

## 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 Goiás - 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 région 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**

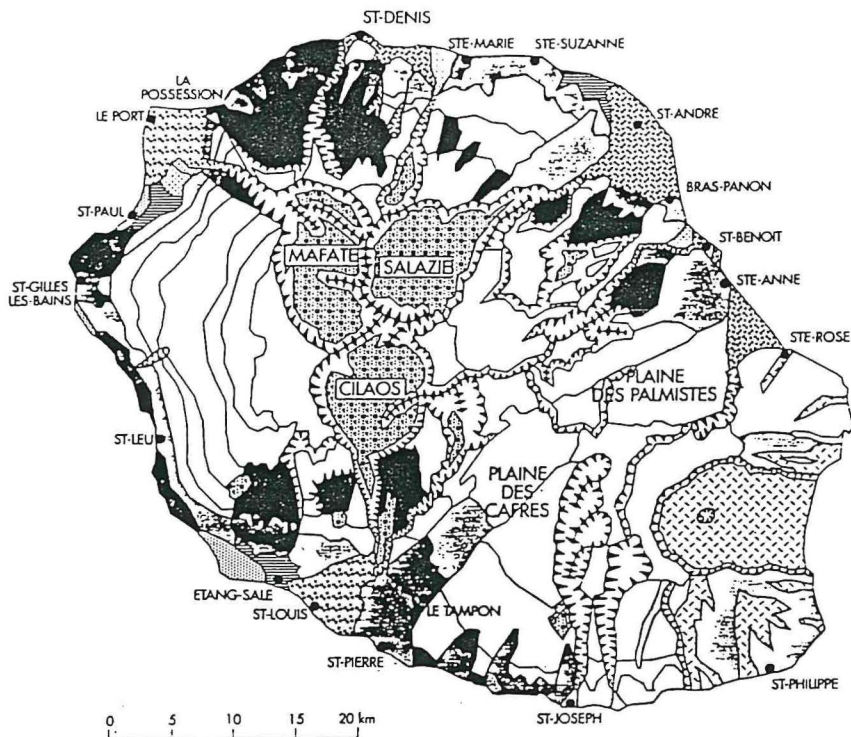
L'ensemble des parcelles appartient à une série de sols homogènes définis comme des andosols non perhydratés (RAUNET, 1991) (figure 4). La base du sol est constitué par un niveau à «gratons» constitués par des matériaux pyroclastiques. Ce niveau drainant est situé entre 60 et 160 cm de profondeur. Le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

- un horizon A de couleur foncée, à structure particulière (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'allopmane, 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.





N° 7 : andosol désaturé non perhydraté

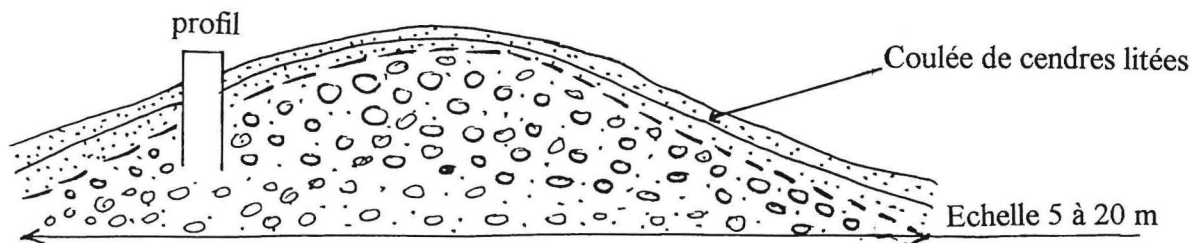
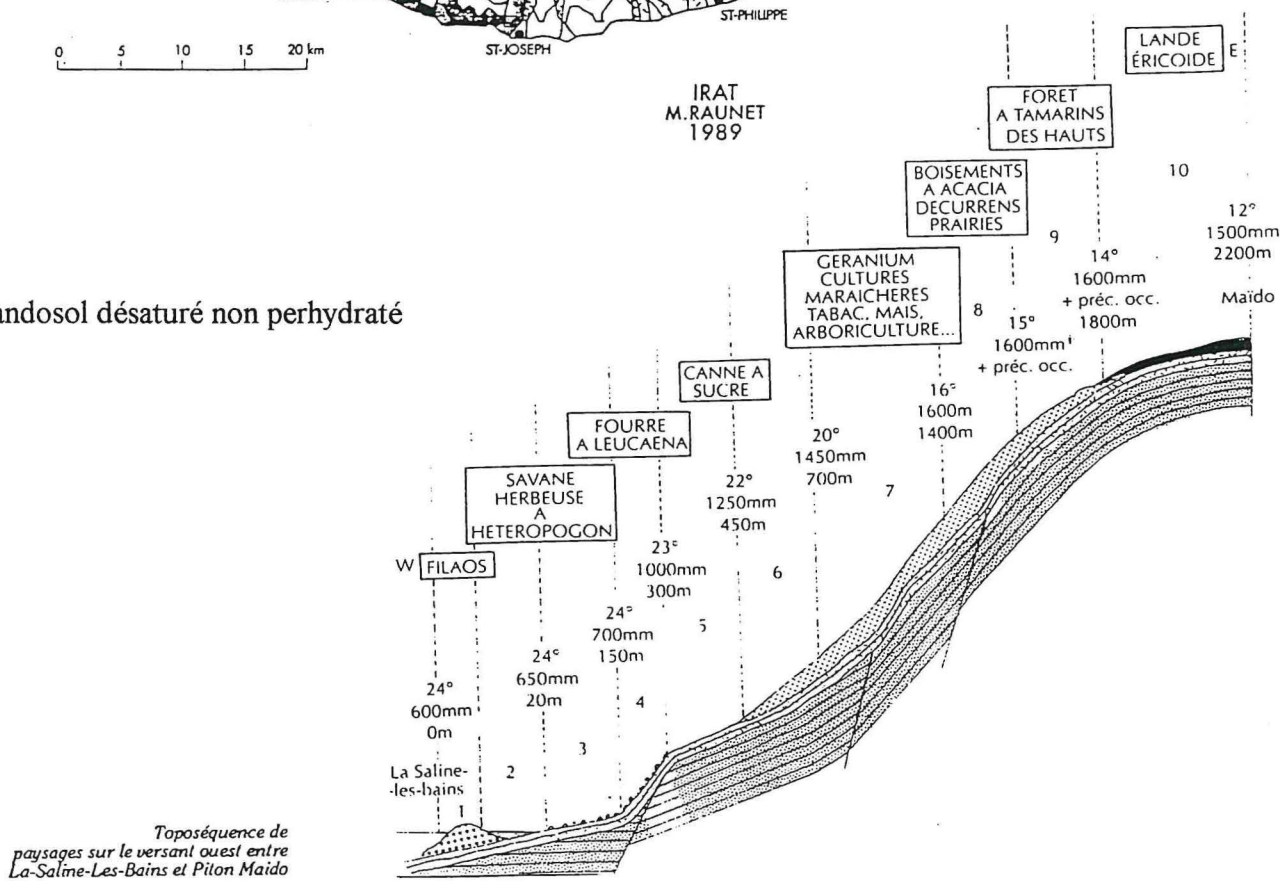


Figure 4 : Modèle de distribution des andosols désaturés non perhydratés

La capacité d'échange cationique, mesurée à la méthode de la cobaltihéxamine 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'hydroxydes 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  $\mu m$ ) (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 est 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 enrachements 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 continue 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 de 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 contact 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 développement 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).



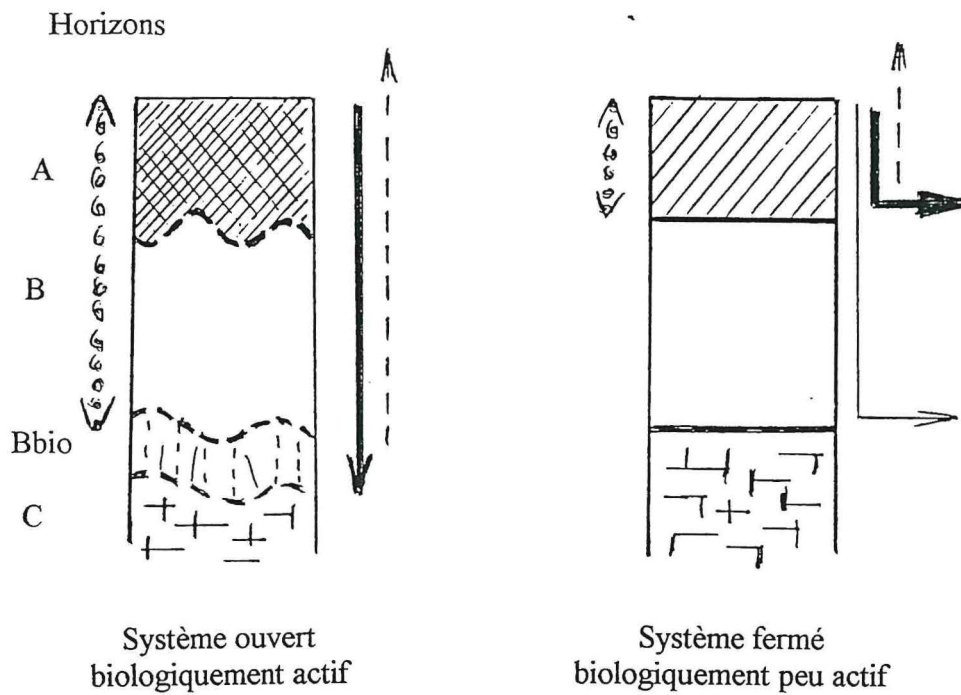
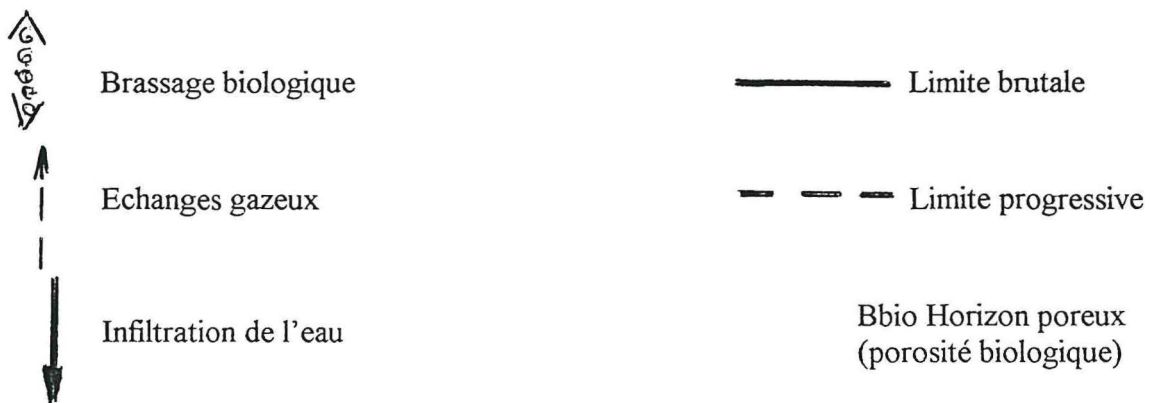


Figure 5 : Modèle structural de fonctionnement biologique du sol



### 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<sup>3+</sup> en Fe<sup>2+</sup> en milieu microaérophile, et d'oxyder les ions Fe<sup>2+</sup> en Fe<sup>3+</sup> en milieu aéré. Pour mettre en évidence leur activité, on utilise le ferricyanure de potassium (Fe<sup>2+</sup>) et le thiocyanate de K<sup>+</sup> (Fe<sup>3+</sup>). L'intensité de la couleur est notée sur le terrain avec un Munsell (Référence Munsell Chart Book of Color). On distingue les ions Fe<sup>2+</sup> 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 Nacet 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 dessiccation 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.



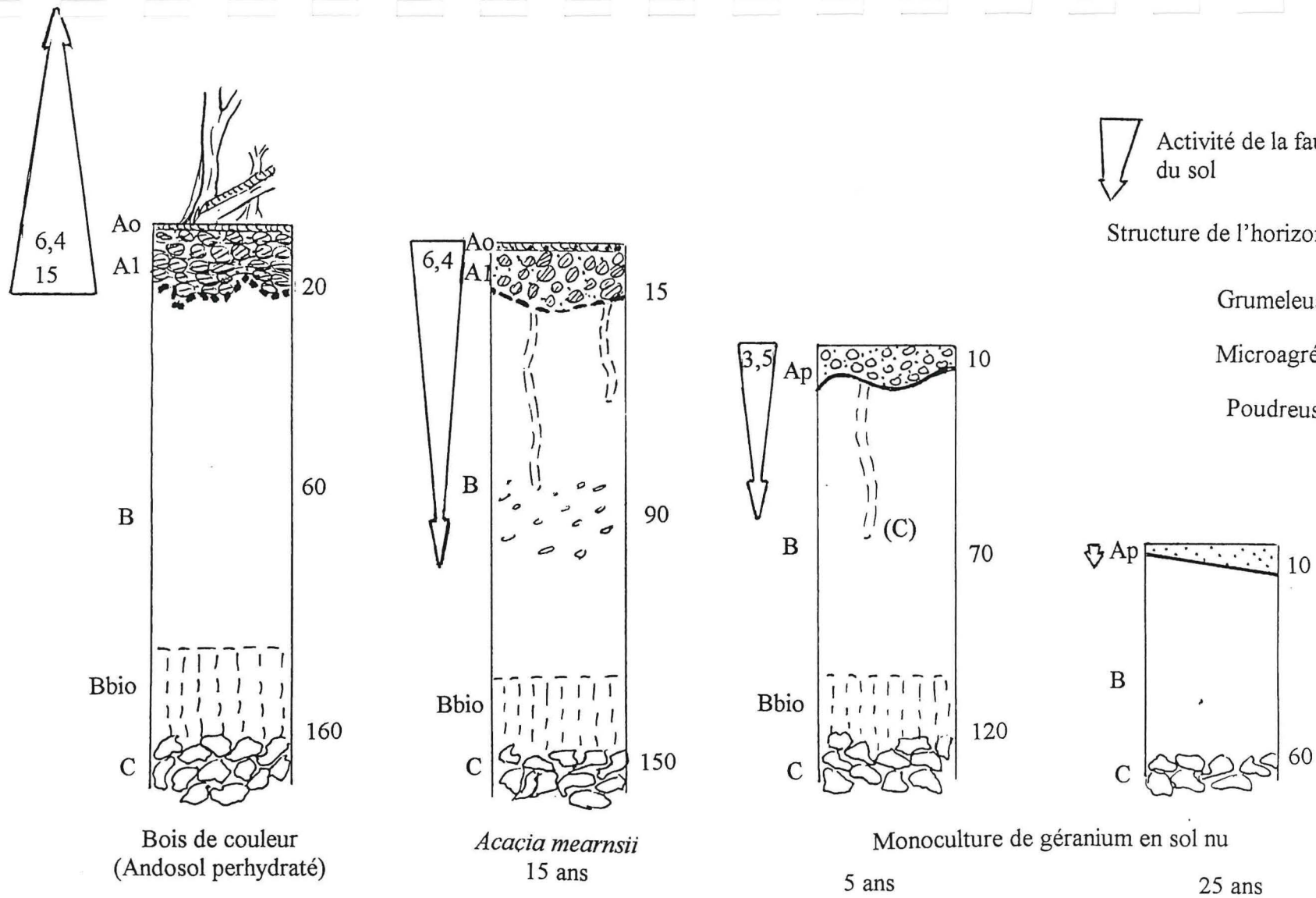


Figure 6A : Profils structuraux et faune du sol

Les nombres inscrits dans les flèches indiquent la population de vers de terre (nbre ind./m<sup>2</sup>)

Type d'horizon	Groupes faunistiques observés	Forêt de bois de couleur (altitude 1300 m)	Système à base de géranium (1000 m)		
			Jachère d' <i>A. mearnsii</i>	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 m<sup>2</sup>.

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./m<sup>2</sup> sous forêt de bois de couleur à 6,4 ind./m<sup>2</sup> sous jachère, et à 3,5 ind./m<sup>2</sup> 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 courtilières (*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 élevée) 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 racines 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, courtilières, 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 (courtilières). 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 défavorable 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.

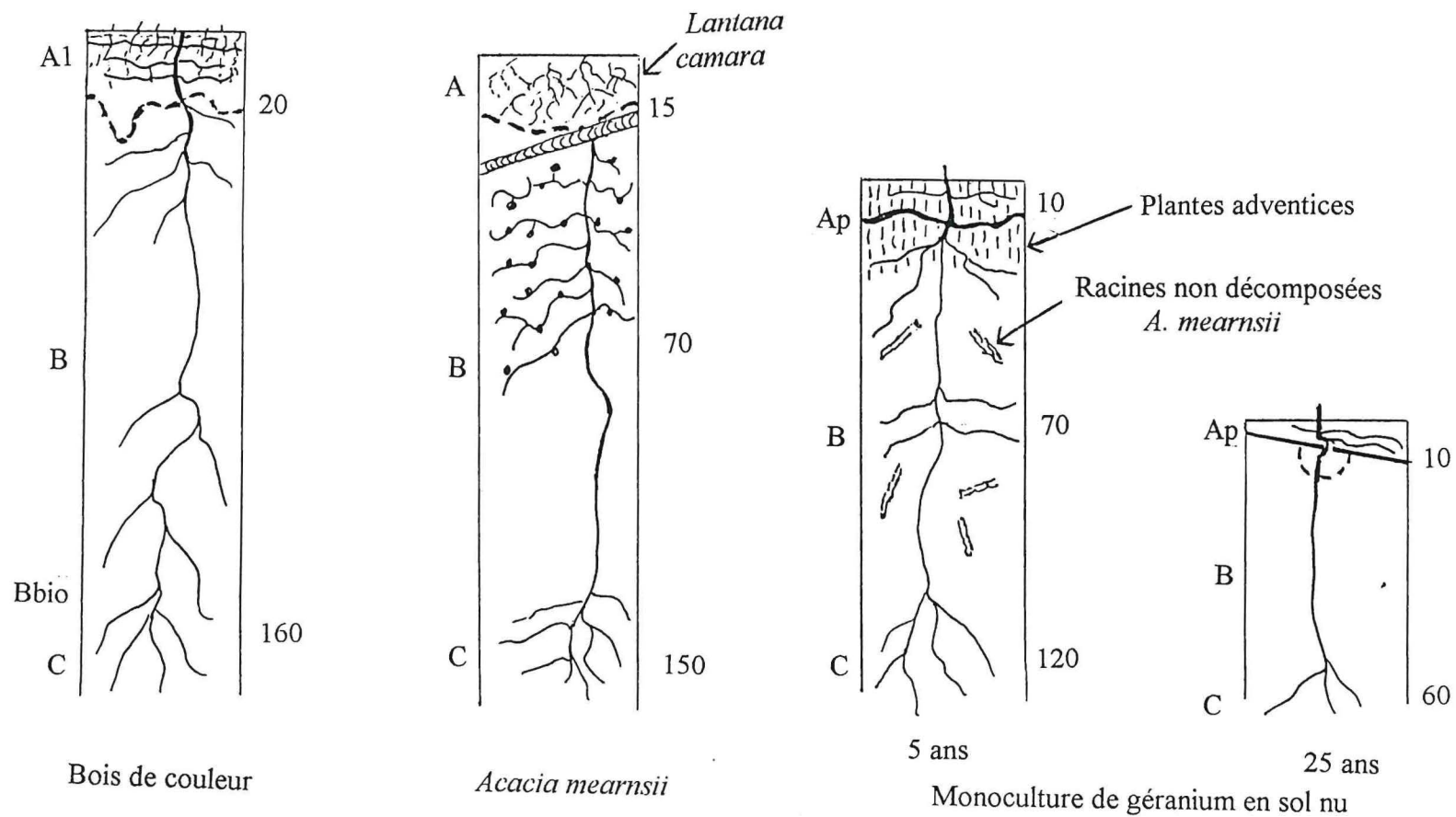


Figure 6B : Schéma des profils racinaires sous forêt de bois de couleur (altitude 1300 m) et dans le système à base de géranium (1000 m) : jachère d'acacia et en monoculture

### 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<sub>2</sub>, 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 <sup>++</sup>	Fe <sup>+++</sup>	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 60-70*	7,5 YR 3/3	7,5 BG 5/6	5 YR 6/10	o.L*
		2,5 YR 5/2			
	Sap 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 90-120	10 YR 4/4	5 PB 4/4	10 R 6/12	o.L
		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 <sub>10</sub> 1-6	10 YR 3/4	5 PB 3/2	10 R 5/10	o.L
	A <sub>11</sub> 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 35-120	10 YR 4/6			o.L
		10 YR 3/3			

**Tableau 5** : Résultats des tests sur les sidérobactéries (Fe<sup>++</sup>, Fe<sup>+++</sup>) 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> :

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 phosphatasiques 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.

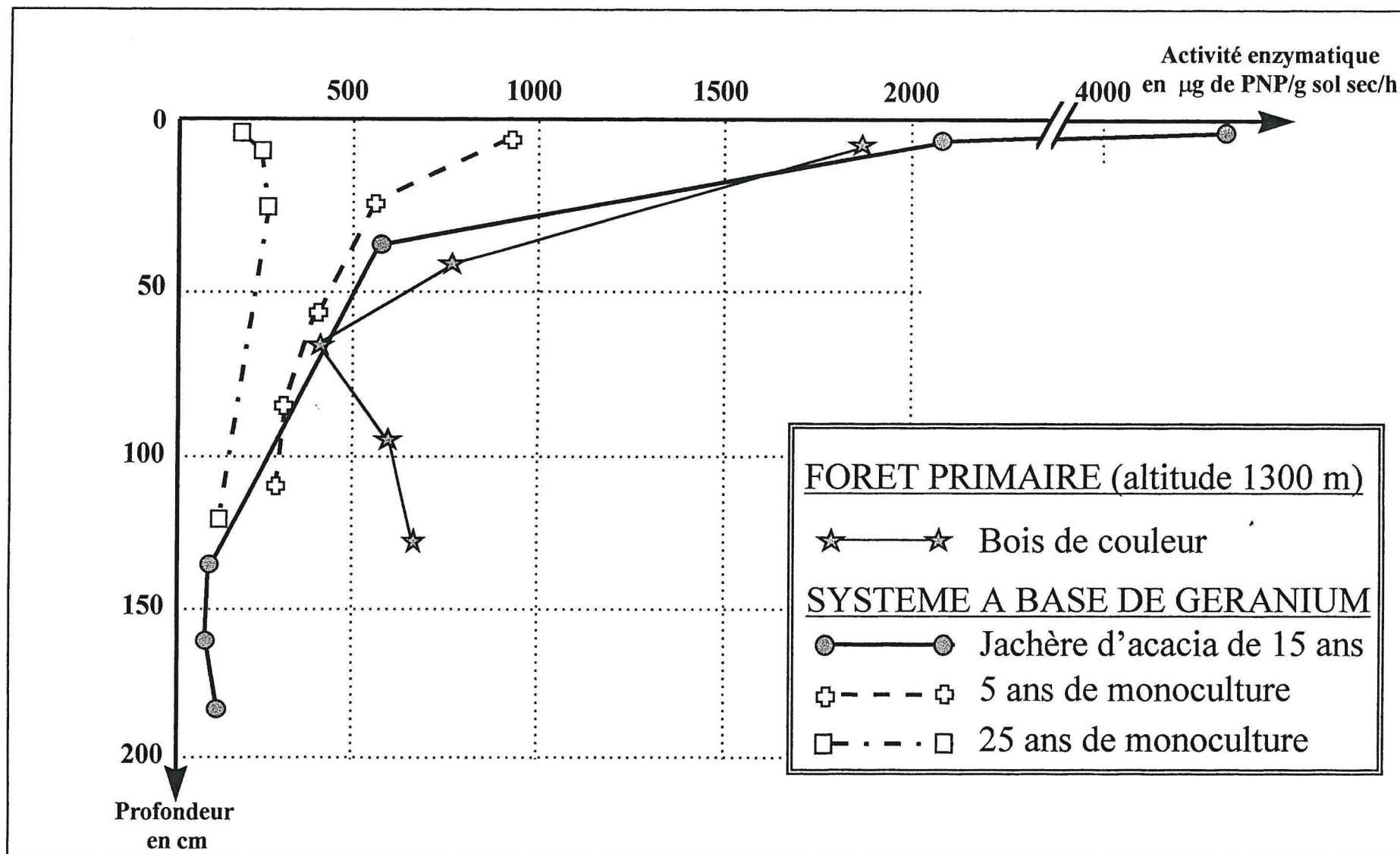
La végétation sous acacia et lantana est luxuriante et laisse une épaisse litière avec une importante mésofaune. L'arrière effet de cette jachère se fait sentir longtemps car la parcelle en monoculture depuis 5 ans après jachère est la plus active de toutes celles en géranium, même en profondeur (voir 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/m<sup>2</sup>. 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/m<sup>2</sup>. 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/m<sup>2</sup>) 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).

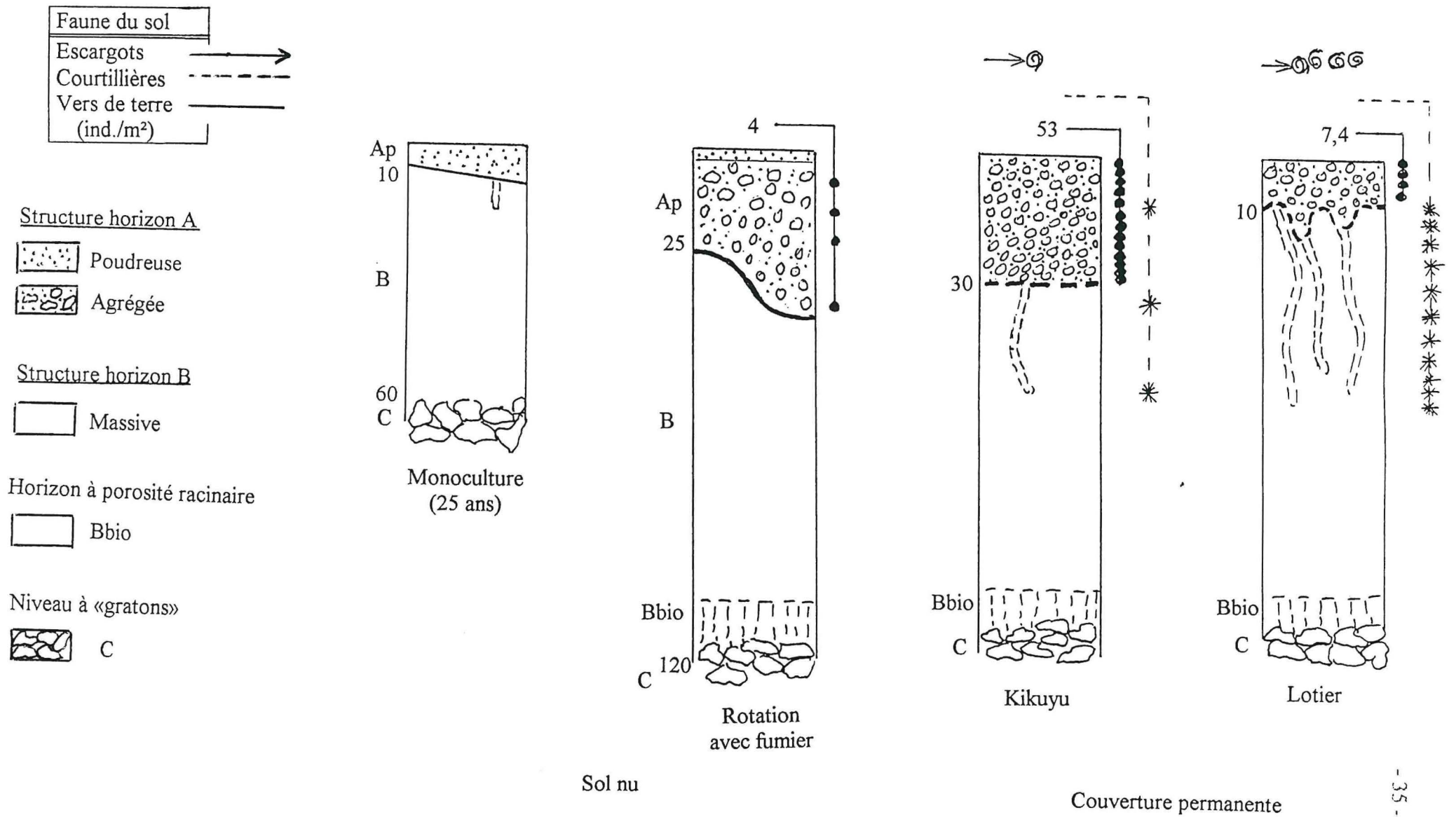


Figure 8A : Profils structuraux dans les différents systèmes de culture du géranium



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 coutrilières 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,

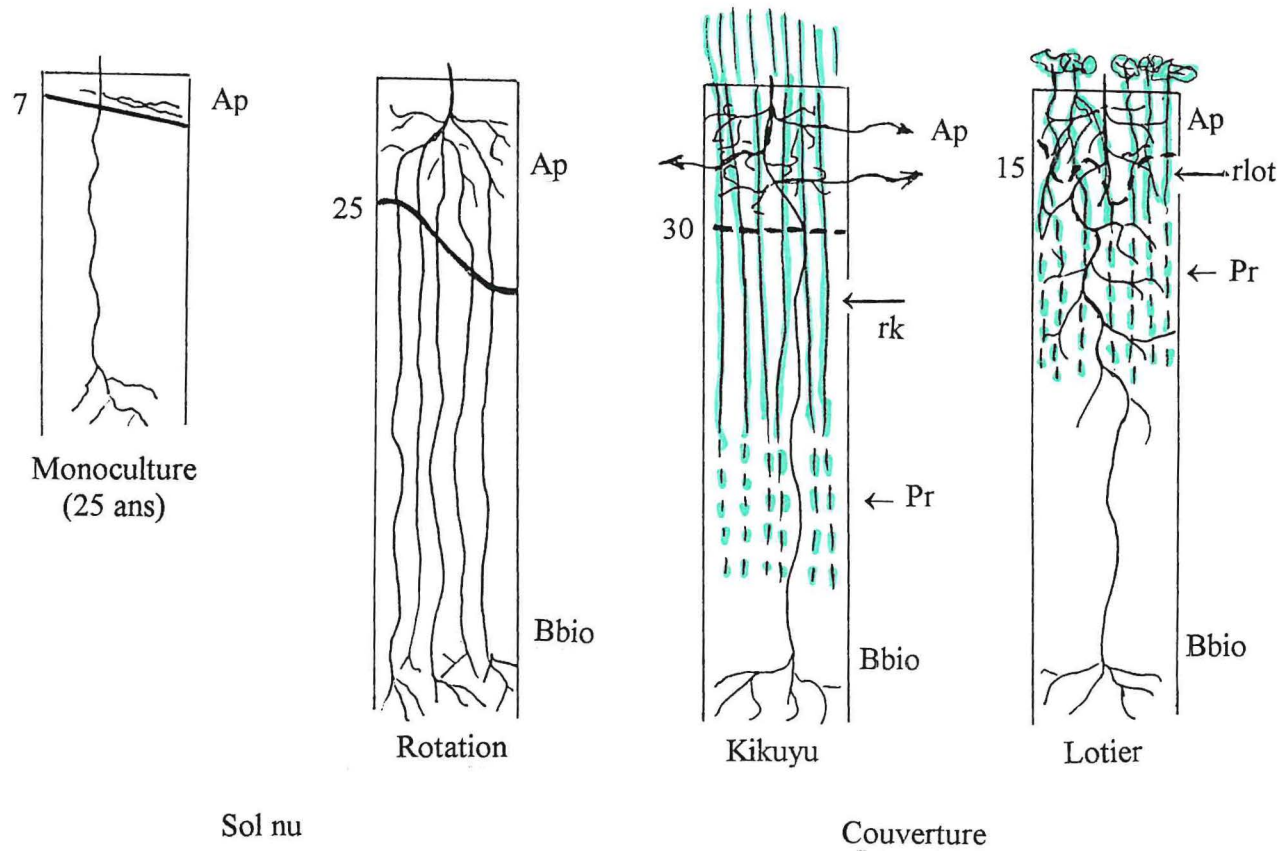


Figure 8B : Différence d'architecture du système racinaire de géranium dans les différents systèmes de culture

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).

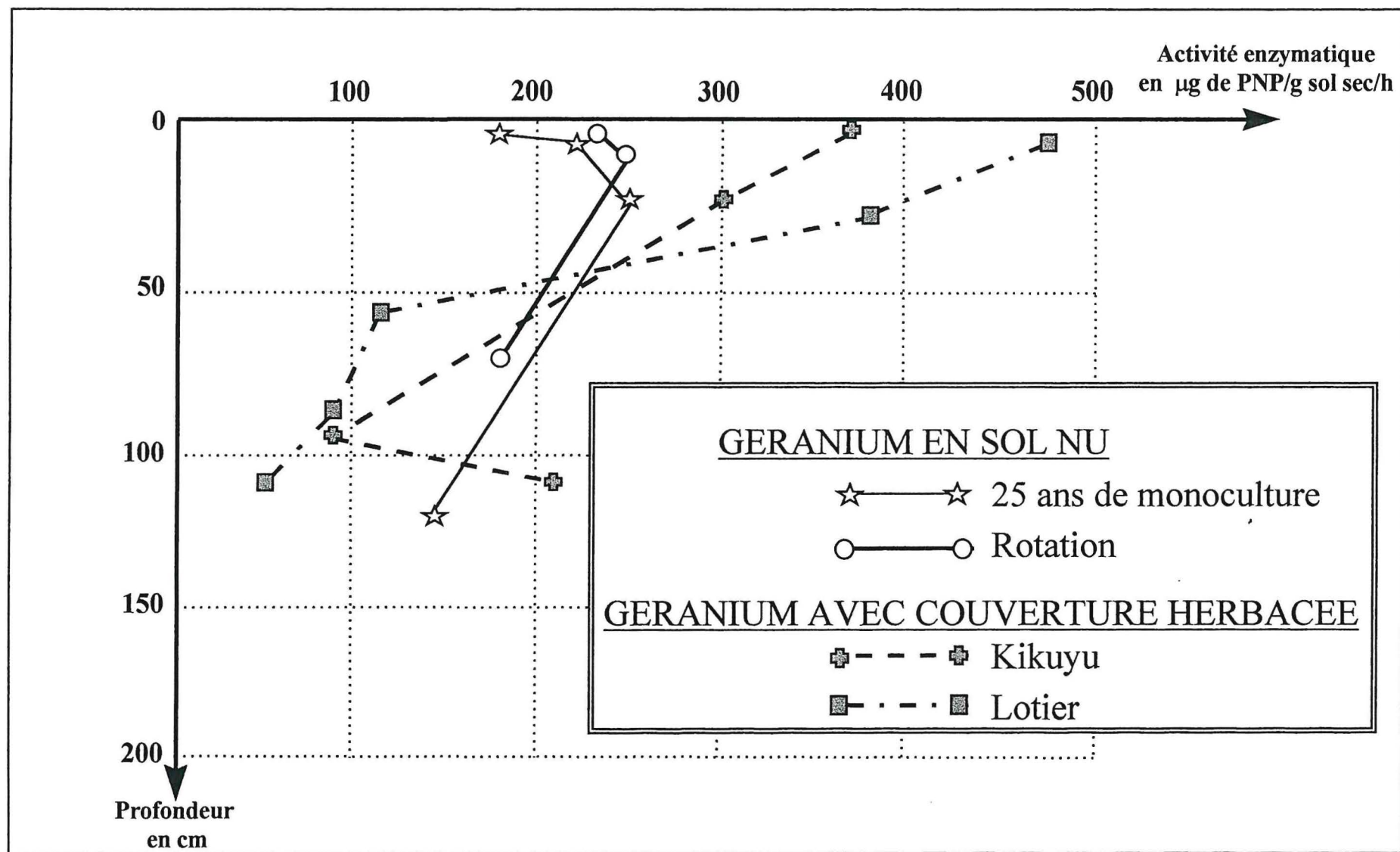
En rotation, avec apport supplémentaire de compost, on note plusieurs pivots réitérés, avec nombreuses ramifications latérales dans la couche organique de surface (25-40 cm).

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 différents 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.

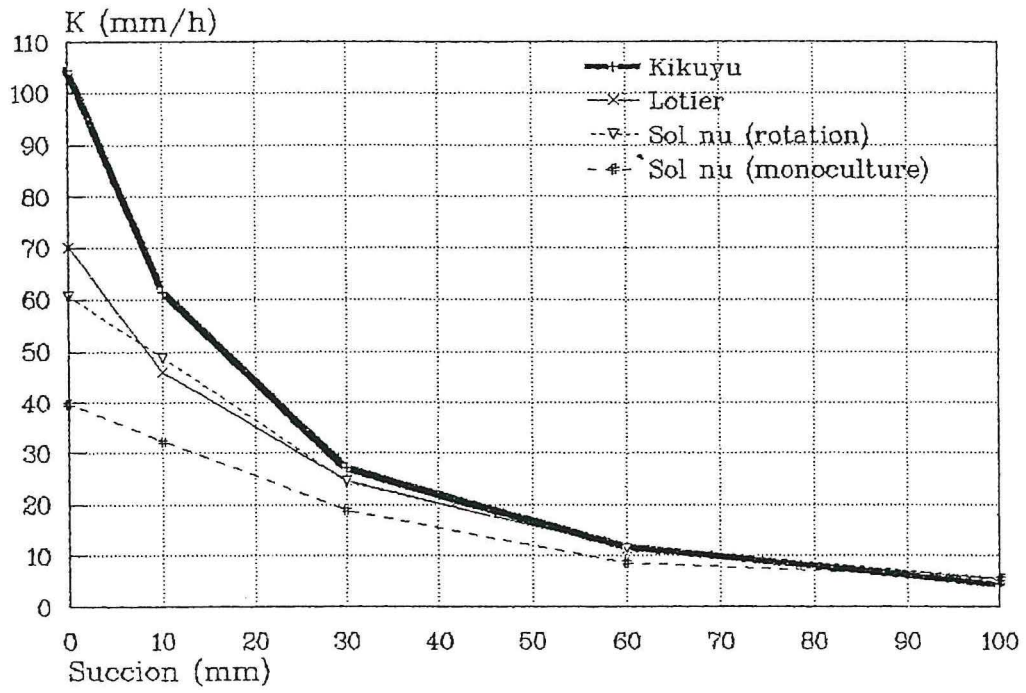
Dans les andosols désaturés, non perhydratés, comparables à ceux de notre site d'étude, une couverture permanente de *Desmodium* (légumineuse) avait entraîné au contraire une diminution de la conductivité hydraulique comparativement au sol nu, suite semble-t-il à un colmatage des pores par la matière 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 ( $I_v$ ) et d'eau ( $I_w$ ), 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).

### HORIZON A



### HORIZON B

(Zone enracinement des plantes de couverture)

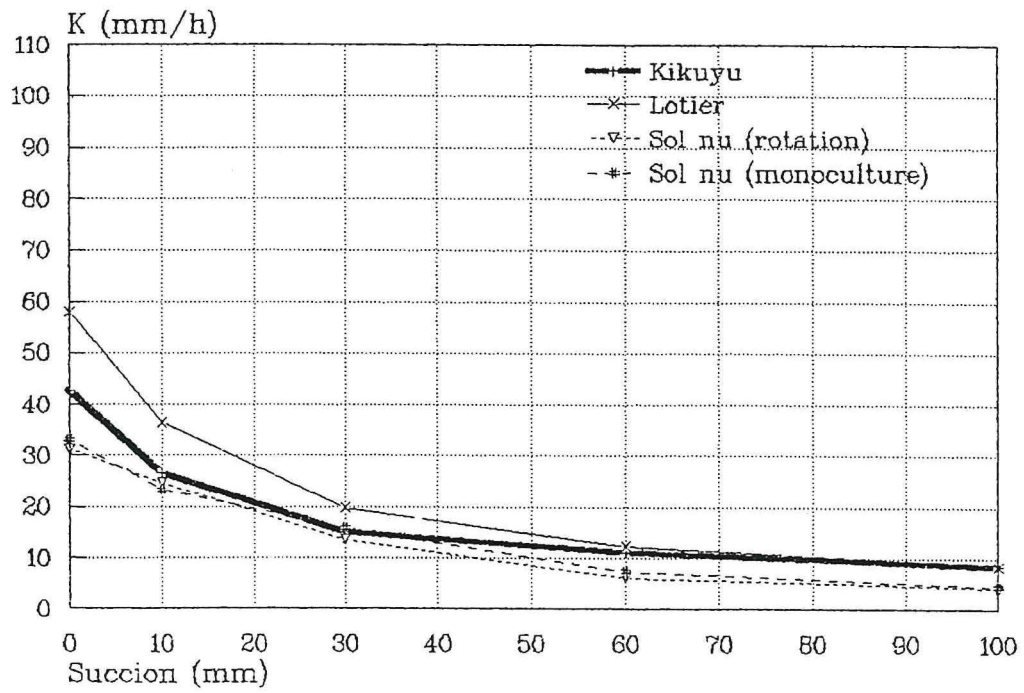


Figure 10 : Conductivité hydraulique en fonction de la succion



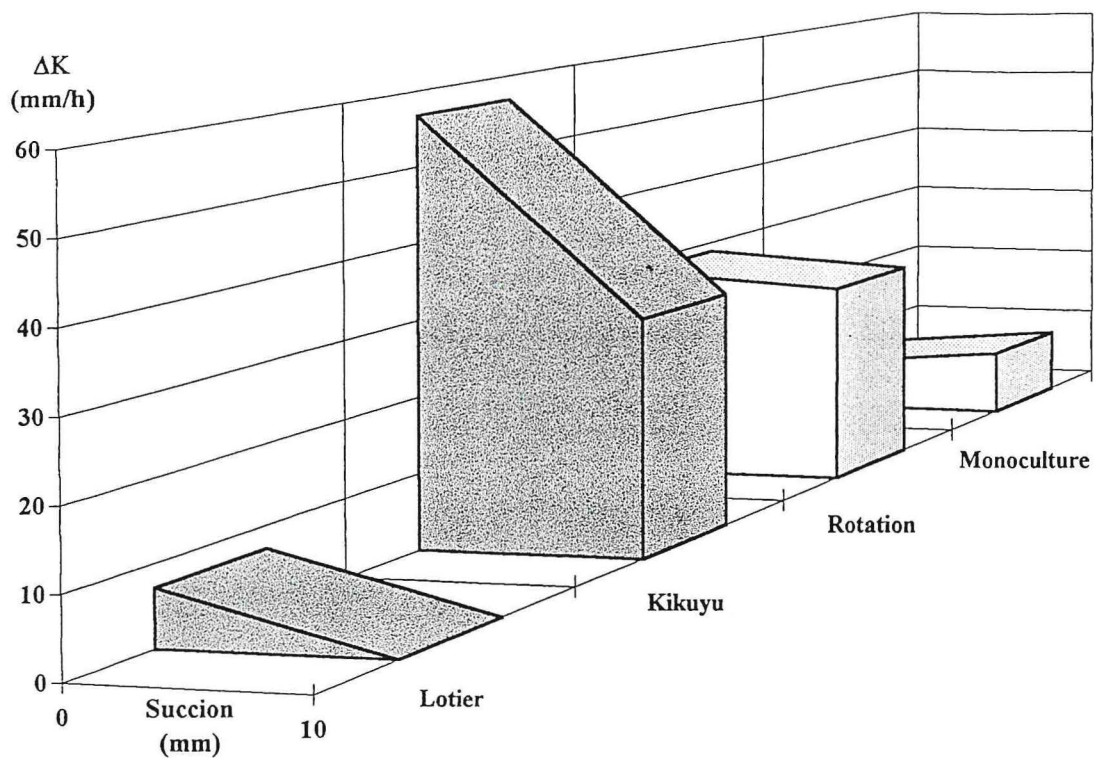
Dans l'horizon A, la conductivité la plus élevée est obtenue avec la couverture de kikuyu, alors que dans l'horizon B, c'est le lotier qui assure la conductivité la plus élevée. La différence de conductivité entre les deux horizons renseigne sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. L'infiltration sera d'autant plus rapide que la couche de surface sera conductible, et surtout que la différence avec la couche sous-jacente 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 ressuyés que sous kikuyu.

### *Variations de la macroporosité*

De nombreux auteurs ont montré que les valeurs de conductivité hydraulique étaient 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 horizons 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 m<sup>2</sup>. 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 suction)**

	Succion (mm)	W (%)	D. app.	Hv (%)	lv	lw	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

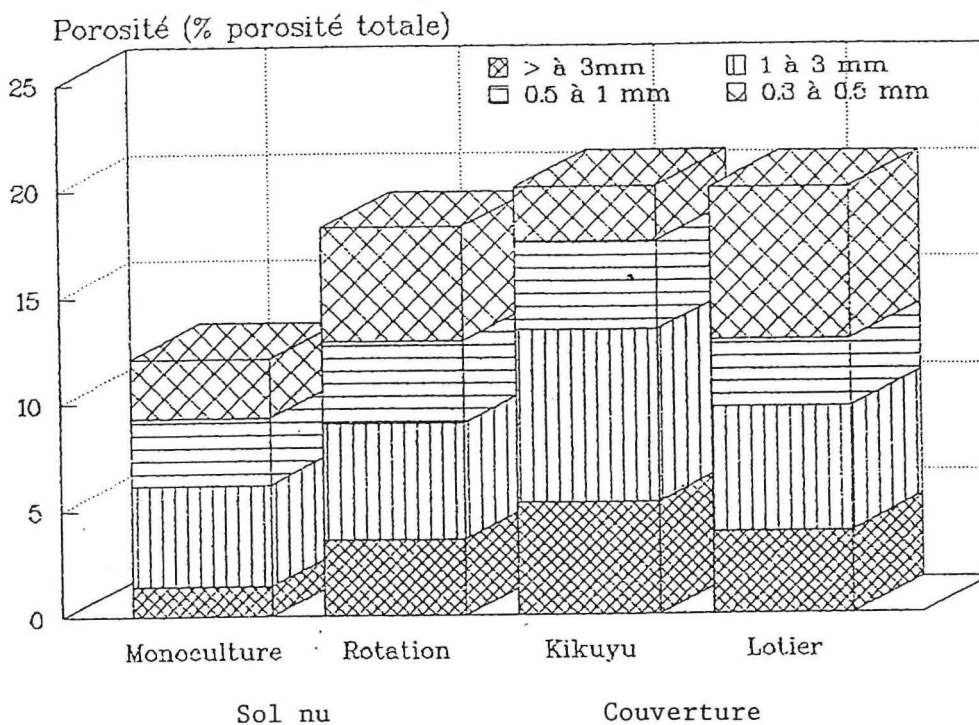
	Succion (mm)	W (%)	D. app.	Hv (%)	lv	lw	Sat %	Porosité (%)	Gamme de pores (mm)	% volumique de porosité
Parcelle 19 - Sol nu (Monoculture)	0	130,4	0,56	72,8	3,82	3,51	91,5	79,2	> 3	3,1
	10	125,9	0,56	70,5	3,82	3,40	89,2	79,2	1 à 3	3,8
	30	121,7	0,56	67,6	3,82	3,26	85,3	79,2	0,5 à 1	2,8
	60	117,4	0,56	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



### HORIZON A



### HORIZON B

(Zone enracinement des plantes de couverture)

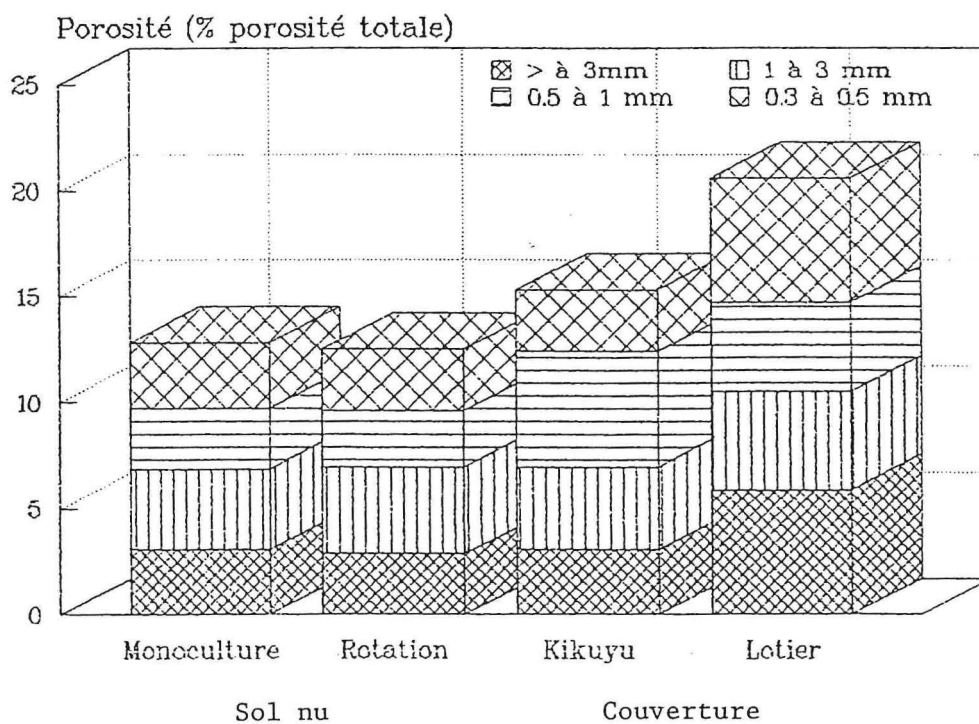


Figure 12 : Spectre de la macroporosité

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  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$ , 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  $\mu\text{m}$ , 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  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{m}$ . La différence de répartition entre la classe de pores (0,3  $\mu\text{m}$ -30  $\mu\text{m}$ ) et (30  $\mu\text{m}$ -300  $\mu\text{m}$ ) 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 (%)	lv	lw	la	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 (%)	lv	lw	la	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



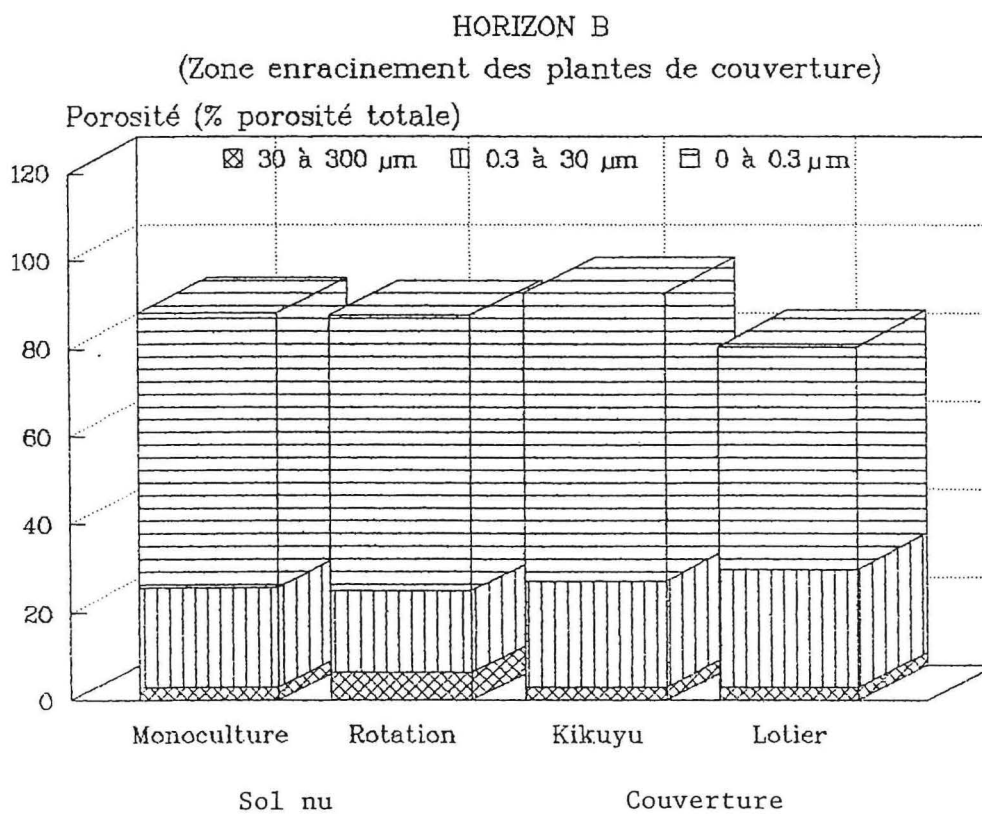
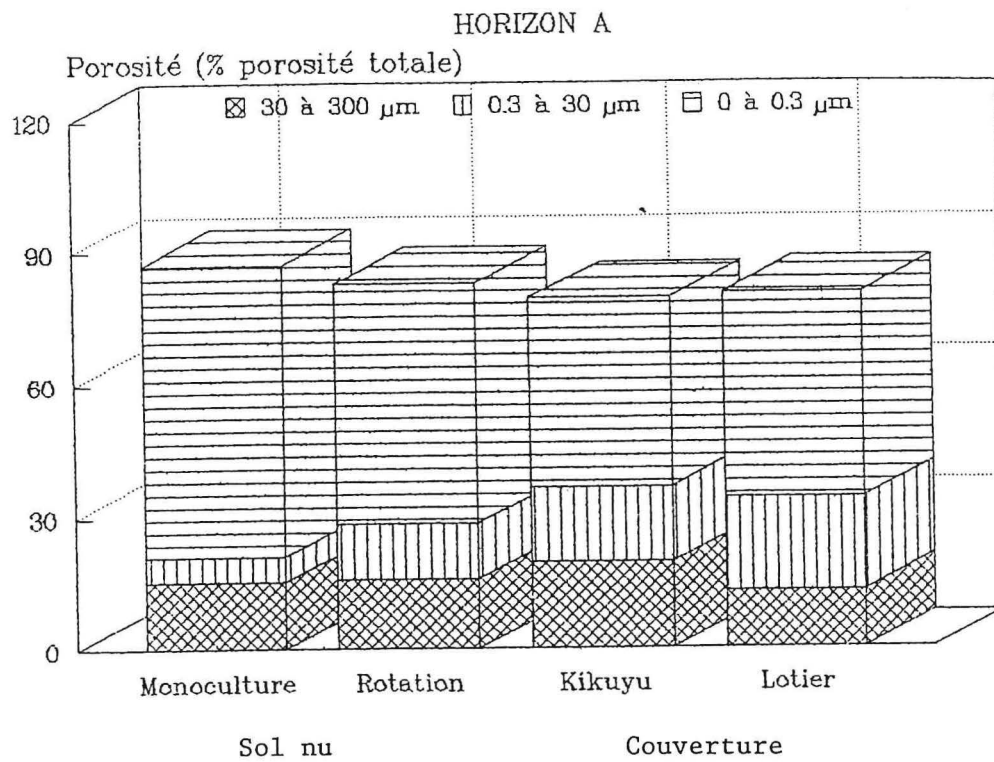


Figure 13 : Spectre poral et porosité utile

matrice du sol que sous lotier. Ce type d'arrangement favorise la proportion de pores supérieurs à 30  $\mu\text{m}$ . 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  $\mu\text{m}$ , 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 remercions 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.

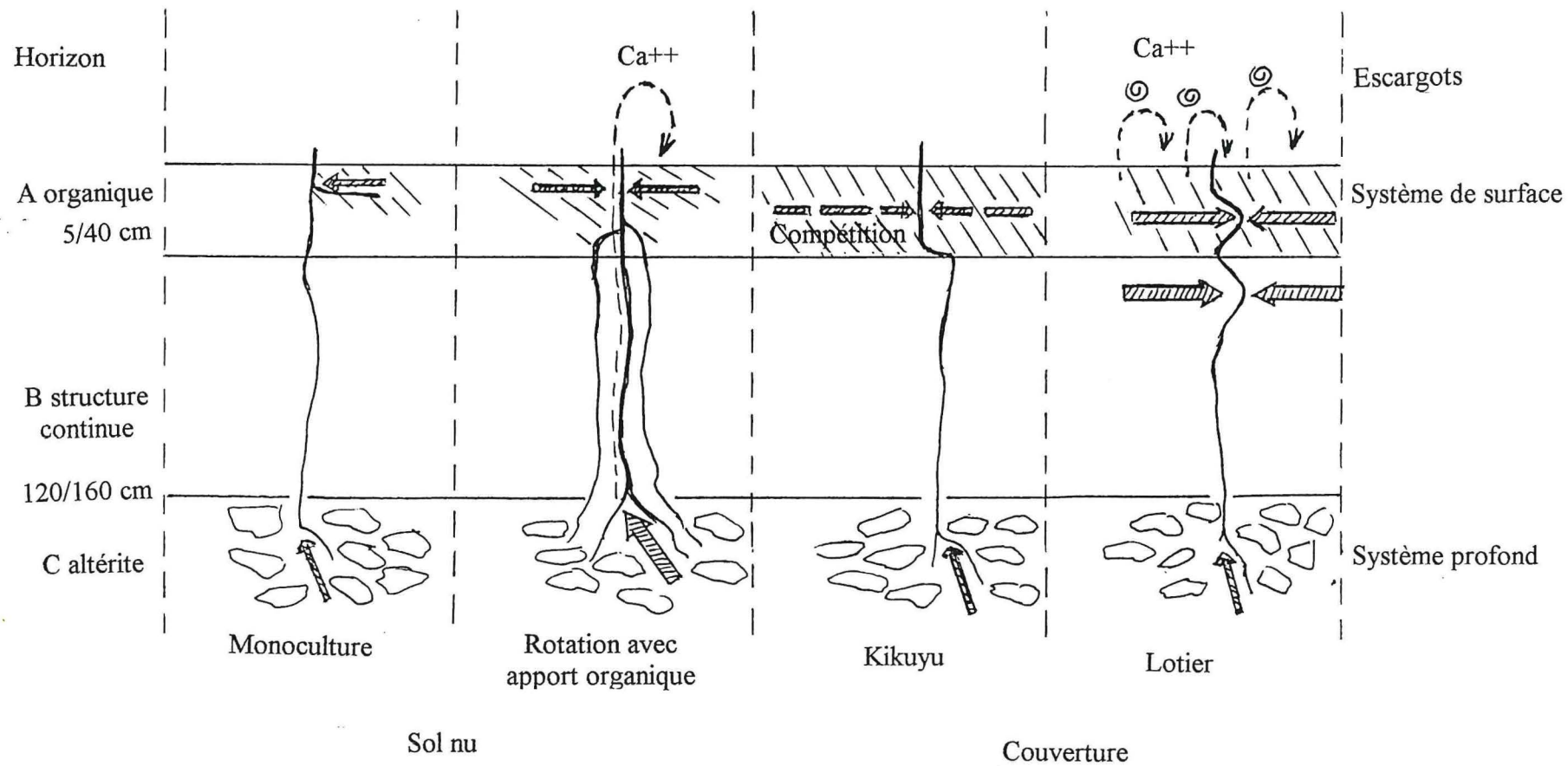


Figure 14 : Niveau d'absorption préférentielle des racines de géranium selon les systèmes de culture