est élevée en surface (10 à 20 %) avec un rapport C/N de 11 à 13 sous culture. Elle reste encore élevée en profondeur (5-15 %). Cette matière organique est faiblement humifiée. Intimement liée aux gels d'allophane, elle est séquestrée dans les microstructures globulaires, et difficilement accessible à la minéralisation. Sur ces sols, les apports de fumier ont toujours eu des effets très marqués.



IRAT
M.RAUNET
1989

N° 7 : andosol désaturé non perhydraté



Toposéquence de paysages sur le versant ouest entre La-Saline-Les-Bains et Piton Maido

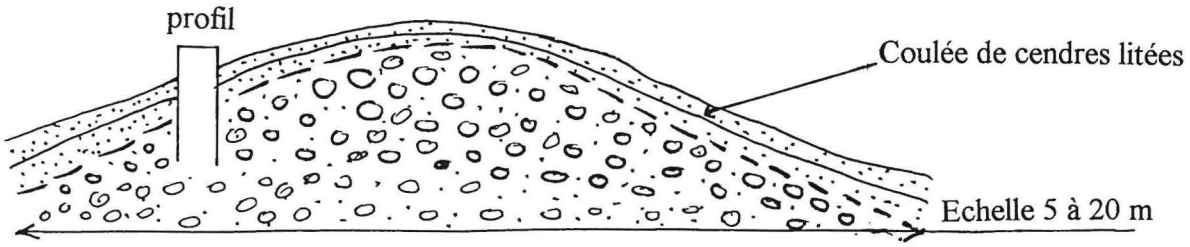


Figure 4 : Modèle de distribution des andosols désaturés non perhydratés

La capacité d'échange cationique, mesurée à la méthode de la cobaltihéxanine est faible et comprise entre 6 et 8 mé/100 g en zone de monoculture du géranium. Par contre, la capacité d'échange anionique est élevée (20 mé/100 g) liée à la présence d'hydroxydes de fer et d'alumine amorphes et d'allophanes révélés par ailleurs par les tests NAF.

Ces andosols sont très riches en phosphore (1500-3000 ppm à l'analyse), mais ce phosphore est toutefois fortement retenu et peu biodisponible. Les apports de phosphates seuls, même calciques sont en grande partie rétrogradés dans le matériau. En fait les gels d'hydoroxydes d'alumine et d'allophane fixent énergiquement les ions PO_4 par l'intermédiaire des ions Al+++ (CHURCHMAN et PARFITT, 1982).

Ainsi, malgré une teneur élevée en matière organique et en éléments nutritifs, le rapport C/N est relativement élevé et signifie que tous ces éléments restent peu disponibles pour les plantes.

1.3. Propriétés physiques et hydrodynamiques

L'appréciation de la granulométrie d'un andosol est toujours délicate compte tenu de l'état microdivisé et de l'emboîtement particulier des microstructures (ROSELLO, 1984). L'appréciation tactile sur le terrain traduit une dominance limoneuse, bien que l'analyse granulométrique en laboratoire indique une texture argileuse (65 à 75 % d'argile avec 18-25 % de linons fins, 2-20 µm) (PERRET, 1990). La granulométrie des matériaux est très fortement dépendante du séchage qui induit au delà de pF4 des structures agrégées en pseudo-sables très stables et hydrophobes.

Les andosols non perhydratés ont une teneur en eau très élevée qui varie à différents pF de la manière suivante :

pF	1	2,5	4,2	5,8
Wp %	120-250	100-180	85-130	20-30

Au point de flétrissement (pF3 à 3,5 d'après BROUWERS et VACKSMANN, 1987), l'humidité est encore très élevée.

La densité apparente est toujours inférieure à 1. C'est dans les horizons B que cette densité est la plus faible : 0,3 et 0,6 aux humidités naturelles (entre pF 1,5 et pF 3,5). L'indice des vides (volume des vides rapporté au volume du solide) suit l'évolution inverse de la densité apparente. La quantité d'air disponible est donc d'autant plus faible que le milieu et hydraté. Ces conditions créent ainsi un milieu particulièrement réducteur. On comprend ainsi, qu'il soit indispensable, surtout pendant les périodes pluvieuses, d'augmenter la porosité pour favoriser l'aération du milieu et permettre aux racines et aux micro-organismes d'évoluer en milieu oxygéné.

La mesure de la conductivité hydraulique des andosols est toujours très élevée à saturation (500 mm à 1 m/h) sur colonne de Darcy. Par contre si l'on considère «le drainage interne» apprécié avec des mesures tensiométriques, on constate que le premier point de mesure possible ne peut être en dessous de pF 1,5 (30 mb) (JOUVE, 1984), ce qui correspond à une porosité inférieure à 100 microns. A ce niveau, la conductivité hydraulique est de 23 mm/h. A pF2 (100 mb) correspondant aux pores inférieurs à 30 microns, la conductivité hydraulique est proche de 0. Les plus forts débits sont donc le fait de la porosité biologique comme l'avaient déjà remarqué GUENNELON et COCKBOREN (1975).

1.4. La mauvaise colonisation racinaire du sous-sol

Malgré leur aspect de «terre franche» (grande épaisseur, absence de cailloux, friabilité, texture limoneuse, ...), les andosols sont peu exploités par les systèmes racinaires en dessous de 20 cm de profondeur. Ceci est surtout valable pour les cultures annuelles sans enracinement pivotant (certaines cultures maraîchères, maïs, ...), mais les arbres fruitiers maintiennent leurs racines dans la terre remaniée des trous de plantation. L'horizon B a une structure «continue» et présente une faible macroporosité fissurale et une mauvaise aération du milieu. Hostile aux enracinements malgré la forte porosité totale (70 à 85 %), la macroporosité susceptible d'être exploitée par les racines fines, est insuffisante. Seules les racines à fort pouvoir de pénétration semblent capables d'explorer le sous-sol. Une deuxième raison est la faible perméabilité à l'air du matériau due à la microporosité emboîtée.

Le travail fréquent du sol (y compris les sarclages) entraîne un dessèchement plus ou moins irréversible et une micro-granulation dans l'horizon de surface. Ces modifications structurales suppriment les réseaux de macroporosité et la continuité porale, ce qui rend difficile la pénétration des racines en profondeur. D'une manière générale, le travail du sol s'est avéré inefficace dans bon nombre de situations (PERRET, 1992). D'autres techniques de gestion ont donc été expérimentées pour redonner aux sols leur fertilité originelle.

Les andosols constituent donc un milieu très particulier, dans lequel l'aération et l'infiltration de l'eau ne pourront être assurées sans la création continuelle d'une macroporosité d'origine biologique et/ou racinaire. Ils constituent un excellent modèle pour mettre en évidence l'importance des couvertures des sols pour augmenter la fertilité du milieu.

II- METHODE D'ETUDE DU FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE ET MICRO-BIOLOGIQUE DU SOL

Dans le sol, les éléments minéraux, au même titre que l'eau sont fortement liés à la phase solide. Ils sont donc peu disponibles. Si les racines des plantes sont capables de prélever des ions en solution, elles modifient aussi fortement les conditions bio-physico-chimiques de leur proche environnement (ROMHELD, 1986 ; MARSCHNER, 1986 ; CALLOT et al., 1983). Ainsi la notion de disponibilité des éléments qu'il est possible de renseigner par l'analyse du profil cultural, du profil racinaire et l'analyse de terre (en partie) reste insuffisante. Elle doit être substituée par la notion de biodisponibilité qui intègre l'ensemble des interactions entre racines, micro-organismes et micro-structures du sol (JAILLARD et HINSINGER, 1993). L'activité biologique du sol influe considérablement sur la biodisponibilité des éléments. Les vers de terre sont de puissants agents d'aération et de structuration du milieu (BOUCHE, 1983, KRETZSCHMAR, 1982 ; LEE and FOSTER, 1991 ; LAL, 1988 ; LAVELLE et al., 1992 ; MONMIER, 1992 ; NOORALLAH, 1993 ; WOLTERS, 1991). L'ensemble de la mésofaune participe aussi à la stimulation de l'activité des micro-organismes (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; BOURGUIGNON, 1991 ; SATCHELL and al., 1989 ; SWIFT and SANCHEZ, 1984).

L'appréciation de la fertilité d'un milieu devra donc s'appuyer au niveau du terrain, sur un ensemble d'éléments diagnostics prenant en compte la structure du sol (profil cultural), les profils racinaires et l'activité de la faune du sol, éléments déterminants de l'activité microbiologique du sol. Elle peut être complétée par des tests révélateurs du pH, de l'état des matières organiques et des conditions d'aération du milieu, voire de la présence des principaux cations et anions dans la solution du sol.

2.1. L'analyse structurale et microstructurale du sol

Des tranchées pédologiques ont été ouvertes dans les différentes parcelles où l'état de la végétation du géranium était homogène et représentatif de l'ensemble. Chaque tranchée a été creusée dans l'inter-rang à l'aplomb de deux plants de géranium. Les profils racinaires schématisés dans les différents modèles intègrent donc chaque fois 2 fois un quart du système racinaire, soit un demi-système racinaire d'un plant de géranium.

2.1.1. Transition entre les horizons

L'alimentation hydrique d'une plante est dépendante de la colonisation du sol par le système racinaire. Une alimentation régulière, sans manque ni excès, régule la nutrition minérale aux différentes périodes critiques du cycle végétatif et en particulier la nutrition azotée (MAERTENS, 1984). Il est donc important que le système racinaire d'une plante puisse être réparti sur l'ensemble du profil pédologique. Une attention toute particulière devra être faite sur la transition qui existe entre les différents horizons (CALLOT, 1984 ; SEMAVOINE, 1988). Une limite brutale et contrastée est susceptible de constituer un obstacle à la pénétration des racines et de l'eau. Elle révèle un milieu dans lequel il peut se produire des excès ou des manques d'eau, néfastes à la plante. La limite entre l'horizon organique du surface (horizon A), et l'horizon B intermédiaire est susceptible de renseigner sur les possibilités d'intégration du stock organique en profondeur. Cette intégration de la matière organique en profondeur est généralement assurée par l'activité de la macrofaune (vers de terre, larves, insectes, ...). Quand il est possible d'observer en détail la base du profil de sol au contact du substratum, cette information est également intéressante à préciser, car elle révèle les possibilités de drainage profond. Une limite brutale entre l'horizon B, intermédiaire, et le substratum, est indicateur d'un milieu à drainage déficient dans lequel les transferts de l'eau et de l'air sont limités. Par contre une transition progressive entre le sol et le substratum révèle un bon drainage du sol et une bonne aération favorable à l'activité des racines et des micro-organismes. Des limites progressives entre les couches de sol sont le signe d'une intense activité biologique (racinaire et faunique). L'horizon de transition en contatc avec le substratum est souvent plus poreux que l'horizon B sus-jacent, nous l'avons noté Bbio. La porosité de cet horizon de transition est d'origine racinaire et faunique (CALLOT et JAILLARD, à paraître). Elle assure un drainage naturel au sol. Sa présence au sein d'un profil est toujours révélatrice d'une bonne activité faunique du sol, soulignée aussi par un passage graduel entre les horizons. La disparition progressive de ce niveau poreux à la base du profil, entraîne une fermeture du drainage profond et induit progressivement le développment d'une discontinuité plus brutale entre l'horizon organique de surface et l'horizon sous-jacent.

La présence de limites brutales entre les couches de sols, révèle l'absence d'activité biologique, avec prédominance des phénomènes de lessivage et de précipitations physico-chimiques qui tendent à fermer le système/sol. Celui-ci devient plus réducteur, moins favorable à l'activité donc moins fertile et plus sensible aux phénomènes d'érosion. Par contre un profil de sol montrant des transitions progressives et ondulées révèle un système ouvert biologiquement actif dans lequel les transferts d'eau et d'air assurent un milieu favorable à l'activité des racines et des micro-organismes (figure 5).

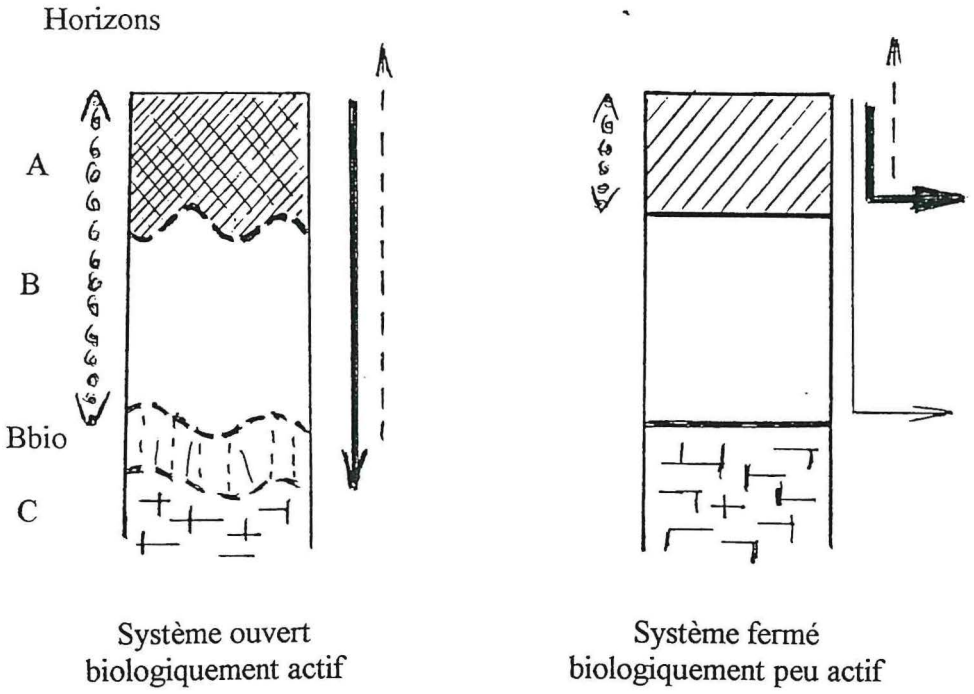
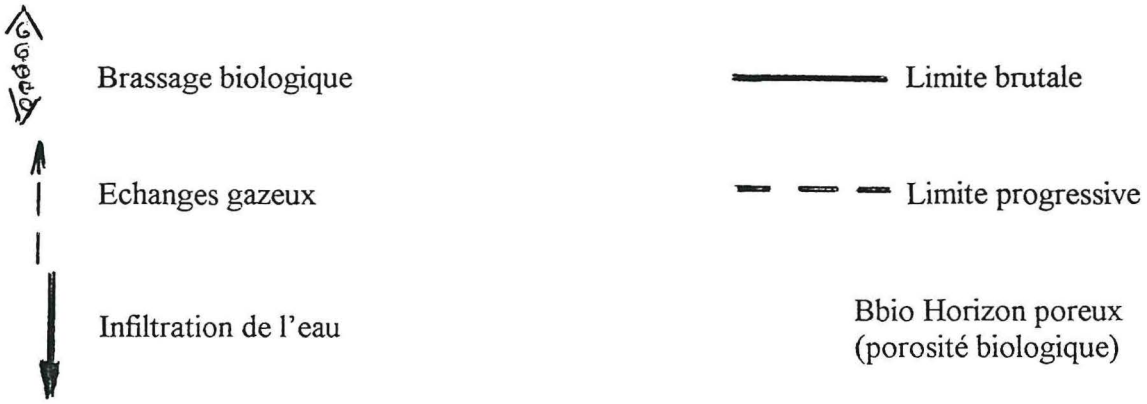


Figure 5 : Modèle structural de fonctionnement biologique du sol



2.1.2. Microstructures du sol

Au sein d'un horizon la structure la plus favorable à l'enracinement et à la nutrition minérale serait un assemblage d'agrégats cohérents et stables de 2 à 3 m/m (JAILLARD et HINSINGER, 1993). Une agrégation stable est généralement construite par l'activité de la macro et mésofaune du sol, en particulier par celle des vers de terre (LAL, 1988 ; LEE and FOSTER, 1991). Une simple observation morphologique renseigne sur cet état microstructural. La stabilité de cette micro agrégation peut rapidement être testée par suspension dans une fiole d'eau après forte agitation (BOURGUIGNON).

La présence de précipitations minérales, péri ou endoracinaires est révélatrice d'un déséquilibre nutritionnel des racines, susceptibles de montrer des phénomènes de carence ou de toxicité (CALLOT et al., 1983 ; JAILLARD, 1982). L'observation de telles bioconcentrations peut être réalisée directement sur le terrain à l'aide d'une loupe binoculaire.

2.2. Activité faunique et profils racinaires

Au cours du creusement des fosses pédologiques, les principaux groupes faunistiques présents dans le milieu ont été relevés.Les observations ont été faites en avril, en fin de période humide. Des observations complémentaires pourraient également être faites en période sèche. Parmi les différentes populations relevées, seule celle des vers de terre a été quantifiée.

L'analyse architecturale des différents systèmes racinaires a été faite en notant en particulier les différences d'enracinement entre les plantes ligneuses pérennes (géranium en particulier) et les plantes herbacées de couverture.

2.3. Test matière organique et contrôle du pH *in situ*

2.3.1. Test de la matière organique

Un simple test avec l'eau oxygénée à 120 volumes permet de distinguer une matière organique bien humifiée (type mull), d'une matière organique peu humifiée (de type moder ou mor). Un étalonnage sommaire des vitesses de réaction des particules de terre peut être fait en fonction des différents systèmes de sol. La comparaison de ce test avec les résultats de laboratoire montre qu'il est applicable sur les andosols et permet de donner une idée de la teneur en M.O. d'un horizon. Cette dernière est d'autant plus élevée que la réaction est longue. Le test permet aussi de voir la qualité de la M.O. dans les andosols. On observe en effet de grosses bulles sur les matières organiques faciles à minéraliser et de petites bulles sur celles qui sont tannées ou bloquées. Dans les sols observés, la matière organique réactive avec le test, n'existe que sur 20 cm sous culture, alors qu'elle est présente jusqu'à 60 cm dans le système jachère sour *Acacia mearnsii*. Si l'on compare avec les sols européens, ce test confirme que les andosols ont beaucoup de matière organique (carbone dosé au laboratoire), mais que celle-ci est peu active sur le plan biologique. En effet, en Europe, le test réagit bien au-dessus de 1,5 % de M.O., alors que dans les andosols nous n'avons observé des réactions qu'à partir de 5 % de M.O.

2.3.2. pH *in situ*

Les mesures de pH *in situ* faites avec des indicateurs colorés sont souvent suffisantes pour renseigner sur le pH du sol. Elles permettent de suivre l'évolution du pH de manière comparative sur les différents horizons d'un même profil, sur les agrégats à l'intérieur d'un horizon et sur les pH locaux rhizosphériques (des différences de 1,2 ou 3 unités pH peuvent exister selon les espèces végétales et les microsites).

2.4. Conditions d'oxydo-réduction du milieu

Les sidérobactéries ont la particularité de réduire les ions Fe 3+ en Fe 2+ en milieu microaérophile, et d'oxyder les ions Fe 2+ en Fe 3+ en milieu aéré. Pour mettre en évidence leur activité, on utilise le ferricyanure de potassium (Fe 2+) et le thiocyanate de K+ (Fe 3+). L'intensité de la couleur est notée sur le terrain avec un Munsell (Référence Munsell Chart Book of Color). On distingue les ions Fe 2+ produits par les sidérobactéries de ceux produits chimiquement par l'anaérobiose à l'aide de l'intensité des bleus obtenus.

2.5. Observations microscopiques «*in vivo*»

A l'aide d'un microscope Nachet N.S 400 en polarisation et contraste de phase, nous avons effectué des observations «*in vivo*» de chaque horizon, de chaque parcelle aux grossissements x 250, x 400, x 1400. Les observations ont été effectuées aux dilutions 1/100.

2.6. Test d'activité enzymatique

Une très grande partie des éléments minéraux comme le phosphore par exemple, et les oligo-éléments sont solubilisés dans le milieu grâce à l'action d'exo-enzymes. Ces enzymes sont sécrétées par les micro-organismes du sol (champignons, bactéries, actinomycètes) et aussi les racines. De nombreuses méthodes ont été proposées pour doser la quantité de ces exo-enzymes sécrétées dans le milieu. Parmi ces méthodes, la méthode de dosage des phosphatases par le p-nitrophenyl phosphate (TABATABAI and BREMNER, 1969 ; TABATABAI, 1980) semble la mieux adaptée. Ce test d'activité phosphatasique en temps que reflet de la fertilité du sol a déjà été utilisé sur les sols de Camargue (FAUVEL et ROUQUEROL, 1970), mais il n'avait toutefois pas donné de résultats significatifs par suite de la trop grande hétérogénéité des milieux comparés. En fait, les activités phosphatases sont très dépendantes du pH du milieu, il est donc très important de comparer des échantillonnages de terre dans une même gamme de pH. Dans notre situation les échantillons de sols appartiennent tous à des andosols acides compris entre 4,5 et 5.

III- MODIFICATIONS DU FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE ET MICRO-BIOLOGIQUE DANS LES DIFFERENTS SYSTEMES DE CULTURE

La simple observation visuelle du profil d'un andosol révèle que l'agrégation des particules de sols ne concerne que l'horizon de surface, de couleur foncée (horizon A). L'horizon B sous-jacent présente une matrice continue constituée par une organisation complexe de microstructures et de nanoagrégats (DENAIX, 1989 ; ROSELLO, 1984). L'horizon superficiel apparaît toujours bien structuré avec des agrégats stables d'origine faunique. Il est particulièrement bien développé et conservé sous friche ligneuse (40 cm d'épaisseur) où l'on observe une activité biologique intense (macro, méso, micro faune et

racines). La mise en culture a provoqué des modifications de cet état initial. On assiste à une minéralisation accélérée de la matière organique, à une moindre activité des racines des cultures. L'état structural se modifie, les agrégats de plus petite taille sont moins stables et les mottes peu cohérentes.

Sous culture, le remaniement superficiel par sarclage occasionne un émiettement plus important de la structure. Puis progressivement le décapage par érosion pluviale devient de plus en plus important. Lorsque cet horizon organique de surface a complètement disparu, l'horizon B affleure. La partie artificielle de cet horizon à structure continue, va subir dans sa couche superficielle cultivée, une dessication poussée (seuil d'irréversibilité dépassé) conduisant à la formation d'un horizon sec, particulaire, pulvérulent de quelques centimètres, très sensibles à l'érosion pluviale et éolienne (PERRET, 1992). Ces processus de dégradation et d'érosion des andosols désaturés de la Réunion bien mis en évidence par M. RAUNET (1991), ont entraîné une baisse évidente de la fertilité des sols comme nous l'avons présenté en introduction. Le maintien de la fertilité est devenu alors fortement dépendant des itinéraires techniques, des apports massifs et répétés de matière organique et d'une fertilisation intense.

3.1. Systèmes sous forêt, jachère et monoculture de géranium

3.1.1. Profils structuraux et activité faunique

La comparaison des profils structuraux exprimée dans le schéma de la figure 6A, révèle effectivement que les sols sous jachère d'*Acacia mearnsii* et forêt primitive de bois de couleur, présentent un horizon A organique bien structuré, avec un passage graduel à l'horizon sous-jacent. Les sols en monoculture de géranium, sans apports organiques présentent un horizon A de surface à structure poudreuse avec un passage brutal à l'horizon sous-jacent. Sous forêt et sous *Acacia mearnsii*, nous avons toujours relevé la présence d'un niveau poreux, de couleur plus rouge (Bbio) au contact avec le niveau de base à «gratons». Sa présence est révélatrice d'une bonne activité faunique soulignée par le passage graduel entre les horizons. Sous monoculture de géranium, ce niveau poreux à la base du profil disparaît progressivement, entraînant la fermeture du drainage profond, et le développement d'une discontinuité plus brutale entre l'horizon organique de surface et l'horizon sous-jacent.

Le relevé de l'activité faunique dans les différents profils est exprimé dans le tableau 4 ci-après. Il permet de constater sous forêt et sous jachère d'*Acacia mearnsii* une intense activité de la mésofaune, avec en particulier la présence de très nombreux amphipodes du type *Talorchestia rectimana* décrits par SEURAT (1934) à Tahiti, Madagascar et dans les îles Seychelles. Ces amphipodes et les nombreux diplopodes (iules) et isopodes présents concentrent une quantité importante de calcium dans leurs carapaces.

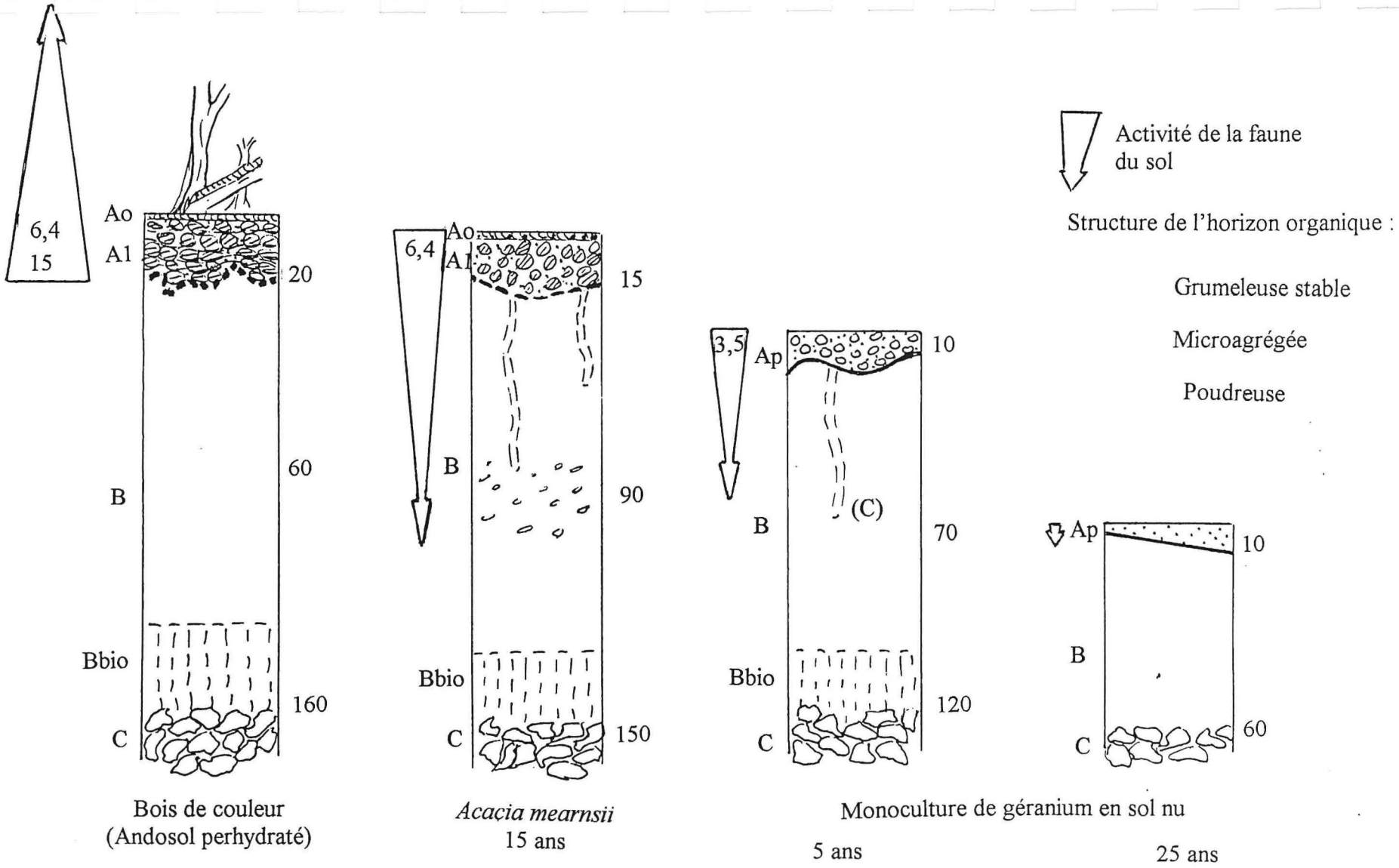


Figure 6A : Profils structuraux et faune du sol

Les nombres inscrits dans les flèches indiquent la population de vers de terre (nbre ind./m²)

Type d'horizon	Groupes faunistiques observés	Forêt de bois de couleur (altitude 1300 m)	Système à base de géranium (1000 m) Jachère d'*A. mearnsii*	5 ans de monoculture	25 ans de monoculture
Aoo	Diplopodes	+++			
	Isopodes	++			
Ao	Collemboles	++	+++		
	Acariens	+++	++		
	Enchytreides	+++	+++		
	Diplopodes				
	Amphipodes	++++	++++		
	Vers de terre	6,4			
A	Acariens	+++	+++	++	++
	Diplopodes		++	+	+
	Vers de terre	15	6,4	3,5	
	Insectes			++	+
B	Genre Lithobia		++		
	Insectes	+	+++	++	
	Mammifères		++		

Tableau 4 : Principaux groupes faunistiques dans les andosols sous forêt primaire, jachère arborée et en monoculture de géranium
Les populations de vers de terre sont données en individus par m².

Parmi la faune du sol relevée, la population des vers de terre a été quantifiée. Dans ces sols, les vers de terre ne sont présents que dans l'horizon organique de surface. Il s'agit d'espèces épi-endogées. La population de vers de terre passe de 15 ind./m² sous forêt de bois de couleur à 6,4 ind./m² sous jachère, et à 3,5 ind./m² après 5 ans de monoculture. Aucun ver de terre n'a été observé dans la fosse de la parcelle en monoculture de géranium depuis 25 ans. Sur l'ensemble, 3 espèces ont été relevées dont 2 identifiées : *Pontoscolex corethrurus*, espèce endogée, géophage qui se nourrit de la matière organique des sols. Cette espèce présente sous forêt et sous jachère, a de très fortes capacités de colonisation dans les zones tropicales humides (LAVELLE, 1987). Sous forêt de bois de couleur, *P. corethrurus* est associé à *Amyanthas corticis*, qui s'alimente principalement de litière prélevée en surface. La diminution de la population de vers de terre est en relation avec la diminution de l'humidité et du stock de matière organique (cf. analyse de terre). Cette diminution de la population des vers de terre est en relation directe et la dégradation de la structure. La structure la plus stable a été observée sous jachère, où les agrégats de la couche de surface sont constitués exclusivement par des fécès de *P. corethrurus* intensément colonisés par les racines de *Lantana camara*, en sous couverture. La stabilité remarquable des agrégats biologiques du système sous jachère provient aussi de la stabilisation de la matière organique par le calcium, abondamment restitué par la litière de l'*Acacia mearnsii*, légumineuse arborescente riche en calcium (et/ou du *Lantana camara*). L'absence de structure stable dans le système de monoculture de géranium est en relation directe avec l'absence de vers de terre. Ces observations mettent en relation l'activité des vers de terre avec la stabilité des structures de l'horizon organique de surface et confirment le rôle structurant des vers de terre, bien étudié en région tropicale (BLANCHART and SPAIN, 1989 ; LAVELLE, 1988 ; SWABY, 1950).

Dans l'horizon B à structure continue, l'activité faunique est surtout représentée par les insectes, et en particulier des courtillières (*Gryllotalpa gryllotalpa*) très active sous jachère d'*Acacia mearnsii*. Dans ce type de milieu, les insectes ne construisent pas des galeries suffisamment stables capables d'assurer un bon drainage et une aération suffisante du sol. Seule l'activité des racines sera alors capable de construire une porosité efficace au sein de l'horizon B à structure continue.

3.1.2. Distribution comparée des profils racinaires

Sous forêt de bois de couleur et sous acacia les systèmes racinaires (schématisés sur la figure 6B) s'établissent à deux niveaux préférentiels, dans l'horizon supérieur organo-minéral (où l'activité biologique et microbiologique est très élévée) et au contact du substratum (Bbio). Ces deux niveaux sont effectivement les plus riches en éléments minéraux provenant du cycle biologique dans l'horizon A et de la roche mère (basalte et cendres pyroclastiques) dans l'horizon Bbio. Sous forêt de bois de couleur, on observe effectivement une importante colonisation sur le niveau à «gratons». C'est dans ces niveaux profonds que les arbres puisent les éléments minéraux comme le calcium, le potassium, le phosphore, abondants dans ces matériaux volcaniques. Sous jachère, le développement des racine d'acacia avec nodosités est localisé entre 20 et 70 cm de profondeur dans la partie supérieure de l'horizon B, dans un milieu aéré par l'activité faunique (lithobies, courtillières, petits mammifères).

En monoculture de géranium, son système racinaire développe un pivot avec deux niveaux d'enracinement : dans la couche de surface et dans le niveau à «gratons». Dans le profil observé après 5 ans de culture de géranium, suite à la jachère, le géranium semblerait installer un deuxième niveau de racines sous l'horizon organique de surface au milieu des racines des plantes adventices (Cypéracées, *Oxalis*, ...). Le niveau de racines développé vers 50-70 cm dans une couche plus poreuse semblerait être en relation avec le front de l'activité de la macrofaune (courtillières). Dans le profil observé après 25 ans de monoculture, l'horizon organique de surface, peu épais, à très faible activité biologique, à structure dégradée, est dévaforable aux développements des racines. Les racines superficielles sont toutes localisées sur la discontinuité structurale. Ce développement racinaire concentré sur un plan, à la base de l'horizon de culture, explore un domaine de sol limité et reste très sensible aux stress hydriques ; il est donc défavorable à une bonne alimentation minérale de la plante, même si le sol reçoit des fertilisations adéquates.

Les tests *in situ* de pH nous ont permis de noter un pH moyen de l'horizon A de 5,7, alors que le pH autour des racines de géranium est de 5,3, mais de 6,2 autour des racines d'*Oxalis* (plante adventice). Le géranium étant une plante exigeante en calcium, ses racines auront tendance à acidifier le milieu, alors que l'*Oxalis*, plante qui secrète beaucoup d'acide oxalique aura tendance à fixer le calcium sous forme d'oxalate de calcium. Ce dernier étant peu soluble, constitue une forme de réserve de calcium qui n'est d'ailleurs pas révélé par les dosages d'analyse de terre. Ce stock de calcium fixé sous forme d'oxalate de calcium transformé par voie microbienne peut être à nouveau absorbé par les racines de géranium. Ce mécanisme de stockage du calcium en milieu acide sous forme d'oxalate de calcium, est également réalisé par les ectomycorhizes de nombreuses plantes ligneuses.

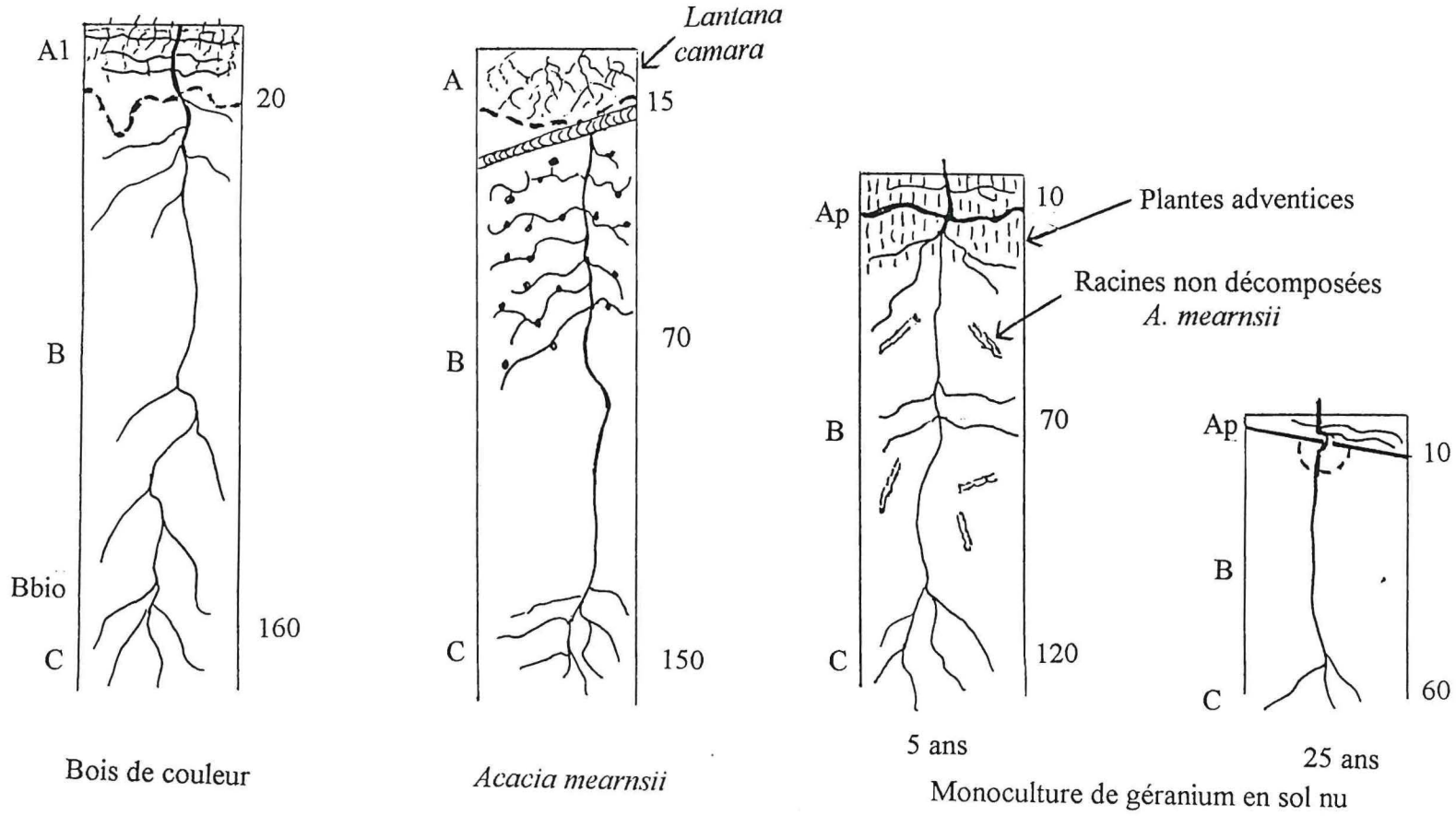


Figure 6B : Schéma des profils racinaires sous forêt de bois de couleur (altitude 1300 m) et dans le système à base de géranium (1000 m) : jachère d'acacia et en monoculture

3.1.3. Modifications de l'activité microbiologique

Les couleurs obtenues lors des tests d'activité des sidérobactéries (tableau 5) mettent en évidence deux phénomènes intéressants :

- l'intensité des couleurs est telle qu'il a fallu procéder à une dilution des réactifs au 1/5 pour lire les tests. Ceci semble lié à la grande microporosité des andosols et leur teneur élevée en matière organique. La minéralisation de cette matière organique dégage une quantité importante de CO_2, certainement piégé dans les micropores, et générant des conditions microaérophiles,

- l'activité des sidérobactéries baisse avec la profondeur dans tous les sols, suivant de façon très nette l'activité des autres microbes du sol.

Ces tests sont très bien confirmés par les dosages du fer assimilable au laboratoire qui montre une corrélation entre la teneur en fer assimilable, la teneur en matière organique et l'activité biologique des différentes parcelles dans les horizons de surface.

Note : Vu les intensités des réactions observées sur le terrain, il serait intéressant d'approfondir l'étude des sidérobactéries dans les andosols.

Les observations microscopiques *in vivo* des corps bactériens ont permis de distinguer deux phénomènes principaux :

- les horizons superficiels (0-2 cm) sous forêts ou sous cultures sont pauvres en bactéries et en champignons. Ceci explique peut-être l'accumulation de matière organique dans les andosols,

- les observations microscopiques confirment les mesures de laboratoire :

Emplacement avec horizon et profondeur (cm)			Sol	FE++	Fe+++	M.O.
Forêt de bois de couleur	Ao	0-2	7,5 YR 3/2	5 B 3/4	2,5 YR 5/10	O.L
	A	2-25	7,5 YR 3/4	5 B 3/4	2,5 YR 5/10	O.L
	B	50-60	7,5 YR 3/3			o.L*
		60-70*	2,5 YR 5/2	7;5 BG 5/6	5 YR 6/10	o.L*
		100-130	7,5 YR 4/4	7,5 BG 3/4	5 YR 7/8	
	Sap	130-150	7,5 YR 4/5	7,5 BG 3/4	5 YR 7/8	
Jachère d'acacia	Ao	0-6	7,5 YR 2,5/2	7,5 PB 2,5/2	2,5 YR 7/8	O.L
	A	6-20	7,5 YR 4/3	5 PB 3/4	10 R 6/12	O.L
	B	20-90	10 YR 4/4	5 PB 4/4	10 R 6/12	o.L
		90-120	7,5 YR 4/6	5 PB 4/4	10 R 5/8	
	Sap	120-140	7,5 YR 4/4	2,5 B 4/2	10 R 5/12	
	C	150	7,5 YR 4/6	2,5 B 5/2	5 YR 6/12	
Géranium en monoculture (25 ans)	Ao	0-2	7,5 YR 3/3	5 PB 2,5/4	10 R 5/12	O.c
	A	2-10	7,5 YR 3/3		10 R 6/12	O.L
	B	10-60	7,5 YR 4/4		5 YR 6/8	
	R	70	7,5 YR 4/4		5 YR 5/6	
Géranium en rotation	Ao	0-5	7,5 YR 3/2	10 B 2,5/4	7,5 YR 6/10	o.L
	A	5-30	7,5 YR 3/2	10 B 2,5/4	7,5 YR 6/10	O.L
	B	30-120	7,5 YR 3/4	10 B 2,5/4	5 YR 6/10	
	R	130	7,5 YR 3/4	2,5 B 3/4	7,5 YR 7/6	
Kikuyu	Ao	0-1	10 YR 3/4	10 très bleu	10 R 7/12	O.L
	A_{10}	1-6	10 YR 3/4	5 PB 3/2	10 R 5/10	o.L
	A_{11}	6-26	10 YR 4/4	2,5 PB 4/4	10 R 5/10	o.c
	B	26-70	10 YR 4/4	7,5 BG 5/4	2 YR 5/8	
	C	100-110	10 YR 5/6	7,5 BG 5/4	2 YR 5/8	
Lotier	A	0-20	7,5 YR 3/3	5 PB 3/4	10 R 6/12	O.L
	B	20-35	10 YR 4/6			o.L
		35-120	10 YR 3/3			

Tableau 5 : Résultats des tests sur les sidérobactéries (Fe++, Fe+++) et la matière organique (M.O.)

Référence des couleurs sur l'ouvrage : Munsell Chart Book of Color (couleurs observées sur jus extraits du sol).

Réactivité de la matière organique au test H_2O_2 :

O : grosse bulle, o : petite bulle, L : réaction longue, c : réaction courte,
* : test effectué dans la zone rhizosphérique.

. pour les horizons situés sous la litière, une plus forte abondance de bactéries est observée sous forêt de bois de couleur et jachère d'acacia que sous cultures de géranium,

. au niveau de l'horizon Bbio au contact des gratons, on note à nouveau la présence de nombreuses bactéries dominées par des bâtonnets.

De façon générale, l'observation *in vivo* montre une forte opposition entre l'eau libre de la préparation envahie de bactéries et les grains sans corps microbiens. La rareté des champignons mériterait une étude plus approfondie sur cette population microbienne évoluant en conditions microaérophiles.

Ces premières observations de terrain et de laboratoire nous permettent de faire un parallèle avec les sols de craies tendres du crétacé supérieur où se retrouve la même dominance d'acariens et de collemboles, le même blocage de la matière organique, la même réaction forte de Fe++, les mêmes bactéries spécifiques de la roche (bactéries du calcin sur les craies et sidérobactéries dans les andosols), la même macroporosité qui pose problème aux échanges respiratoires (microbes et racines).

Les mesures d'activités phosphatasiques

Les horizons identifiés sur le terrain ont été prélevés et analysés au laboratoire. Les valeurs mentionnées sont les moyennes de trois mesures pour chaque échantillon. Les résultats exprimés sur la figure 7 permettent de constater une diminution très nette des activités phosphatases lorsque l'on passe de la forêt témoin à la jachère, puis de manière encore plus nette à la monoculture du géranium. La mise en culture s'associe donc à une très forte baisse de l'activité microbienne tout particulièrement dans les couches de surface. Sous bois de couleur et jachère à acacia, elle diminue brutalement lorsque l'on passe de l'horizon A organique à l'horizon B. Par contre, il faut remarquer en profondeur une remontée au niveau de l'horizon Bbio, plus poreux et plus aéré.

La végétation sous acacia et lantana est luxuriante et laisse une épaisse litière avec une importante mésofaune. L'arrière effet de cette jachère se fait sentir longtemps car la parcelle en monoculture depuis 5 ans après jachère est la plus active de toutes celles en géranium, même en profondeur (voir figures 7 et 9). Après 25 ans de monoculture, les activités sont très faibles en surface comme en profondeur.

Conclusion

L'étude comparée des différents profils sous forêt en jachère et en culture de géranium met en évidence qu'une monoculture prolongée du géranium, avec fertilisation, sans apport de matière organique, entraîne une dégradation progressive des structures de la couche organique de surface, liée à la disparition de l'activité faunique, en particulier celle des vers de terre. D'autre part, la disparition des essences ligneuses à système racinaire profond entraîne la «fermeture» progressive du drainage profond, capable d'assurer l'aération indispensable à la vie microbienne. On comprend ainsi tout l'intérêt de l'ancien système de jachère avec l'*Acacia mearnsii*, légumineuse arborée capable d'augmenter la fixation d'azote, d'assurer une remontée du calcium, et également une aération des couches profondes.

La monoculture prolongée du géranium, sans recours à la jachère s'est donc traduite par une diminution drastique de l'activité faunique et racinaire entraînant une diminution de l'activité microbienne confirmée par les tests d'activités phosphatasiques. On comprend ainsi les causes de la baisse de fertilité de ces andosols.

Dans le chapitre suivant nous verrons comment l'installation de nouveaux systèmes de gestion avec couvertures permanentes a permis la reprise de l'activité faunique, racinaire et microbienne.

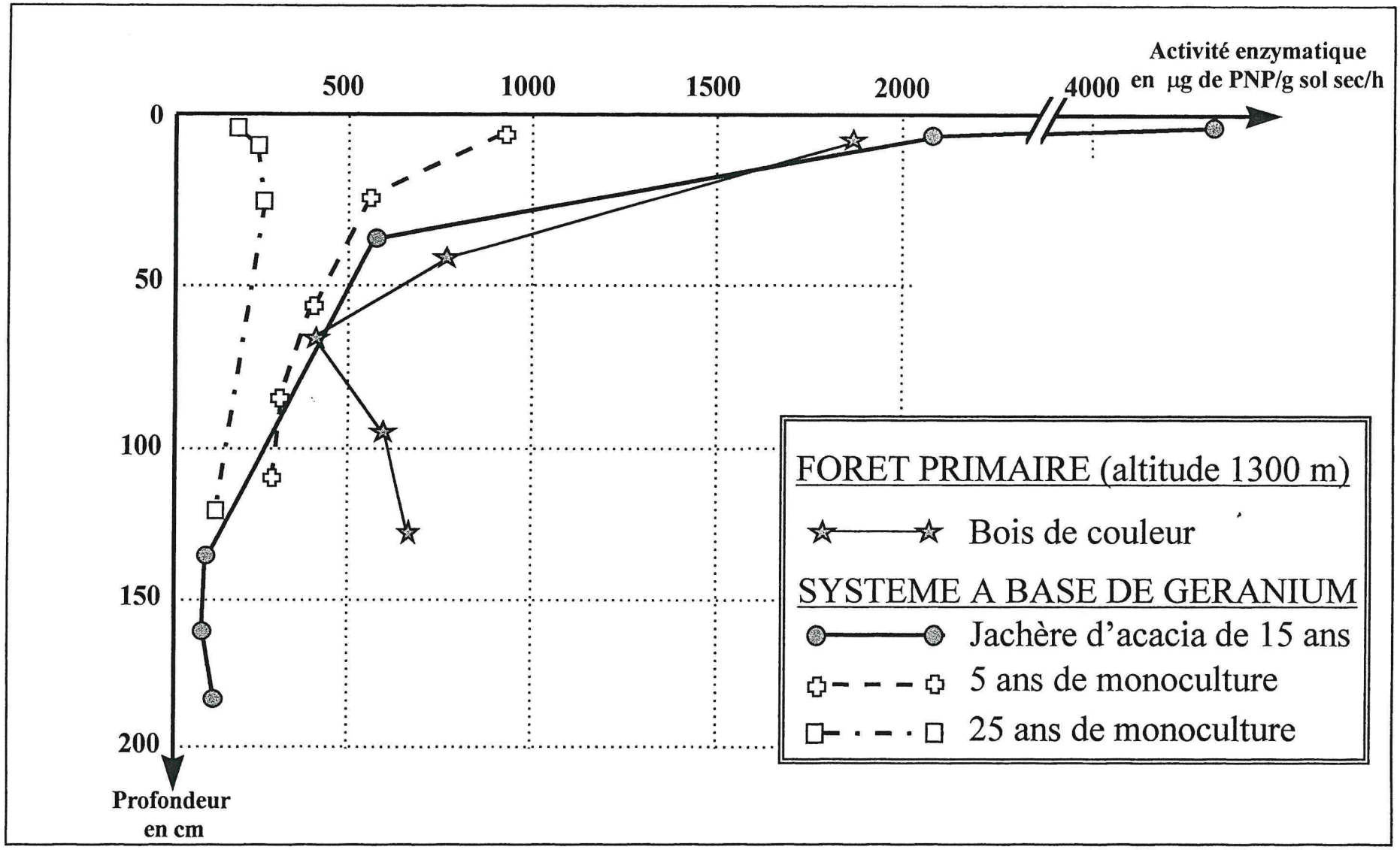


Figure 7 : Activité phosphatasique sous forêt primaire et son évolution comparée selon l'âge de la culture dans le système à base de géranium.

3.2. Comparaison des systèmes en monoculture et sous couverture permanente

3.2.1. Profils structuraux et activité faunique

Les systèmes de culture avec rotation et apport de fumier ainsi que l'installation de couvertures permanentes, associées à la culture du géranium ont manifestement apporté une amélioration de la structure dans les couches de surface, en comparaison avec les systèmes dégradés de monoculture. Cette amélioration est en relation directe avec l'activité des vers de terre, comme on peut le constater sur la figure 8A.

En monoculture (25 ans), dans l'horizon organique de surface très superficiel, à structure poudreuse, aucun ver de terre n'a été relevé.

Dans le système avec rotation et apport régulier de fumier, l'horizon A organique est épais, à structure fine (avec peu d'agrégats stables) dans les 5 premiers cm de profondeur. Malgré des apports de fumier (5 t/ha), la population des vers de terre est réduite à 4 individus/m². La limite entre l'horizon A et l'horizon B à structure continue est ondulée et brutale. Il est intéressant de noter que dans ces andosols, les vers de terre sont de type épigé et/ou épi-endogé (qui n'assurent pas le brassage entre les couches de surface et les horizons profonds comme ceux du type anécique). L'absence de vers de terre dans les couches de l'horizon B pourrait peut être signifier qu'il s'agit d'un milieu peu aéré et peu riche en matière organique.

Sous couverture de graminée (kikuyu), le sol paraît plus frais que dans le système précédent. Dès la surface, le sol est constitué par des agrégats stables soudés entre eux. Une partie de ces agrégats est fortement adhérente aux poils absorbants des racines de kikuyu. Cette très forte stabilité des agrégats est liée à l'importance de la population de vers de terre, puisque nous avons relevé une densité de 53 individus/m². C'est dans ce système de gestion que l'activité lombricienne, mais aussi du reste de la faune, est la plus intense : fourmis, micro-arthropodes et courtilières (dont les traces sont marquées dans l'horizon B par des galeries comblées par des microagrégats). Entre les agrégats constitués par les fécès de vers de terre, la structure grumeleuse est liée à l'adhésion des particules autour des racines de kikuyu très fournies en poils racinaires. L'épaisseur de l'horizon A de surface est de 30 cm, avec une limite horizontale progressive par suite de la pénétration des racines de kikuyu.

Sous couverture de légumineuse (lotier) l'activité biologique est également augmentée (avec une population de 7,3 vers de terre/m²) localisée dans les premiers cm du sol. L'activité des courtilières est bien marquée jusque vers 60 cm. La plus faible densité des vers de terre se traduit par une structure avec une proportion plus faible d'agrégats stables que dans le système kikuyu ; la matrice du sol apparaît aussi plus aéré par suite de la très forte quantité de racines. De très nombreux escargots sont présents dans les parties aériennes de géranium. Cette augmentation de la population des escargots pourrait être en relation avec la présence de légumineuses, plantes qui concentrent le calcium, alors que les graminées sont surtout des plantes à silice. Le carbonate de calcium stocké ainsi dans les coquilles d'escargots apporte une recharge en calcium dans la couche supérieure du sol particulièrement favorable à l'activité microbienne et à l'alimentation du géranium, exigeant en cet élément. Les résultats analytiques montrent que c'est effectivement dans ce système de culture que les teneurs en calcium échangeables sont les plus élevées (15 meq/100 g).

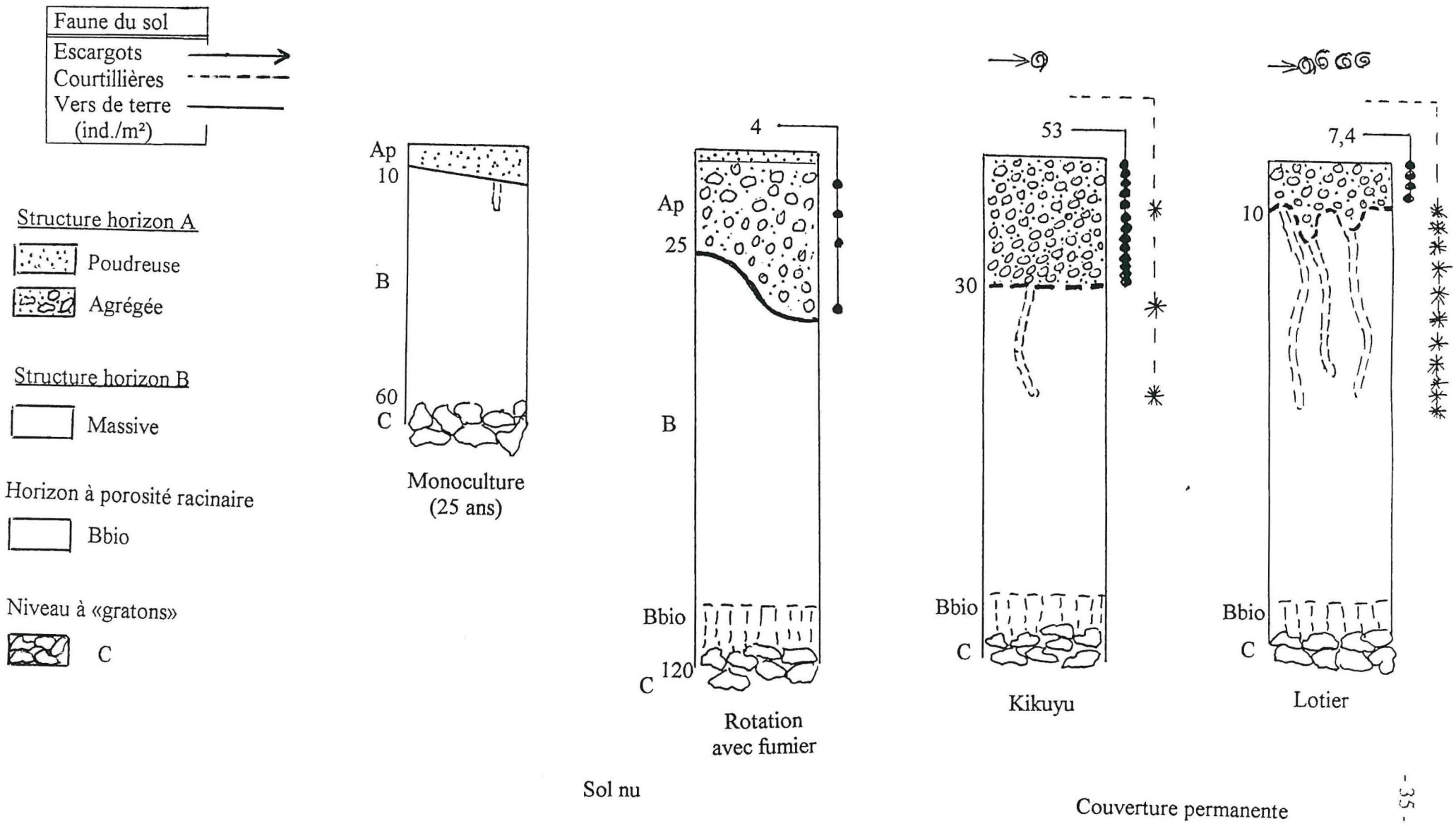


Figure 8A : Profils structuraux dans les différents systèmes de culture du géranium

La faible population de vers de terre, sous couverture de légumineuse s'explique par le fait que les légumineuses fournissent une litière plus riche en azote que celle des graminées, avec un rapport C/N plus bas. La transformation de la litière des légumineuses est aussi plus rapide que celles des graminées. Sous lotier, l'épaisseur de l'horizon A organique est réduite (10-15 cm). Mais comme dans le système avec couverture du kikuyu, la limite avec la couche sous-jacente est progressive, mais ondulée. Elle correspond à un brassage régulier par l'activité faunique et racinaire. Les traces d'activité des courtilières sont nombreuses au sein de l'horizon B à structure continue.

Dans les deux systèmes avec couverture, le niveau Bbio à porosité racinaire, au contact du niveau à «gratons» est présent, mais peu développé.

3.2.2. Profils racinaires

L'architecture des profils racinaires du géranium décrite sur les profils des différents systèmes de culture est représentée sur la figure 8B.

En monoculture (25 ans), on note l'existence d'un seul pivot tortueux, non ramifié, qui se développe avec un chevelu racinaire superficiel réduit. La tortuosité de ce pivot montre les difficultés d'enracinement dans l'horizon B, en l'absence de macroporosité biologique.

Dans le système en rotation avec apport de fumier, le développement des racines dans l'horizon A organique est plus important, avec établissement de 5/6 pivots non ramifiés dans l'horizon B. La macroporosité de l'horizon B étant faible, seuls les gros pivots à fort pouvoir de pénétration sont capables de se développer. Ces pivots assurent le transfert des éléments minéraux et de l'eau à partir des matériaux basaltiques. Le système racinaire du géranium présente ainsi deux niveaux de développement des racines : dans l'horizon organique de surface et dans le niveau profond à «gratons». Ce type d'enracinement profond permet à la plante d'assurer une alimentation hydrique et minérale continue. Cette alimentation hydrique profonde est capable par ailleurs de valoriser la fertilisation azotée des couches de surface, même en période de déficit hydrique (MAERTENS, 1974).

Dans le système avec couverture de kikuyu, le système racinaire du géranium apparaît en concurrence avec le système racinaire puissant du kikuyu. Ainsi, dans l'horizon A, on note un important développement de racines latérales de géranium qui explorent le sol dans la zone inter-rang. Malgré l'amélioration de la macroporosité par les racines de kikuyu, un seul pivot coudé vers 30 cm (à la base de l'horizon A) colonise l'horizon B. Ce pivot se ramifie au niveau de l'horizon Bbio et dans la substratum à «gratons». Comme dans le système de culture avec rotation, sous couverture de kikuyu, les niveaux préférentiels d'absorption racinaire du géranium sont superficiels et profonds. Toutefois le développement du système profond est ici plus réduit par le fait qu'il n'existe qu'un seul pivot. En surface, la forte compétition qui existe avec les racines de kikuyu impose au système racinaire de géranium le développement de racines latérales colonisant l'inter-rang, avec semble-t-il une plus faible émission de jeunes racines absorbantes. Les racines de kikuyu descendent dans l'horizon B jusqu'à 60-70 cm de profondeur.

Dans le système avec couverture de lotier, le système racinaire dense et traçant colonise activement les 5 premiers cm du sol. Les racines ont de nombreuses nodosités, mais leur pouvoir structurant est plus faible que celui des racines de kikuyu, elles n'adhèrent pas aux particules de sol. Ce système racinaire descend moins profondément que celui de kikuyu. Il est par contre, beaucoup plus dense dans l'horizon A et au sommet de l'horizon B sous-jacent,

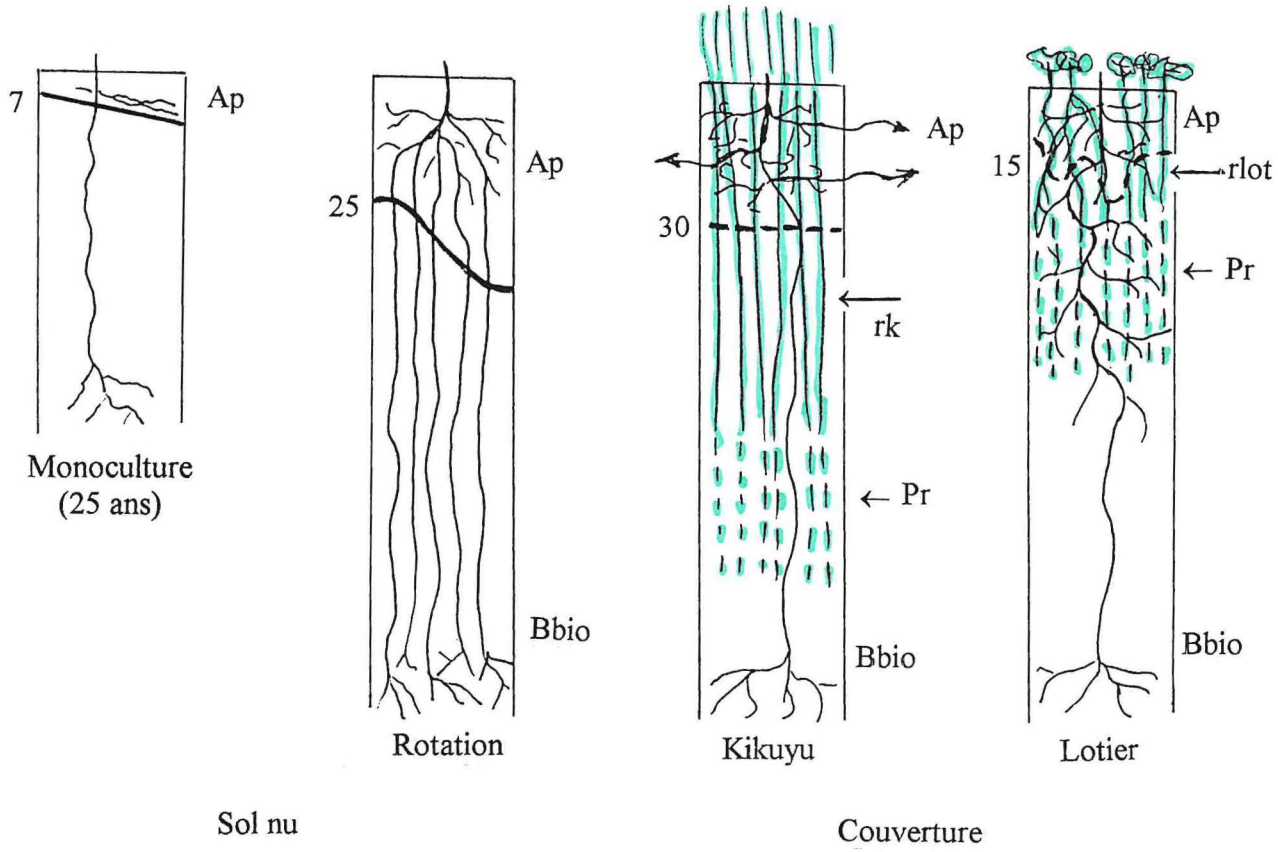


Figure 8B : Différence d'architecture du système racinaire de géranium dans les différents systèmes de culture

Pr : niveau à porosité racinaire

rk : racine de kikuyu

rlot : racine de lotier

dans lequel il développe une macroporosité importante. L'augmentation de cette macroporosité racinaire, entre 15-40 cm, se traduit sur le profil pédologique par une couleur plus rouge de la matrice (cf. tableau 5), révélatrice d'un milieu aéré.

L'implantation de cette légumineuse en couverture, s'est traduite :

- au niveau de l'horizon A, par une amélioration de la structure du sol, suite à l'augmentation de l'activité faunique (nécromasse racinaire et litière des feuilles),

- dans la partie supérieure de l'horizon B, par l'augmentation d'une macroporosité d'origine racinaire et de l'aération du milieu,

- d'une manière générale, par un enrichissement du milieu en azote.

Dans ce milieu, le système racinaire du géranium est mieux réparti sur l'ensemble du profil que par les modes de gestion du sol précédents. On constate la présence d'un pivot abondamment ramifié dans l'horizon A, mais aussi dans l'horizon B sous-jacent. Par ailleurs, il existe une plus forte proportion de racines fines, jeunes, actives, concentrées sous le rang. Le pivot se ramifie également au contact du niveau à «gratons» à 120 cm. Ainsi, ce système racinaire apparaît mieux équilibré autour du pivot central, donc susceptible d'être plus efficace sur le plan nutritionnel (CALLOT, 1984).

La comparaison de ces différents profils racinaires met en évidence que le géranium développe dans tous les cas un ou plusieurs pivots qui se ramifient à la base du sol, dans un milieu semble-t-il plus poreux et aéré. Toutefois les modifications structurales du milieu induites par l'activité des plantes de couverture et la faune du sol ont impliqué une adaptation du système racinaire du géranium aux différents modes de gestion du sol.

En monoculture, avec apport d'engrais seul, l'enracinement est réduit avec un seul pivot tortueux, avec quelques ramifications limitées à la base de la couche superficielle peu épaisse (5-7 cm).

En rotation, avec apport supplémentaire de compost, on note plusieurs pivots réitérés, avec nombreuses ramifications latérales dans la couche organique de surface (25-40 cm).

Avec couverture de lotier, le système racinaire du géranium, est abondamment développé autour d'un pivot dans l'horizon organique de surface, mais aussi dans la partie supérieure de l'horizon B, entre 10 et 60 cm. Par ailleurs, les racines fines et actives sont plus nombreuses que dans les systèmes précédents. Ce type d'architecture racinaire apparaît ainsi très fonctionnel et peut expliquer la meilleure productivité constatée avec ce mode de gestion du sol.

3.2.3. Activité microbiologique

Les activités microbiennes relevées dans les diférents systèmes de culture sont toutes inférieures à celles obtenues sous forêt et sous jachère. Dans ces situations, les valeurs étaient en surface supérieures à 1000 µg de paranitrophénol libérés par g de sol sec et par heure (µg de PNP/g sol sec/h), alors qu'en monoculture elles sont de l'ordre de 200 µg. Les couvertures de kikuyu et de lotier ont un effet favorable sur l'activité microbienne dans les couches de surface, puisque les activités remontent à 400-500 µg de PNP/g sol sec/h. (figure 9). Toutefois, en profondeur, les valeurs sont comparables. Un dispositif statistique

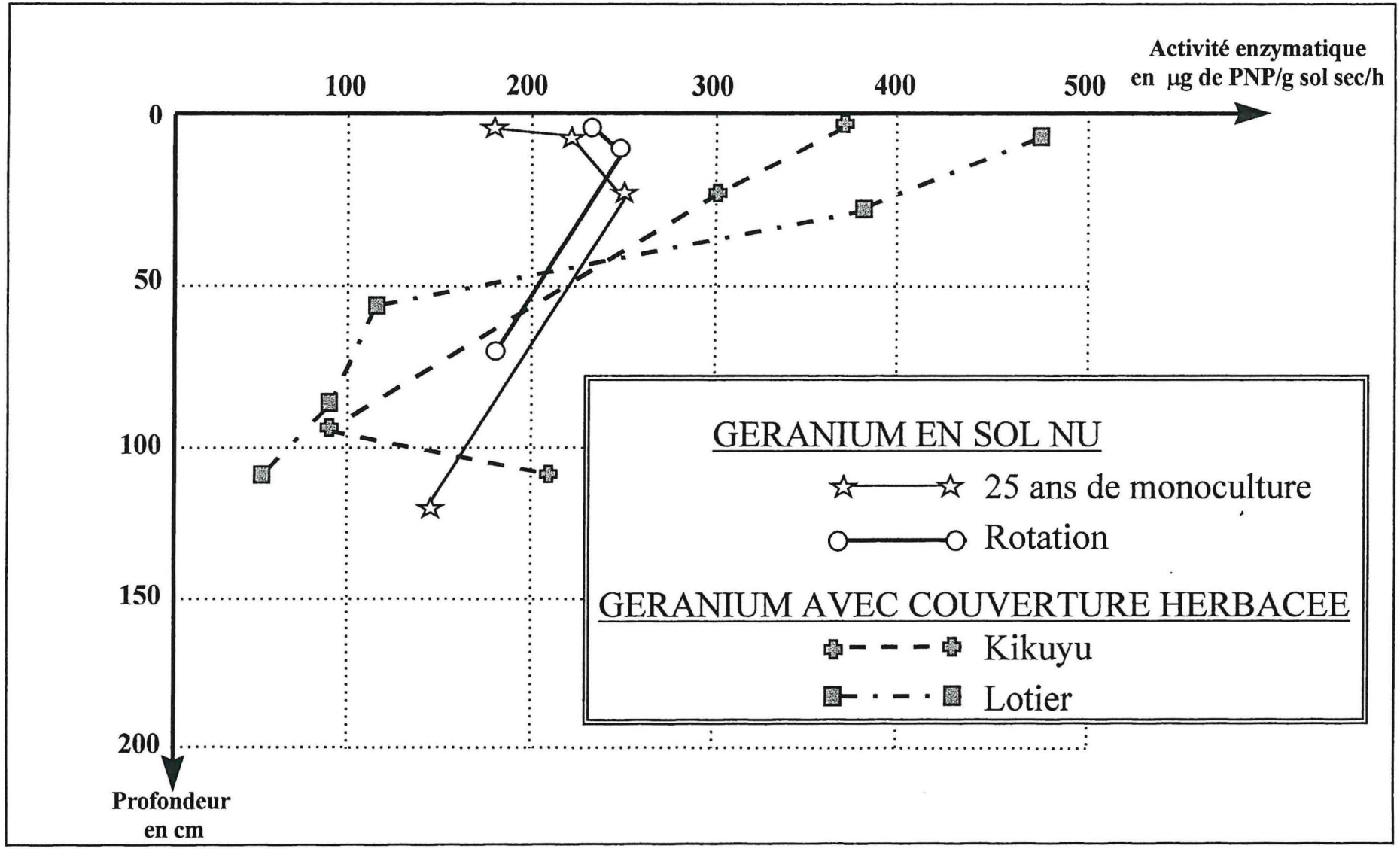


Figure 9 : Activité phosphatasique en fonction de la gestion du sol cultivé en géranium.

permettrait peut-être de mettre en évidence des différences. Il n'existe pas de différence d'activité entre la parcelle en monoculture depuis 25 ans et la parcelle en rotation avec apport de fumier. Ce qui semble signifier que le turn-over de la matière organique est très lent dans ces sols. Dans les deux cas effectivement,.le rapport C/N est de l'ordre de 13. L'augmentation de l'activité microbienne sous couverture est bien en relation avec l'augmentation de l'activité racinaire et faunique observée au niveau de profils.

IV- EFFETS DES COUVERTURES PERMANENTES SUR LA POROSITE DES ANDOSOLS CULTIVES

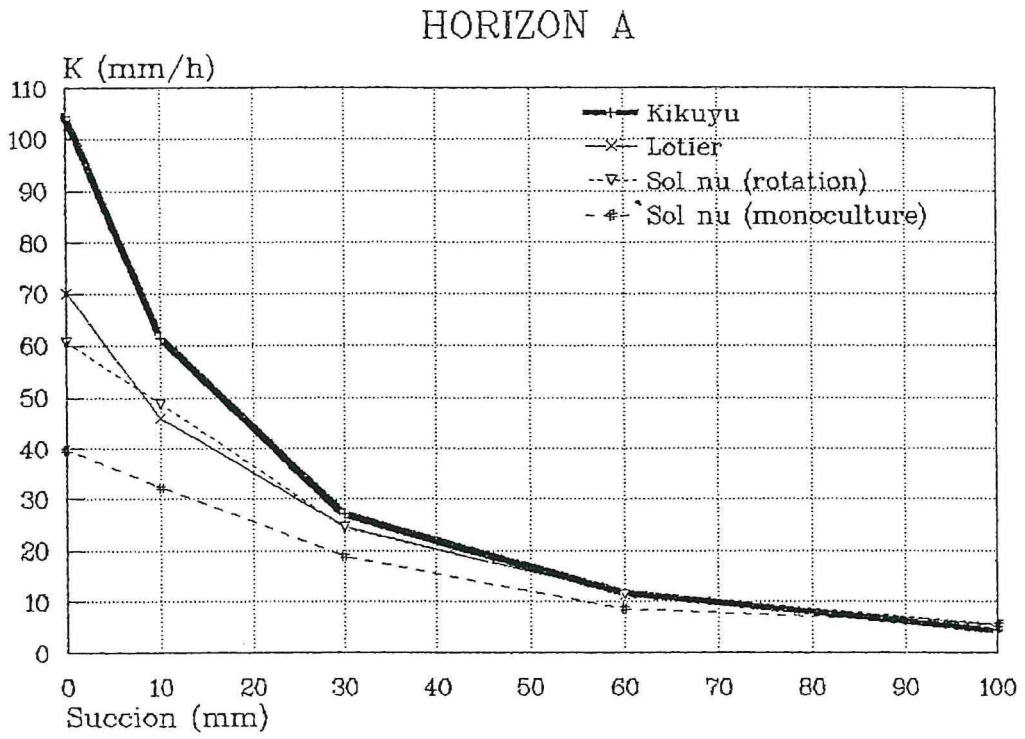
Des études antérieures réalisées par GUILLUY et PERRET (1991) ont montré que la présence de couvertures de kikuyu et de lotier installées sur des andosols désaturés perhydratés avait amélioré la conductivité hydraulique des couches de surface, corrélativement à une augmentation de la porosité.

Dans les andosols désaturés, non perhydratés, comparables à ceux de notre site d'étude, une couverture permanente de *Desmodium* (légumineuse) avait entraîné au contraire un diminution de la conductivité hydraulique comparativement au sol nu, suite semble-t-il à un colmatage des pores par la matière organique. Il était donc important de voir si dans notre situation sur andosol désaturé, les couvertures permanentes de kikuyu et de lotier augmentaient la conductivité hydraulique.

4.1. Variations de la conductivité hydraulique à saturation et de la macroporosité

Les mesures de macroporosité et de conductivité hydraulique à différentes succions ont été réalisées avec un infiltromètre à succion contrôlée. Le dispositif expérimental a été conçu par PERROUX et WHITE (1988) et mis au point par le groupe d'Hydrologie de l'Institut de Mécanique de Grenoble (THOMY, 1990). Il permet de réaliser *in situ* des essais d'infiltration sous charge négative. Des mesures d'humidité pondérale sous l'infiltromètre et de densité apparente au voisinage de l'appareil ont été effectuées. Ces mesures permettent d'évaluer différents paramètres tels que l'indice des vides (Iv) et d'eau (Iw), le degré de saturation des vides (Sat %) et la répartition du système poral, cinq répétitions sont faites à saturation et trois répétitions pour les autres succions.

Les variations de conductivité hydraulique constatées dans les différents systèmes de gestion mettent en évidence une augmentation très nette de la conductivité hydraulique dans les systèmes de couverture, aussi bien dans l'horizon A organique que dans l'horizon B sous-jacent (figure 10). Dans les systèmes avec couverture (kikuyu et lotier) la conductivité de l'horizon A présente une diminution rapide lorsque la succion augmente, ce qui exprime une participation très forte des pores les plus gros à la circulation de l'eau. Dans l'horizon B, les variations de la conductivité sont plus faibles, ce qui traduit une macroporosité plus faible et une répartition plus homogène des pores. Les deux sites en sol nu ont un comportement identique, ce qui signifie que le système de rotation avec apport de fumier n'a pas modifié la structure de l'horizon B, bien que nous ayons constaté une différence de profils racinaires du géranium (1 seul pivot en monoculture, 5-6 pivots en système avec rotation). Ces pivots sont des racines ligneuses épaisses, continuellement en croissance radiale. Elles auront tendance à compacter le milieu plutôt que de créer une porosité (CALLOT and GUYON, 1988).



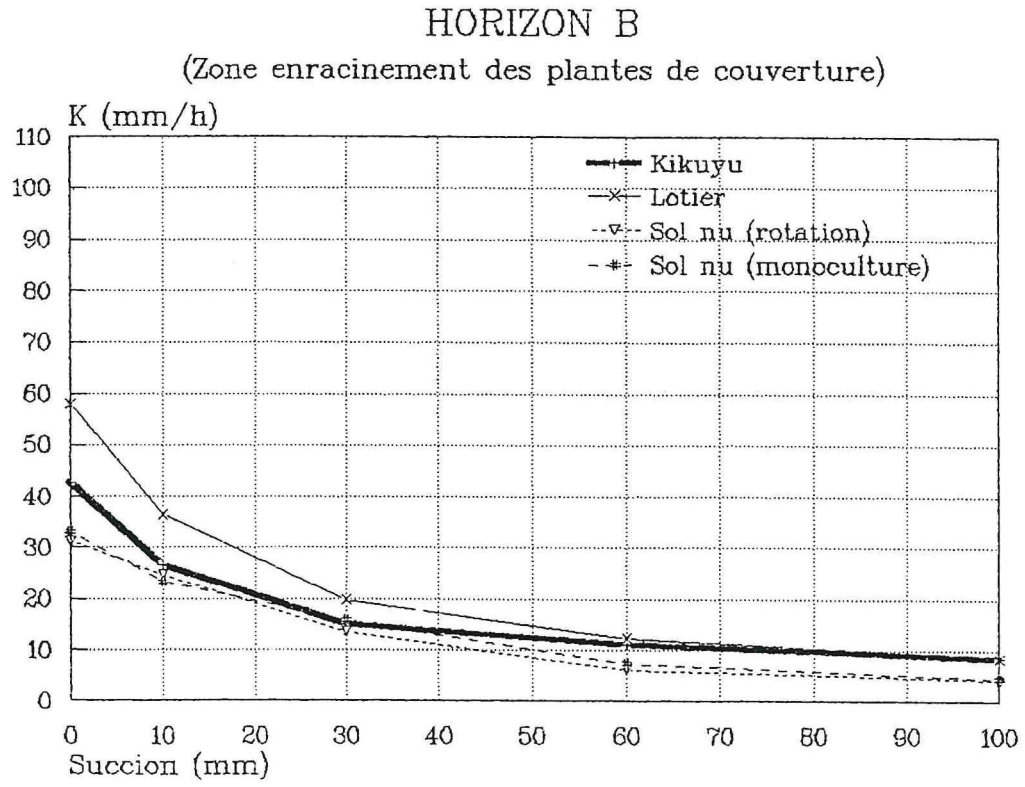


Figure 10 : Conductivité hydraulique en fonction de la succion

Dans l'horizon A, la conductivité la plus élevée est obtenue avec la couverture de kikuyu, alors que dans l'horizon B, c'est le lotier qui assure la conductivité la plus élevée. La différence de conductivité entre les deux horizons renseigne sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. L'infiltration sera d'autant plus rapide que la couche de surface sera conductible, et surtout que la différence avec la couche sous-jacent sera faible. On constate ainsi sur la figure 11 que la différence de conductivité entre les horizons A et B est plus faible dans le cas du lotier. Ce système est donc plus drainant que le système kikuyu. Il faut préciser que les mesures sont réalisées avec l'infiltromètre posé sur le sol dénudé de sa couverture : à l'effet positif des couvertures sur la conductivité, il faut ajouter l'effet «écran» de la couverture lors des pluies intenses. En conditions naturelles, les couvertures doivent donc avoir un effet positif encore plus marqué que celui démontré par ces mesures d'infiltrométrie (GOUBAND, 1992). Les observations de terrain faites en avril 1993 ont effectivement confirmé ces résultats, les profils sous lotier sont apparus mieux ressuillés que sous kikuyu.

Variations de la macroporosité

De nombreux auteurs ont montré que les valeurs de conductivité hydraulique était en relation directe avec la porosité et en particulier avec la macroporosité supérieure à 0,1 m (GUENNELON et COCKBORNE, 1975). Cependant, une différence de conductivité à saturation ne pouvait être quantifiée en terme d'aspect poral. Cet inconvénient peut être surmonté grâce à l'infiltrométrie (PERROUX and WHITE, 1988). En appliquant différentes tensions d'eau au sol, on peut séparer la contribution des différentes gammes de pores à la conductivité hydraulique. Les résultats globaux présentés dans le tableau 6 confirment, comme dans tous les andosols désaturés de l'île de la Réunion que la porosité totale du sol est plus importante dans les horizon B que dans les horizons A de surface, en relation avec des densités apparentes plus faibles en B. Toutefois, comme on peut le constater, plus de 80 % de cette porosité est constituée par des pores de diamètre inférieur à 0,3 microns, pores retenant de l'eau et de l'air inutilisable par les plantes et microorganismes.

S'il n'existe pas de fortes variations de porosité dans l'horizon A pour les quatre modes de gestion du sol, la différence est plus nette au niveau de l'horizon B où la porosité construite par l'activité racinaire des plantes de couverture permet de l'expliquer. Le spectre poral, défini par des succions variant entre la saturation et des succions à 100 mm, ne concerne en fait que les pores de diamètre à 300 µm. Dans les andosols cette macroporosité est essentiellement d'origine biologique. Dans l'horizon A organique, les variations de la macroporosité représentées sur la figure 12, montrent que cette macroporosité (surtout pour les pores de diamètre supérieur à 3 mm) est en relation directe avec l'activité faunique et en particulier celle des vers de terre, puisque la plus forte macroporosité est obtenue dans le cas de kikuyu avec une densité de 53 individus au m². L'augmentation de la macroporosité du sol sous l'action des vers de terre a d'ailleurs été maintes fois soulignée (BOUCHE, 1980 ; LAVELLE, 1988 ; WHITE, 1988 ; KEITH, 1992).

Dans l'horizon B, l'activité faunique est réduite et la différence de macroporosité (pores supérieurs à 3 mm) résulte essentiellement de la porosité racinaire, qui est plus élevée dans le cas du lotier. Dans le cas du kikuyu, la colonisation de l'horizon B par les racines pivotantes du kikuyu est importante. Toutefois, ces racines lignifiées résistantes (à la biodégradation) ont une action compactante comme nous l'avons déjà souligné précédemment. Les racines de lotier sont plus rapidement biodégradées et participent plus activement à la création de la porosité racinaire. Dans l'horizon B (figure 12), les pores de diamètre supérieur à 1 mm sont effectivement plus nombreux sous lotier que sous kikuyu. Les

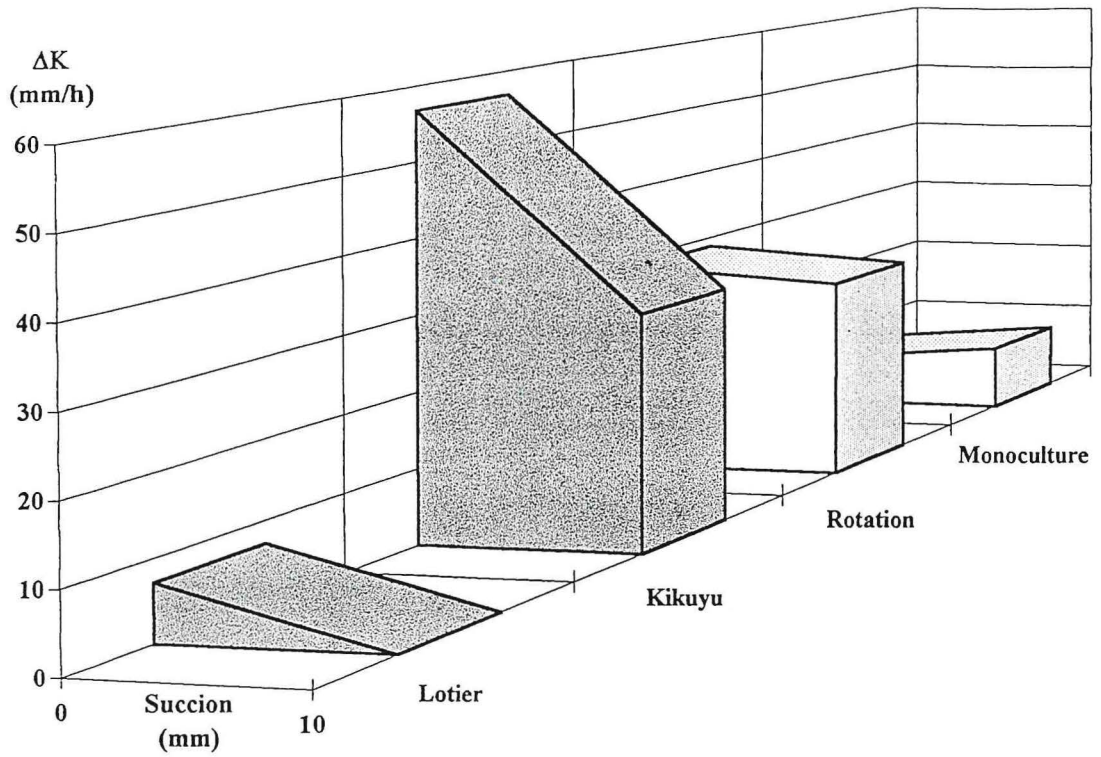


Figure 11 : Différence de conductivité hydraulique entre les horizons A et B (à 0 et 10 mm de succion)

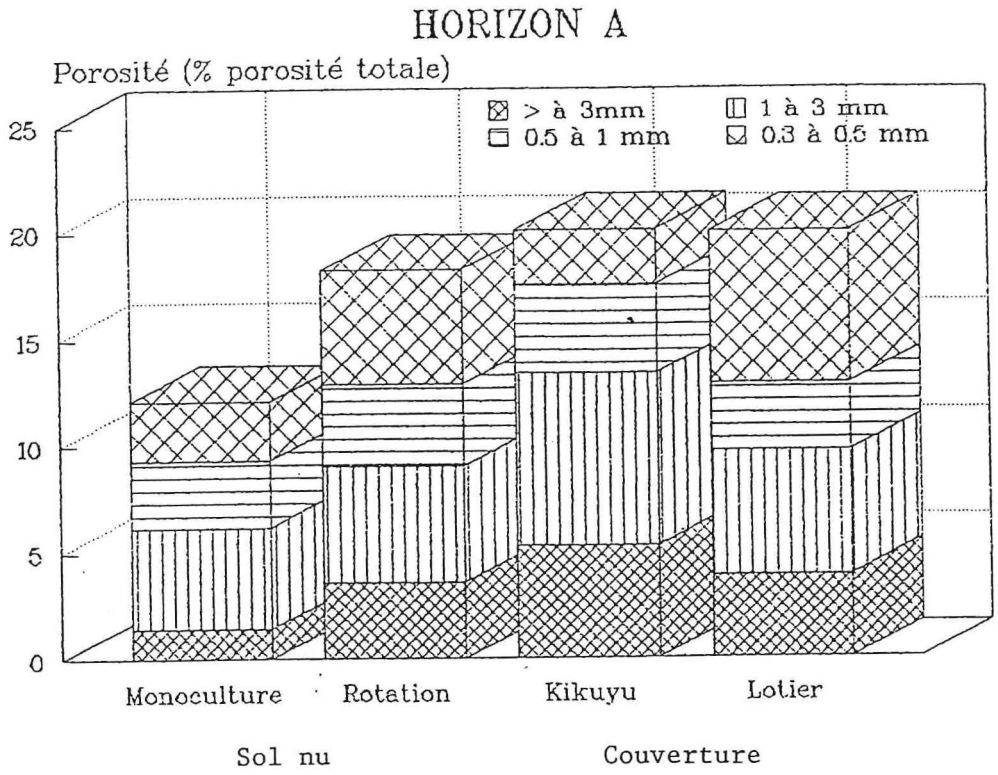
	Succion (mm)	W (%)	D. app.	Hv (%)	Iv	Iw	Sat %	Porosité (%)	Gamme de pores (mm)	% volumique de porosité
Parcelle 19 - Sol nu (Monoculture)	0	107,4	0,69	74,1	2,91	2,90	99,7	72,8	> 3	1,4
	10	105,9	0,69	73,0	2,91	2,86	98,1	72,8	1 à 3	4,8
	30	100,7	0,69	69,4	2,91	2,72	92,9	72,8	0,5 à 1	3,1
	60	97,4	0,69	67,2	2,91	2,63	89,5	72,8	0,3 à 0,5	2,8
	100	94,4	0,69	65,1	2,91	2,55	86,5	72,8	0 à 0,3	87,9
Parcelle 16 - Sol nu (Rotation)	0	112,0	0,65	72,8	3,13	3,01	96,2	75,8	> 3	3,6
	10	107,9	0,65	70,2	3,13	2,90	92,6	75,8	1 à 3	5,4
	30	102,2	0,65	66,3	3,13	2,74	87,5	75,8	0,5 à 1	3,9
	60	97,5	0,65	63,4	3,13	2,62	83,7	75,8	0,3 à 0,5	5,3
	100	91,5	0,65	59,5	3,13	2,46	78,6	75,8	0 à 0,3	81,8
Parcelle 2 - Kikuyu	0	118,8	0,63	74,0	3,29	3,20	97,2	76,7	> 3	5,3
	10	112,2	0,63	70,5	3,29	3,03	92,1	76,7	1 à 3	8,1
	30	102,5	0,63	64,2	3,29	2,77	84,2	76,7	0,5 à 1	4,1
	60	97,8	0,63	61,6	3,29	2,64	80,2	76,7	0,3 à 0,5	2,6
	100	94,8	0,63	59,7	3,29	2,56	77,8	76,7	0 à 0,3	79,3
Parcelle 1 - Lotier	0	114,4	0,64	73,2	3,19	3,08	96,5	76,1	> 3	3,9
	10	109,8	0,64	70,2	3,19	2,96	92,8	76,1	1 à 3	5,8
	30	103,3	0,64	66,1	3,19	2,78	87,1	76,1	0,5 à 1	3,2
	60	99,5	0,64	63,7	3,19	2,68	84,0	76,1	0,3 à 0,5	7,1
	100	90,7	0,64	58,0	3,19	2,44	76,5	76,1	0 à 0,3	80,0

Horizon A

	Succion (mm)	W (%)	D. app.	Hv (%)	Iv	Iw	Sat %	Porosité (%)	Gamme de pores (mm)	% volumique de porosité
Parcelle 19 - Sol nu (Monoculture)	0	130,4	0,56	72,8	3,82	3,51	91,5	79,2	> 3	3,1
	10	125,9	0,56	70,5	3,82	3,40	89,2	79,2	1 à 3	3,8
	30	121,7	0,56	67,6	3,82	3,26	85,3	79,2	0,5 à 1	2,8
	60	117,4	0,56	65,5	3,82	3,16	82,7	79,2	0,3 à 0,5	3,1
	100	113,4	0,56	63,2	3,82	3,05	79,8	79,2	0 à 0,3	87,2
Parcelle 16 - Sol nu (Rotation)	0	132,1	0,55	72,6	3,78	3,47	91,8	79,1	> 3	2,9
	10	128,2	0,55	70,5	3,78	3,37	89,1	79,1	1 à 3	4,1
	30	122,9	0,55	67,6	3,78	3,23	85,4	79,1	0,5 à 1	2,6
	60	121,1	0,55	66,6	3,78	3,14	83,1	79,1	0,3 à 0,5	2,9
	100	115,6	0,55	63,6	3,78	3,04	80,4	79,1	0 à 0,3	87,5
Parcelle 2 - Kikuyu	0	155,2	0,50	77,6	4,36	4,18	96,9	81,6	> 3	3,1
	10	151,1	0,50	75,5	4,36	4,05	93,0	81,6	1 à 3	3,9
	30	145,7	0,52	72,8	4,36	3,89	89,4	81,6	0,5 à 1	5,4
	60	137,2	0,50	68,6	4,36	3,67	84,5	81,6	0,3 à 0,5	2,9
	100	133,1	0,50	66,5	4,36	3,55	81,8	81,6	0 à 0,3	84,7
Parcelle 1 - Lotier	0	167,3	0,46	76,9	4,87	4,51	93,8	85,4	> 3	5,9
	10	157,1	0,46	72,3	4,87	4,24	87,2	85,4	1 à 3	4,6
	30	149,3	0,46	68,7	4,87	4,03	83,6	85,4	0,5 à 1	4,2
	60	142,3	0,46	65,4	4,87	3,84	79,4	85,4	0,3 à 0,5	5,9
	100	132,5	0,46	60,9	4,87	3,57	73,8	85,4	0 à 0,3	79,4

Horizon B

Tableau 6 : Etude de la macroporosité par infiltrométrie



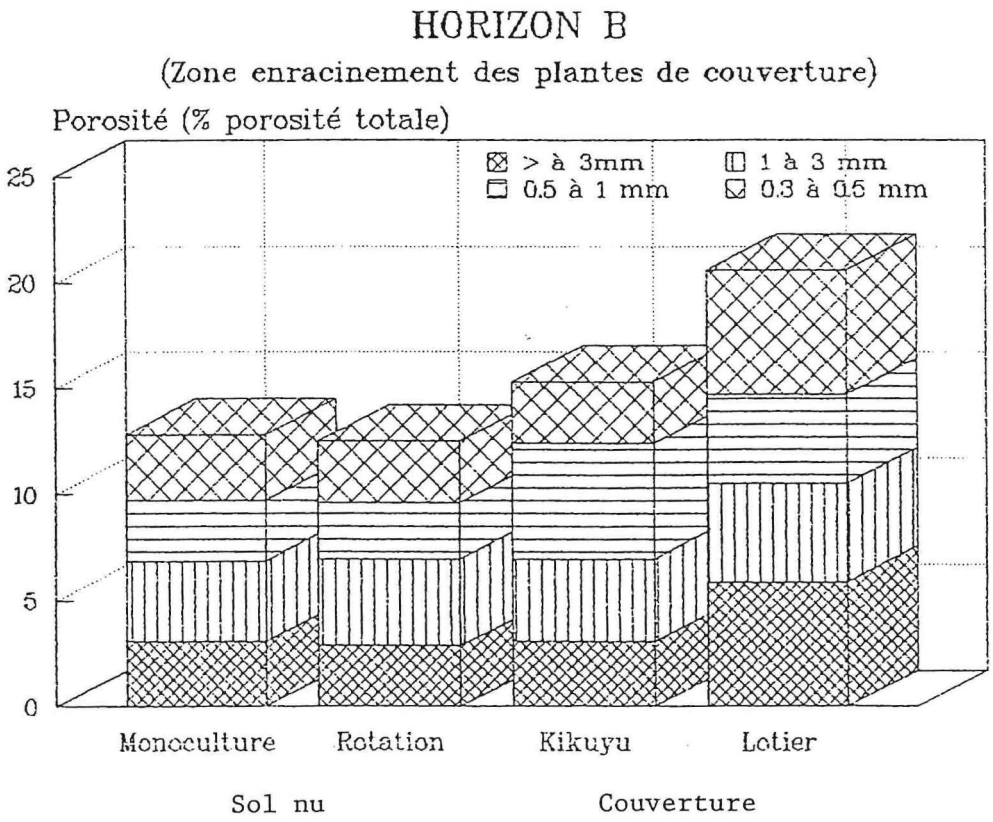


Figure 12 : Spectre de la macroporosité

observations faites *in situ* à la loupe binoculaire et au laboratoire par l'étude des lames minces de sol ont confirmé que cette porosité était créée par les racines de lotier.

4.2. Evolution des teneurs en eau et espace poral

Nous avons vu précédemment que l'effet des couvertures se traduisait par une augmentation de la porosité racinaire et faunique de la conductivité hydraulique, donc de l'infiltration de l'eau et aussi de l'aération du milieu. Il est également important d'évaluer l'effet ces couvertures sur la capacité de rétention en eau, liée directement à la porosité du sol comprise entre 0,3 et 3 microns.

Mesure des teneurs en eau et porosité

Nous avons complété les mesures de terrain, faites par infiltrométrie avec des faibles succions, par des mesures de laboratoire pour des succions élevées à l'aide de presse à plaque. Les mesures ont été faites sur échantillons remaniés. Trois répétitions sont effectuées pour chaque horizon. Après avoir mesuré le poids sec et le poids d'eau de chaque échantillon, les calculs sont effectués comme pour l'infiltrométrie. Les données ont été regroupées dans le tableau 7 ci-après.

Comme il est délicat de mettre en relation des résultats obtenus par des méthodes dont le principe de base est différent (remplissage des vides avec l'infiltrométrie et vidange des pores avec les pressions pneumatiques), nous avons décidé de vérifier si la variabilité des mesures n'était pas trop élevée. Pour cela, nous avons comparé les relations teneur en eau (W %) et potentiel de l'eau pour deux parcelles, en sol nu et avec couverture. La continuité des courbes d'humidité pondérale en fonction du potentiel de l'eau montre une bonne concordance des résultats obtenus avec les deux méthodes. Le fait de travailler sur échantillons remaniés impose de considérer que l'indice des vides reste constant jusqu'à pF 4. Nous pouvons estimer que le système se comporte comme un matériau sableux rigide non déformable et que tout départ d'eau est compensé par une entrée d'air. D'après PERRET (1993), cette approximation est valable pour l'horizon A, mais un coefficient correcteur est nécessaire pour l'horizon B à pF 4. Pour l'horizon B et à pF 4, nous avons donc décidé d'appliquer le coefficient correcteur de 0,9 à l'indice des vides.

Les pores compris entre 30 µm et 300 µm concernent une partie de la microporosité inter-microagrégats décrites par ROSELLO (1984) et de la macroporosité biologique. Les pores compris entre 0,3 et 30 µm, déterminés entre pF 2 (capacité de rétention en eau) et pF 4 (point de flétrissement sur les andosols), correspondent à la réserve en eau utilisable par la plante. Dans les pores inférieurs à 0,3 µm, l'eau est fortement retenue et non utilisable par la plante.

Les résultats obtenus par presse à plaque (tableau 7) sont bien en accord avec ceux obtenus par infiltrométrie (tableau 6) et confirment que l'indice des vides de l'horizon B est supérieur à celui de l'horizon A.

Les spectres de porosité exprimés sur la figure 13 (classes de pores inférieures à 300 µm) ne montrent aucune différence significative dans l'horizon B colonisé par les racines. Par contre dans l'horizon A sous couverture, on constate une augmentation très nette du pourcentage de la classe des pores compris entre 0,3 et 300 µm. La différence de répartition entre la classe de pores (0,3 µm-30 µm) et (30 µm-300 µm) dans les deux systèmes de couverture pourrait s'expliquer par une différence faunique. Dans le système de gestion avec kikuyu le pourcentage d'agrégats stables de fécès de vers est beaucoup plus élevé dans la

	pF	W (%)	D. app.	Hv (%)	Iv	Iw	Ia	Sat %	Porosité (%)	Gamme de pores (µm)	% volumique de porosité
Parcelle 19 - Sol nu (Monoculture)	1	93,1	0,69	64,1	2,93	2,51	0,42	86,5	75,2	30 à 300	15,1
	2	77,3	0,69	53,3	2,92	2,08	0,84	71,3	75,2	3 à 30	2,8
	3	74,2	0,69	51,2	2,90	1,99	0,89	69,1	75,2	0,3 à 3	3,1
	4	70,4	0,69	48,3	2,94	1,89	1,05	64,3	75,2	0 à 0,3	66,2
Parcelle 16 - Sol nu (Rotation)	1	95,1	0,65	61,7	3,15	2,57	0,58	81,8	76,1	30 à 300	15,9
	2	77,9	0,65	50,6	3,10	2,09	1,01	67,4	76,1	3 à 30	6,6
	3	71,1	0,65	46,4	3,17	1,92	1,25	61,1	76,1	0,3 à 3	5,9
	4	65,6	0,65	42,4	3,16	1,75	1,41	55,4	76,1	0 à 0,3	54,5
Parcelle 2 - Kikuyu	1	96,2	0,63	62,4	3,33	2,59	0,74	77,9	76,9	30 à 300	19,1
	2	73,7	0,63	46,4	3,30	1,98	1,32	60,4	76,9	3 à 30	9,4
	3	63,2	0,63	39,8	3,23	1,69	1,54	52,5	76,9	0,3 à 3	7,9
	4	54,3	0,63	34,2	3,26	1,45	1,81	44,2	76,9	0 à 0,3	42,7
Parcelle 1 - Lotier	1	92,3	0,64	58,7	3,22	2,48	0,74	76,8	76,4	30 à 300	12,9
	2	77,3	0,64	49,5	3,22	2,07	1,15	64,6	76,4	3 à 30	12,2
	3	63,2	0,64	40,5	3,15	1,71	1,45	54,3	76,4	0,3 à 3	8,9
	4	53,6	0,64	34,2	3,18	1,42	1,76	45,1	76,4	0 à 0,3	46,4

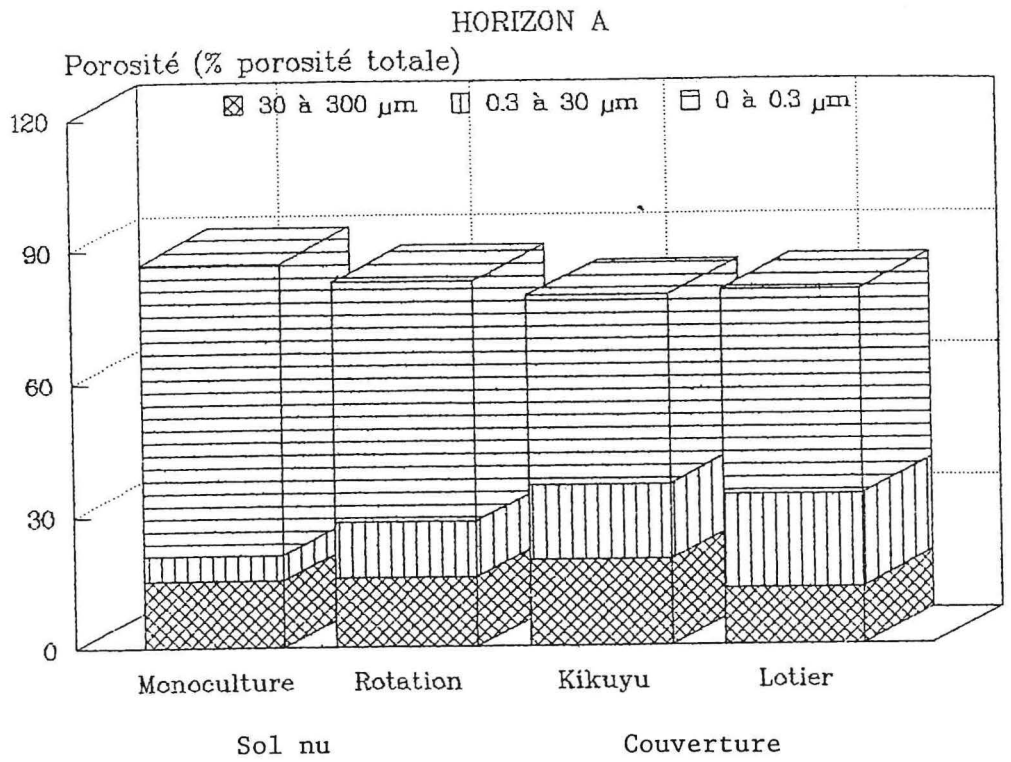
Horizon A

	pF	W (%)	D. app.	Hv (%)	Iv	Iw	Ia	Sat %	Porosité (%)	Gamme de pores (µm)	% volumique de porosité
Parcelle 19 - Sol nu (Monoculture)	1	113,4	0,56	63,2	3,80	3,05	0,49	87,5	79,2	30 à 300	2,9
	2	110,7	0,56	62,0	3,80	2,97	0,82	78,3	79,2	3 à 30	9,8
	3	99,4	0,56	55,7	3,80	2,67	1,10	69,7	79,2	0,3 à 3	13,1
	4	82,4	0,61	50,2	3,42	2,21	1,21	65,4	77,1	0 à 0,3	62,2
Parcelle 16 - Sol nu (Rotation)	1	115,1	0,55	63,6	3,86	3,11	0,75	81,8	80,1	30 à 300	6,4
	2	108,9	0,55	59,9	3,86	2,92	0,95	74,4	80,1	3 à 30	8,6
	3	98,1	0,55	54,0	3,86	2,65	1,16	68,1	80,1	0,3 à 3	9,9
	4	85,6	0,59	50,8	3,47	2,30	1,17	66,4	78,1	0 à 0,3	62,5
Parcelle 2 - Kikuyu	1	133,2	0,50	66,5	4,41	3,59	0,82	81,9	81,6	30 à 300	3,1
	2	128,7	0,50	64,0	4,41	3,46	0,95	78,4	81,6	3 à 30	16,4
	3	104,2	0,50	52,1	4,41	2,81	1,59	64,5	81,6	0,3 à 3	7,9
	4	91,1	0,55	50,5	3,97	2,46	1,51	61,8	80,0	0 à 0,3	65,3
Parcelle 1 - Lotier	1	132,3	0,46	60,9	4,86	3,57	1,29	73,8	83,4	30 à 300	2,9
	2	129,3	0,46	59,3	4,86	3,48	1,38	71,6	83,4	3 à 30	18,2
	3	99,3	0,46	45,5	4,86	2,67	2,19	56,4	83,4	0,3 à 3	8,9
	4	84,5	0,50	41,9	4,37	2,27	2,10	52,8	81,1	0 à 0,3	50,4

Horizon B

* Pour pF1, nous avons utilisé les valeurs obtenues avec l'infiltrométrie.
** Pour pF4, le coefficient correcteur 0,9 a été appliqué.

Tableau 7 : Etude du spectre poral par pression pneumatique



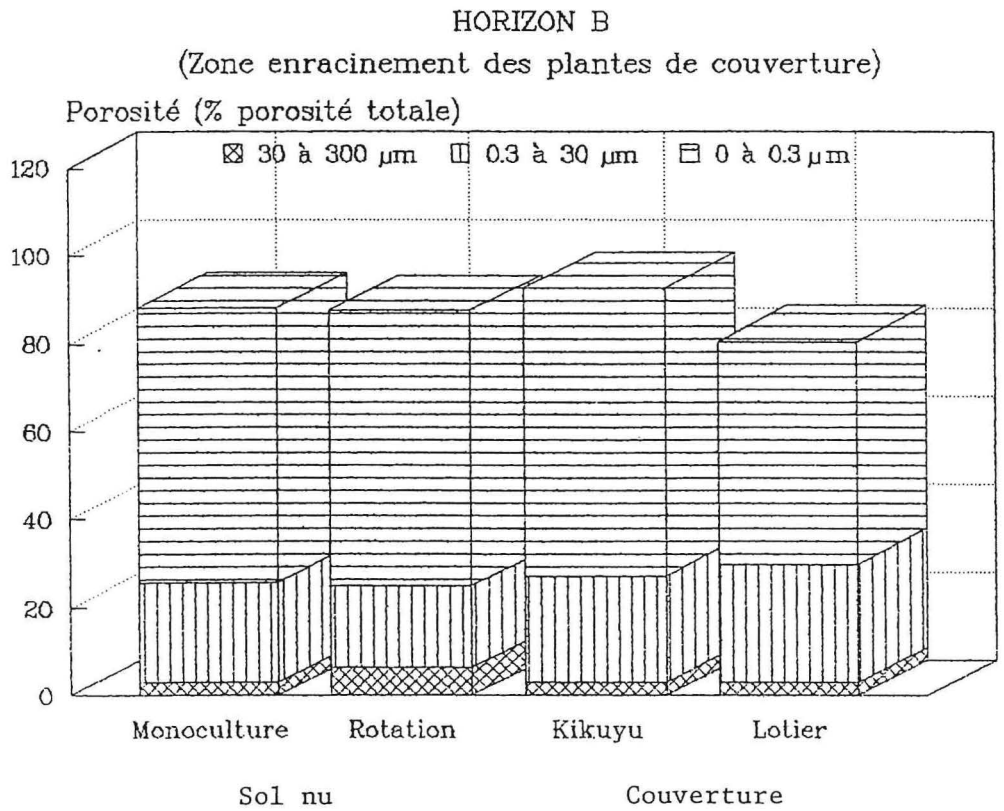


Figure 13 : Spectre poral et porosité utile

matrice du sol que sous lotier. Ce type d'arrangement favorise la proportion de pores supérieurs à 30 µm. Sous lotier, la matrice du sol contient proportionnellement plus de boulettes fécales de microanthropodes (diamètre 30 à 50 microns) contribuant à augmenter la classe de porosité 0,3-30 µm, et ainsi la réserve en eau utile sera aussi plus élevée.

CONCLUSIONS

L'analyse du fonctionnement biologique et hydraudynamique de ces différents systèmes de gestion de la culture de géranium met bien en évidence toutes les modifications des propriétés physiques et microbiologiques du sol induites par l'effet couverture. Ces différences de propriétés sont liées à l'activité racinaire des plantes de couverture et à l'action de la faune du sol. Elles modifient profondément l'architecture du système racinaire du géranium et par la même, les conditions de l'alimentation minérale et certainement hydrique de la plante. Le modèle présenté sur la figure 14 situe les niveaux d'absorption préférentiels des racines de géranium qui ont pu être mis en évidence à partir d'une analyse *in situ*, confirmée par différents tests d'activités microbiennes. Ce modèle constitue un élément explicatif des différences spectaculaires de rendements obtenus dans les divers systèmes de gestion, et aussi les modifications de qualité des huiles essentielles.

De nombreux travaux effectués aux Etats-Unis ont montré que la gestion des sols avec couverture végétale entraîne une amélioration notable des caractéristiques chimiques des sols avec augmentation des teneurs en azote, meilleur recyclage des éléments nutritifs et maintien d'un taux plus élevé de matière organique (DORAN, 1980 ; HARGROVE, 1982 ; DICK, 1983 ; LAL, 1989). Des conclusions identiques ont été obtenues au Brésil (PAVAN, 1985) en soulignant en particulier une augmentation du pH sur tout le profil (0-60 cm) en culture avec couverture par rapport au sol nu. D'ailleurs, les techniques du semis direct sur sol continuellement couvert, avec introduction de vers de terre ont permis d'améliorer progressivement la fertilité des latosols du Parana (Brésil) dégradés par la monoculture du café, puis du soja (PAVAN, 1985). Dans toutes les études précitées, la réactivation biologique du sol semble être le « moteur » qui permet de mieux réguler la fertilité en améliorant considérablement les pertes d'éléments nutritifs par lessivage et la structure (LAL, 1989 ; LAVELLE, 1992).

Dans l'exemple présenté, nous avons pu montrer que la culture du géranium en association avec une couverture permanente, augmente l'activité faunique du milieu et l'activité microbiologique. Les plantes de couverture améliorent aussi la stabilité de la structure des couches de surface du sol et favorisent l'infiltration de l'eau, supprimant pratiquement les phénomènes d'érosion.

Sur le plan agronomique, les espèces végétales retenues en couverture, peuvent avoir des effets de compétition racinaire ou de synergie. Dans l'exemple analysé, le lotier, légumineuse rampante, apparaît la mieux adaptée.

Nous remerçions P. LAVELLE pour les déterminations de vers de terre.

POUR EN SAVOIR PLUS :

- 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 APAFP N° 47-96, 103 p.

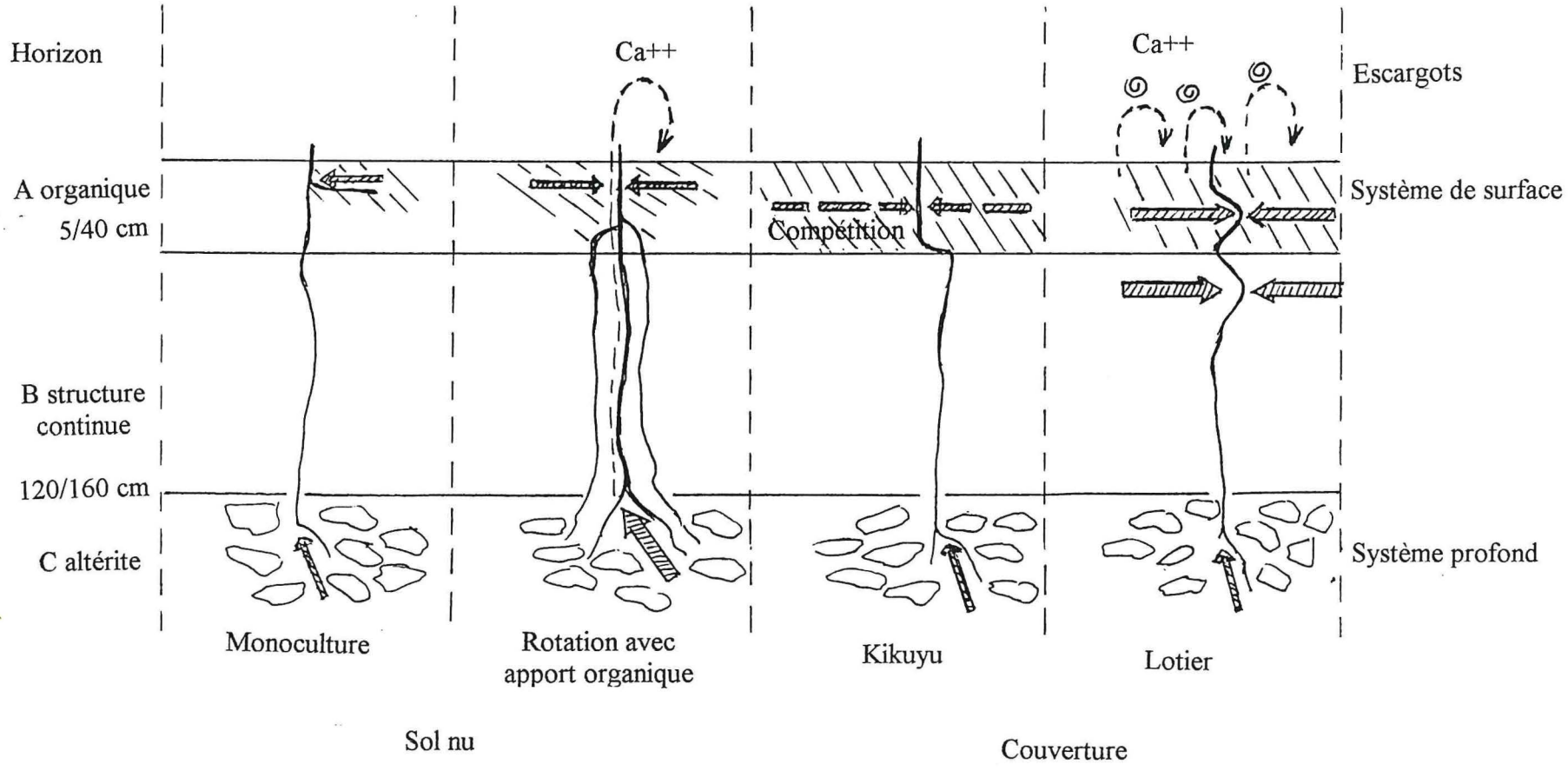


Figure 14 : Niveau d'absorption préférentielle des racines de géranium selon les systèmes de culture