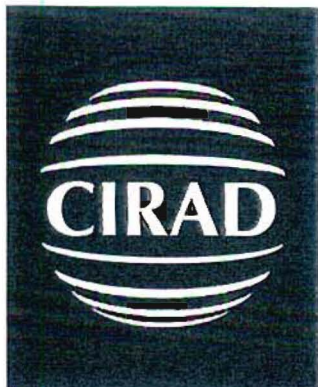


N° 47-96  
Juillet 1996



---

**MODES DE GESTION ECOLOGIQUE  
DES SOLS ET SYSTEMES DE CULTURE  
A BASE DE GERANIUM DANS LES HAUTS  
DE L'OUEST DE LA REUNION**



---

**Roger MICHELLON**  
Programme APAFP  
CIRAD-CA

Etude réalisée grâce au financement du CONSEIL REGIONAL en collaboration avec l'A.P.R.

N° 47-96  
Juillet 1996

---

**MODES DE GESTION ECOLOGIQUE  
DES SOLS ET SYSTEMES DE CULTURE  
A BASE DE GERANIUM DANS LES HAUTS  
DE L'OUEST DE LA REUNION**

---

**Roger MICHELLON  
Programme APAFP  
CIRAD-CA**

Etude réalisée grâce au financement du CONSEIL REGIONAL en collaboration avec l'A.P.R.

## SOMMAIRE

Avant-propos	
I- Les objectifs	2
II- Dispositifs expérimentaux	4
2.1. Les composantes des systèmes étudiés	4
2.1.1. Systèmes de culture en sol nu	4
2.1.2. Systèmes de culture avec couverture végétale du sol	7
a) Les cultures	8
b) Les couvertures	8
2.2. Dispositifs expérimentaux et suivi-évaluation agronomique	9
2.2.1. Effet sur le milieu	9
2.2.2. Plantes de couverture	10
2.2.3. Cultures principales	10
III- Conditions de réalisation	11
3.1. Choix d'un milieu représentatif	11
3.2. Conditions de réalisation	13
IV- Les conséquences du mode de gestion du sol sur le rendement des cultures, et en particulier du géranium rosat	13
4.1. Evolution du système de culture traditionnel	13
4.2. Le système dégradé en monoculture	17
4.3. Les systèmes diversifiés à base de géranium	21
4.3.1. La matière organique	21
4.3.2. Les intercalaires	22
4.3.3. Les rotations	27
4.3.4. Le travail du sol	33
4.4. Systèmes durables avec couverture permanente	38
4.4.1. Couverture morte	38
4.4.2. Couverture herbacée permanente	42
a) Couverture de kikuyu	42
b) Couverture de lotier	46

V- Modifications des propriétés biologiques, physico-chimiques et hydrodynamiques du milieu en fonction des modes de gestion du sol	52
5.1. Caractéristiques générales des sols	52
5.2. Dégradation du fonctionnement biologique du sol en monoculture	55
5.2.1. Evolution des profils	55
a) Sous <i>Acacia mearnsii</i>	55
b) Après 5 ans de culture de géranium en sol nu	55
c) Après 25 ans de monoculture de géranium en sol nu	57
5.2.2. Evolution de la macrofaune	58
5.2.3. Influence sur les propriétés physiques et hydriques	60
5.2.4. Influence sur les caractéristiques chimiques	61
5.3. Restauration de la fertilité grâce aux apports de fumier dans les systèmes en rotation ou avec cultures intercalaires	63
5.3.1. Modifications induites sur le profil cultural et l'enracinement du géranium	63
a) Impact sur le profil cultural	63
b) Modification de l'enracinement du géranium	65
5.3.2. Quantification de la macrofaune	65
5.3.3. Propriétés physiques et hydriques	67
5.3.4. Evolution des caractéristiques chimiques	67
a) Cultures intercalaires	67
b) Rotations	69
5.4. Amélioration du fonctionnement biologique des sols sous couverture herbacée	79
5.4.1. Profils structuraux et racinaires	79
a) Couverture permanente de kikuyu	79
b) couverture permanente de lotier	82
c) Conclusions	82
5.4.2. Evolution de la macrofaune	84
5.4.3. Influence sur les propriétés physiques et hydrodynamiques	84
5.4.4. Evolution des propriétés chimiques du sol	86
a) Couverture morte	86
b) Couverture vive	89
VI- Conclusion	96
Bibliographie	

## AVANT-PROPOS

Ce rapport constitue une synthèse des études pluri-disciplinaires et pluri-institutionnelles conduites depuis plus de 10 ans dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion, nécessitant un effort particulier de la part de chacun en raison des nombreuses contraintes et handicaps qui pesaient sur cette zone.

Ces recherches ont été conduites par de nombreux chercheurs du CIRAD, de manière continue (L. SEGUY, M. RAUNET, J. SERVANT, S. PERRET, Y. BERTIN) ou plus momentanée (Y. ANSELLEM, B. BRIDIER, J.P. BABUT, P.F. CHABALIER, J.M. CHASTEL, J.P. DANFLOUS, P. DEJANTE, F. DEMARNE, A. DEREVIER, P. GARIN, D. GUILLUY, A. HEBERT, E. PARISOT, R. PIROT, Y. ROEDERER, J. TASSIN, J.M. PAILLAT, TRAN MINH DUC, G. VINCENT, M. VAKSMANN, ...), de l'Université (J. BOUGERE, A. OURLY, ...), de l'INRA (G. CALLOT, ...), de l'ORSTOM (J. BOYER, P. LAVELLE, ...) ou de stagiaires (D. BURLE, A. CLARIOND, C. COURCOL, J.F. DOREE, G. DONSKOFF, X. FONTAR, L. HUMEAU, F. PY, L. THOMAS, ...). Chacun retrouvera dans son domaine une description simplifiée et incomplète des phénomènes qu'il a étudié, qui lui paraîtra peut-être même caricaturale. Mais cette synthèse devrait permettre de mieux comprendre l'ensemble des processus mis en jeu, de les relier entre-eux, et d'évaluer leurs multiples interactions qui concourent au résultat technico-économique de l'agriculteur et à l'évolution générale de la zone.

Nous remercions tous ceux qui ont fait plus que leurs simples tâches assignées, comme l'équipe CIRAD des Colimaçons animée par P. TECHER, ainsi que les agriculteurs partenaires quotidiens qui se sont investis dans cette démarche pour le développement. Ils ont pour soucis de diminuer leurs temps de travaux et leur pénibilité, de maîtriser les mauvaises herbes, de nourrir leurs animaux, de produire plus et mieux sur un sol à restaurer, ou de conserver leur terrain pour leurs enfants. Cette contribution devrait permettre d'aider à leurs choix ...

## **I- LES OBJECTIFS**

Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le «géranium rosat» a progressivement permis la mise en valeur des terrains alors inexploités, de la zone sous le vent de moyenne altitude.

Mais au cours des deux dernières décennies, l'évolution rapide de l'économie de l'île a entraîné une mutation profonde des systèmes de culture à base de «géranium».

La culture itinérante traditionnelle avec jachère arborée s'est progressivement sédentarisée sous l'influence de différents facteurs socio-économiques. L'abandon de la jachère, qui assurait la restauration de la fertilité depuis un demi siècle, a entraîné, en l'absence de changement notable d'itinéraire technique, une baisse de rendements (tableau 1), accompagnée d'une prolifération des adventices et des maladies. Cette dégradation des conditions agronomiques de culture a contribué à la disparition d'un grand nombre d'exploitations.

Année	Surface en ha	Récolte globale d'huile essentielle en t	Rendement moyen en kg/ha
1972	4000	121	30
1981	2700	63	23
1989	1550	15	10

**Tableau 1** : Superficie et production du géranium à la Réunion (d'après le recensement général agricole de 1972, 1980-1981 et 1989)

Actuellement, une évolution amorcée quelques années plus tôt dans le Sud, se généralise grâce à une diversification des productions végétales et une orientation de la zone vers la polyculture-élevage. Cette transformation est favorisée par le désenclavement, l'apparition des marchés liés à l'urbanisation, le changement de mode de faire-valoir, la formation des hommes ...

Les effets néfastes engendrés par cette monoculture de rente et leurs conséquences sur l'exode rural ont conduit à la mise en place du Plan d'Aménagement des Hauts (1983). L'intervention de la recherche agronomique s'inscrit dans le cadre de ses orientations et de la politique de coopération régionale. Ses objectifs comportent en effet :

- la protection de l'environnement, et en particulier la défense et la restauration des sols,
- le développement agricole de la zone, grâce à la confortation des productions traditionnelles (géranium rosat, ...) et à une diversification des cultures destinées au marché local (vivrières, maraîchères et élevages).

Pour apporter des solutions compatibles avec les pratiques et contraintes des agriculteurs, une démarche de recherche appliquée originale a été mise en oeuvre. Des systèmes de productions diversifiés, élaborés avec les agriculteurs, les formateurs et les techniciens agricoles ont pu être proposés pour stabiliser les exploitations et améliorer leur revenu :

- lorsque la surface est limitée et la main-d'oeuvre abondante, les cultures associées et intercalaires permettent d'augmenter la productivité de la terre et du travail, de la régulariser, tout en restant compatible avec la pluriactivité,
- lorsque le foncier est moins limitant, la rotation des cultures vivrières ou maraîchères avec les géranium, conduit à une agriculture productive et diversifiée (MICHELLON, 1992).

Mais la culture continue en sol nu de plantes sarclées, telles que le géranium, aboutit à la dégradation et au décapage de l'horizon humifère présent après la jachère arborée. Ainsi, sur une pente moyenne, des pluies orageuses peuvent, en sol nu, provoquer une érosion estimée à plusieurs centaines de tonnes par ha et par an (BOUGERE, 1988 ; PERRET, 1992).

Les matériaux sous-jacents, à structure continue, présentent des caractéristiques agronomiques médiocres. En l'absence de restitutions organiques suffisantes, la fertilité des sols se dégrade rapidement. Cette dégradation se traduit par une baisse du rendement et de l'état sanitaire des cultures, malgré un accroissement des intrants (herbicides, ...).

La fixation d'une agriculture durable ne peut se concevoir qu'à partir de techniques de protection totale du capital sol associant les cultures à des couvertures herbacées comme cela a été démontré dans de nombreuses régions du monde (HARGROVE, 1991 ; MONEGAT, 1991 ; SEGUY, 1993).

L'apport récent de l'agroforesterie et des couvertures végétales permanentes du sol permet dorénavant de proposer des systèmes de culture stables dans un environnement protégé. Destinés à l'origine à restaurer la fertilité et à mieux s'affranchir des aléas climatiques, ces nouvelles propositions dépassent largement les objectifs escomptés. Elles conduisent à un ensemble d'effets agronomiques favorables, aux répercussions technico-économiques importantes.

La maîtrise des systèmes de culture nouveaux diversifiés compatibles avec les contraintes des agriculteurs nécessite que les solutions praticables soient mises au point en milieu réel sur des unités de paysage représentatives, avec la participation effective des agriculteurs et des autres acteurs du développement.

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 pour prendre en compte la variabilité climatique et économique.

La comparaison de ces parcelles pérennisées devraient permettre :

- d'évaluer les effets des modes de gestion du sol sur leurs caractéristiques physico-chimiques et biologiques,
- de relier ces caractéristiques aux performances agronomiques des cultures et, en particulier, du géranium rosat,
- et de dégager des indicateurs pertinents permettant d'évaluer la fertilité des andosols.



## **II- DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX**

Chronologiquement, la fixation de l'agriculture dans les Hauts de l'Ouest a nécessité l'évolution et l'adaptation constantes de l'intervention de la recherche pour créer et diffuser de manière anticipée des systèmes plus performants (figure 1), présentant une amélioration constante de leurs performances agrotechniques et économiques, dans un environnement physique protégé et stable.

Suite aux études thématiques sur différentes cultures (industrielles, maraîchères, ...) conduites en sol nu de 1963 à 1983, les travaux ont porté sur les systèmes de culture selon la séquence évolutive suivante :

- . en sol nu de 1984 à 1993,
- . avec couverture morte ou vive à partir de 1988,
- . avec couverture vive et embocagement à partir de 1991.

Le présent rapport ne prendra pas en compte l'analyse des systèmes de culture mis en place le plus récemment, en 1991.

### **2.1. Les composantes des systèmes étudiés**

#### **2.1.1. Systèmes de culture en sol nu**

En 1983, les exploitations de petites superficies (90 % ont moins de 3 ha) se caractérisent par une spécialisation certaine vers le géranium rosat. Hormis la canne à sucre, la diversification n'apparaît que dans 13 % des cas, et concerne alors les cultures maraîchères et le tabac. Le colonat partiaire qui représente les trois-quarts des exploitations, constitue le mode de faire-valoir dominant et apparaît comme un obstacle majeur à cette diversification (BRIDIER, 1985).

Le géranium rosat, dont la culture est «adaptée» aux structures et aux rapports de production et qui jouit d'une filière de commercialisation organisée (au niveau de la collecte et de la fixation des prix), représente, dans la mesure des possibilités du marché, une culture «pivot» pour une orientation des recherches.

Cette plante est cultivée traditionnellement de manière itinérante après une jachère arborée composée d'*Acacia mearnsii*. Mais ce système tend à se sédentariser sans changement notable d'itinéraire technique : les trois-quarts des planteurs produisent le géranium en continu sur la même parcelle (GARIN, 1987).

L'abandon de la jachère pose de nombreux problèmes agronomiques.

La faible fumure et l'absence de lutte contre l'érosion entraînent une dégradation progressive de la fertilité des sols. De plus, la culture continue conduit à une prolifération des adventices et des dépérissements du géranium rosat qui concourent aussi à la diminution des rendements.

Les cultures intercalaires, peu étudiées jusque là, conservent un statut privilégié auprès de l'agriculteur et bénéficient toujours exclusivement de la fumure organique disponible.



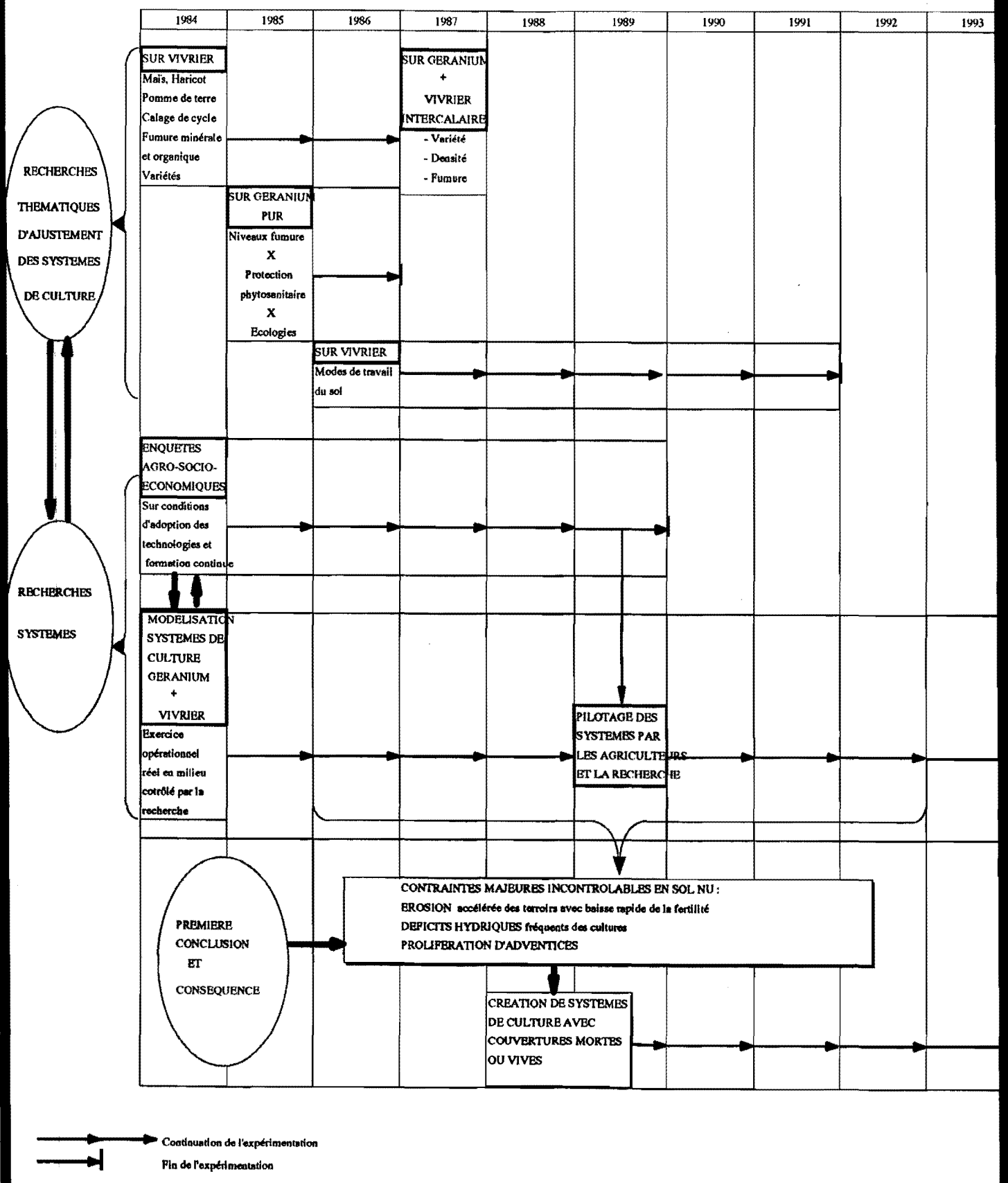


Figure 1 : Séquences d'évolution de la recherche de 1984 à 1993

La mise au point des systèmes de culture comporte une évaluation de différents modèles tirés des études thématiques antérieures (CIRAD, 1985), des enquêtes sur les itinéraires techniques pratiqués par les agriculteurs (GARIN, 1987) et sur les contraintes et les moyens de production rencontrés dans la zone (tableau 2).

Itinéraires	Traditionnel amélioré	Intermédiaire	Intensif conduit :	
			en culture pure	en culture associée
Définitions	Agriculture traditionnelle améliorée avec respect des calendriers culturaux et d'une rotation des cultures	Niveau intermédiaire sur le plan de l'intensification avec recours à une entreprise extérieure pour l'implantation des cultures en mars-avril (blocages au niveau de la main-d'oeuvre)	Agriculture intensive faisant intervenir : - l'ensemble des recommandations sûres concernant les variétés, la fumure, l'agrotechnie, - une petite mécanisation adaptée permettant un travail minimum du sol	
Rotations	Rotations du géranium (4 à 5 ans) et des cultures de diversification (haricot, maïs, tabac, pomme de terre pendant 2 à 3 ans)		ou monoculture de géranium intensif	Géranium intensif conduit avec des cultures intercalaires
Précédents culturaux	Géranium rosat en monoculture traditionnelle sédentarisée : système dégradé ayant abouti à un abandon de l'exploitation par son propriétaire			
Maîtrise de l'enherbement	Extirpation manuelle avant chaque cycle de culture	Labour annuel en mars	Traitement au glyphosate	
Amendements et fumures	Pas d'amendements minéraux		Amendements minéraux pour correction des carences	
	Fumure minérale seule pour le géranium*		Fumure minérale seule pour le géranium	
	Fumures organiques et minérales localisées lors de l'implantation des cultures de diversification en rotation**		Fumures organiques et minérales localisées pour les cultures intercalaires	

**Tableau 2** : Définition et principales caractéristiques des itinéraires techniques compatibles avec les systèmes d'exploitation rencontrés en milieu réel et étudiés en milieu contrôlé

\* Sauf dans un essai thématique «fumure organique du géranium».

\*\* Dans l'itinéraire intensif conduit en culture pure, la fumure organique a été remplacée par le mulch en décomposition jusqu'en 1986.

Les alternatives qui s'offrent à l'agriculteur sont comparées sur un terrain abandonné par son propriétaire, après culture continue du géranium rosat :

- l'abandon et le retour à la friche d'*Acacia mearnsii* pendant 10 à 15 ans, permettant de restaurer la fertilité du sol, puis de remettre en place une nouvelle culture de géranium.

Les effets de ce système traditionnel de culture itinérante seront évalués ultérieurement, lors de la mise en place de nouveaux dispositifs expérimentaux sur des parcelles voisines alors en jachère.

- la replantation du géranium en monoculture intensive,
- une diversification par des cultures associées au sein d'un géranium intensif, le géranium étant par exemple rebouturé après mise en place des cultures «intercalaires»,
- une diversification par des cultures vivrières ou maraîchères qui entrent en rotation avec le géranium.

A moyen terme, les problèmes qui se posent aux agriculteurs ne sont pas ceux de rotations de ces cultures de diversification entre elles sur de longues périodes, mais de leur faisabilité après un géranium dégradé.

Le choix des cultures étudiées comme base de diversification a été guidé à la fois par leur possibilité de commercialisation (marché potentiel, produit non périssable, ...), d'extension sur des surfaces importantes et de l'existence d'un référentiel technique issu de la recherche en station : haricot, maïs, pomme de terre et tabac.

Les itinéraires techniques comparés ont été, outre l'itinéraire manuel traditionnel amélioré :

- deux niveaux intensifs conduits en culture pure ou associée faisant intervenir l'ensemble des recommandations alors éprouvées, et conduits soit manuellement, soit avec une petite mécanisation adaptée permettant un travail minimum,
- un niveau intermédiaire entre ces deux extrêmes ayant recours à une entreprise extérieure, en particulier pour des labours, lorsque des blocages apparaissent au niveau de la main-d'oeuvre en mars-avril.

### 2.1.2. Système de culture avec couverture végétale du sol

Reprenons chronologiquement l'évolution dans la zone. L'organisation des secteurs amont et aval à la production, nécessaires à la diversification des cultures, ainsi que la transformation des structures se poursuivent. La réforme foncière, en cours, permet une évolution du mode de faire-valoir dans le sens d'un affaiblissement du colonat partiaire (il représentera moins du quart des surfaces lors du Recensement Général Agricole de 1989). Mais l'insuffisance de moyens (matière organique, main-d'oeuvre, ...) compromet encore le développement de la majorité des exploitations (BENOIT et al., 1989 ; VALY, 1989).

Ainsi, la fertilité des sols peut être restaurée progressivement, en particulier grâce à des apports de matière organique. Ceux-ci ont une action prépondérante sur le rendement des cultures, mais leur arrière effet reste limité s'ils ne sont pas renouvelés (MICHELLON, 1988). De plus, cette restauration est indissociable en sol nu d'une lutte contre l'érosion visant à maintenir les acquis par des aménagements appropriés (cordons antiérosifs, ...).

De même en sol nu, la réussite d'une culture est conditionnée généralement par une date rigoureuse de mise en place pour éviter les stress hydriques, et cela peut conduire à des périodes de pointe de travail (goulets d'étranglement).

Afin de réduire ces contraintes, des techniques avec travail minimum du sol et couverture végétale ont été développées. En effet, seule une agriculture conduite avec cette protection permanente permet de lutter contre l'érosion et d'enrichir le sol en matière organique. Elle peut aussi éviter son assèchement trop rapide par l'effet de mulch.

#### **a) Les cultures**

Les études sont réalisées par comparaison de systèmes de culture intensifs conduits soit en sol nu (actuellement diffusés chez les agriculteurs), soit avec couverture (MICHELLON, SEGUY, 1992). Ils comportent du géranium rosat en culture pure ou avec cultures intercalaires associées, ainsi que des productions qui entrent en rotation : maraîchères ou vivrières (haricot, maïs, tomate, riz ou pomme de terre), et plus récemment fourragères (avoine, chou qui s'ajoutent à la plante de couverture après récolte de la culture vivrière associée).

Pour évaluer la portée scientifique et pratique de ces modes de gestion du sol et déterminer les problèmes à résoudre en priorité, trois situations représentatives des andosols ont été retenues, dans un premier temps :

- érodé, après monoculture du géranium,
- non dégradé, après canne à sucre,
- ou restauré par la jachère d'*Acacia mearnsii*.

Elles correspondent aux précédents culturels les plus fréquemment rencontrés dans les systèmes à base de géranium : culture itinérante qui s'est progressivement sédentarisée dans la partie haute, ou rotation avec la canne à sucre dans la zone inférieure à 800 m.

#### **b) Les couvertures**

Pour l'ensemble des productions, trois modes de gestion du sol sont comparés :

- sol nu,
- couverture de graminée : kikuyu (*Pennisetum clandestinum*),
- ou de légumineuse : principalement de lotier velu Maku (*Lotus uliginosus*).

Ces deux espèces ont été retenues dans un premier temps pour la somme des qualités agronomiques qu'elles possèdent pour la protection du capital sol :

- couverture totale du sol (rhizome ou stolon),
- pérennité de la couverture,
- facilité d'implantation et de multiplication,
- facilité de contrôle soit par les animaux (alimentation fourragère), soit par les herbicides ou régulateurs de croissance,
- amélioration de la fertilité (fixation d'azote atmosphérique, ou régénération de la matière organique à turn-over rapide, conséquences sur le recyclage et la restitution des éléments minéraux, développement de la faune et de la flore associées),
- effets allélopathiques sur le potentiel semencier d'adventices du sol (SEGUY, 1992).

Lors de la mise en place, les résidus de la défriche ou de la culture précédente détruite au glyphosate (adventices, cannes et ses pailles, ...), sont soit mis en andains (cordons antiérosifs), soit conservés en place pour constituer une première couverture morte. Les plantes de couverture sont ensuite installées progressivement de façon simultanée ou non avec les cultures.

## **2.2. Dispositifs expérimentaux et suivi-évaluation agronomique**

Les différents systèmes de culture à comparer sont conduits sur des parcelles de taille suffisante permettant d'évaluer :

- l'effet des accidents climatiques (pluies torrentielles, vent violent, ...), leurs conséquences néfastes (érosion, dégradations des structures, ruissellement, ...),
- les rendements des cultures et leur stabilité ainsi que l'influence des itinéraires techniques sur la production en fonction de la variabilité du milieu,
- les temps de travaux et leur pénibilité, ainsi que le coût des intrants, les coûts de production, marges et valorisations de la journée de travail.

Le suivi agronomique des systèmes de culture porte sur l'évolution du milieu et sur les cultures.

### **2.2.1. Effet sur le milieu**

En 1984, un état initial a été effectué pour le sol.

Des analyses chimiques et les mesures de pH, avant mise en oeuvre des différents itinéraires techniques, ont été réalisées pour l'horizon de surface (0 à 20 cm), avec un échantillon tous les 250 m<sup>2</sup> environ. Les prélèvements ultérieurs effectués en 1987 devaient permettre d'établir les bilans minéraux et de suivre l'évolution du complexe absorbant et l'acidification du sol.

Des lysimètres ont été mis en place, ainsi que, pour chaque itinéraire, une case d'érosion dont le suivi a été effectué en collaboration avec l'Université.

Sur les cultures, les exportations par les récoltes sont analysées.

Cet ensemble de suivi analytique sol-cultures, extrêmement lourd et coûteux, a rapidement montré ses limites (CIRAD, 1985) : les paramètres étudiés ne sont pas pertinents sur andosol car ils n'expliquent pas la productivité des cultures et son évolution.

A partir de 1985, ces analyses ont donc été complétées par des **observations de terrain sur le profil cultural**. Elles ont intégré progressivement des analyses racinaires et structurales, des tests de terrain (infiltrométrie, ...) et de laboratoire (stabilité structurale), puis des observations sur le fonctionnement biologique et microbiologique des andosols (BURLE, 1993 ; GAUDY, 1990 ; GOUBAND, 1990 ; MICHELLON, BOYER, LAVELLE, 1994, PERRET, 1993).

Actuellement, la caractérisation de l'évolution du sol induite par des modes de gestion différenciés implique (MICHELLON, SEGUY, 1992) :

- un suivi-évaluation des caractéristiques physico-chimiques et biologiques à relier aux performances agronomiques des cultures selon les modes de gestion du sol (cartographie initiale de ces paramètres et après trois ans),
- l'étude du fonctionnement hydrodynamique superficiel (érosion) : couple infiltration-ruissellement sous pluie simulée (infiltrométrie à aspersion), paramètres hydrodynamiques intrinsèques (infiltrométrie à succion contrôlée), incidence des paramètres édaphiques superficiels et nature des ruissellements,
- l'observation *in situ* des structures physiques et biologiques des différents horizons et leur liaison avec la distribution des systèmes racinaires,
- une appréciation de l'activité microbiologique,
- l'étude du bilan hydrique des cultures : pour comparer leur utilisation de l'eau disponible (pluie + réservoir sol) en fonction de différents types ou niveaux de travail du sol.

Les données agroclimatologiques classiques étaient enregistrées par une centrale automatique CIMEL et un bac d'évaporation normalisé classe A fournit la demande évaporative du climat.

L'humidité du sol sous culture est suivie à l'humidimètre à neutrons, par humidimétrie T.D.R. et tensiométrie pour l'évaluation de la disponibilité réelle de l'eau pour les cultures.

- et le suivi de l'évolution de la flore d'adventices et de la faune.

### 2.2.2. Plantes de couverture

Les techniques d'implantation et de contrôle des plantes de couverture sont étudiées en association avec les cultures.

### 2.2.3. Cultures principales : industrielles, maraîchères ou vivrières

Les observations portent sur :

- évolution de la densité au semis ou à la plantation,
- enracinement et développement,
- contrôle du parasitisme et des adventices,
- productivité : composantes du rendement, production et variation interannuelles,
- temps de travaux et productivité de la main-d'oeuvre aux périodes critiques de l'année,
- évaluation des charges et des produits.

### III- CONDITIONS DE REALISATION

#### 3.1. Choix d'un milieu représentatif

Les sols d'origine volcanique appartiennent tous à une série homogène qui se différencie selon les conditions climatiques liées à 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 (figure 2), atténuée par les précipitations occultes. La température moyenne est de 17 °C.

Les systèmes de culture comparés pendant une décennie (sur le site de Cocâtre) ont été mis en place en 1983 après 15 ans de monoculture du géranium, ces conditions étant alors les plus représentatives de l'agriculture des Hauts de l'Ouest. En 1988, pour évaluer l'intérêt des couvertures végétales, elles ont été étendues à des sols non dégradés après canne à sucre, ou restaurés par la jachère d'*Acacia* (tableau 3).

	COCATRE	MERCHER	POTHIN	TAURAN
Emplacement	Trois-Bassins			La Saline
Altitude en m	1000	1100	800	1100
Année de mise en place	1984	1988		
Précédent	Géranium abandonné (monoculture)	<i>Acacia mearnsii</i>	Canne à sucre	Géranium abandonné (jachère herbacée récente)
Sol	Andosol érodé, désaturé, non perhydraté	Andosol restauré par la jachère, désaturé, non perhydraté	Andosol non dégradé, saturé, non perhydraté	Andosol érodé, désaturé, non perhydraté
Amendements pratiqués lors de la mise en place	250 unités de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha (phosphate naturel) seulement pour les itinéraires intensifs	150 unités de K <sub>2</sub> O (chlorure) et 1000 kg/ha de CaO (chaux magnésienne à 19 % de MgO)	Aucun	150 unités de K <sub>2</sub> O (chlorure) et 1000 kg/ha de CaO (chaux magnésienne à 19 % de MgO) 5 t/ha de compost de géranium

**Tableau 3** : Situations choisies



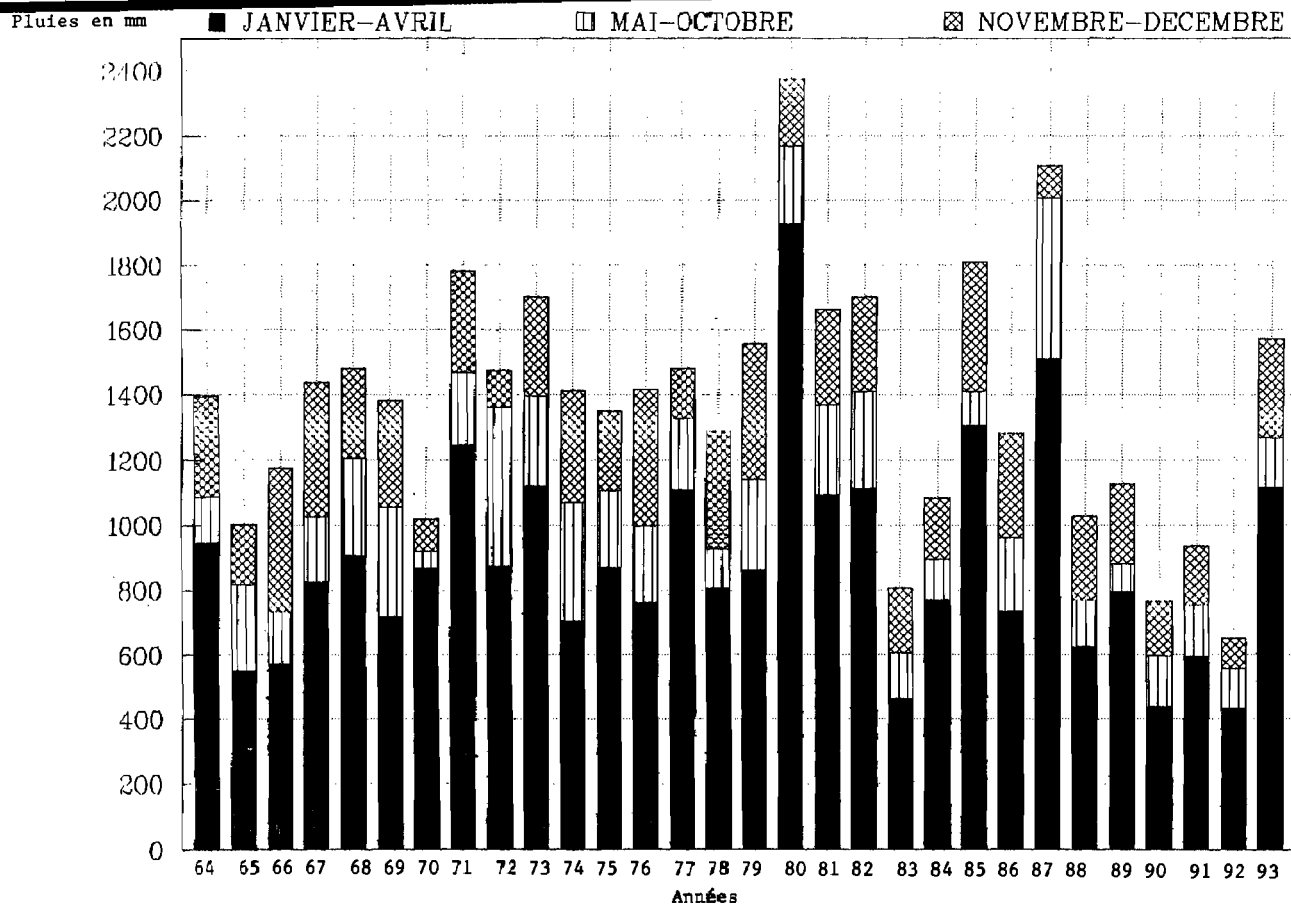


Figure 2 : Pluviométrie annuelle enregistrée sur la station des Colimaçons (altitude 780 m)

### **3.2. Conditions de réalisation**

Les conditions de réalisation lors de la mise en place du dispositif ont été décrites en 1985, ainsi que les itinéraires alors mis en oeuvre (CIRAD, 1985).

Les successions en cultures pures ou intercalaires testées depuis cette époque à Cocâtre sont données dans le tableau 4.

Les alternatives comparées pour le géranium comportent simultanément les systèmes de culture mis au point en sol nu, depuis plus de 30 ans (MICHELLON, 1978 ; MICHELLON, HEBERT, GARIN, 1986 ; APR et al., 1992), et les nouvelles propositions élaborées par la recherche (depuis 1988) dans un environnement protégé (tableau 5).

Les itinéraires techniques décrits dans le tableau 6 sont actuellement éprouvés en sol nu et demanderont probablement quelques modifications dans les systèmes avec couverture végétale.

Pour disposer de matériel génétique suffisamment homogène, le cultivar de géranium «rosé», le plus répandu, a été choisi et multiplié par des boutures saines. Sa densité a été maintenue par remplacement annuel des plantes manquantes.

Pour évaluer la productivité du géranium dans les 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 mondialement réputée pour sa qualité (Géranium «Bourbon») a été analysée par chromatographie en phase gazeuse (DEMARNE, MICHELLON, 1994).

## **IV- LES CONSEQUENCES DU MODE DE GESTION DU SOL SUR LE RENDEMENT DES CULTURES, EN PARTICULIER DU GERANIUM ROSAT**

### **4.1. Evolution du système de culture traditionnel**

Traditionnellement, le géranium est une culture itinérante sur défriche d'*Acacia mearnsii* dans la partie haute (GARIN, 1987). Il entre en rotation avec la canne à sucre à une altitude inférieure à 800 m. Les durées de cycle sont normalement de 10 à 17 ans, suivant l'espérance de vie de ces plantes pérennes :

- canne à sucre 5 à 7 ans, géranium 5 à 7 ans,
- friche d'*Acacia* 10 ans, géranium 5 à 7 ans.

Le champ de géranium n'est pas conduit de façon homogène, principalement en raison de la présence de cultures associées, destinées à l'autoconsommation. Elles déterminent des tâches dans la parcelle selon leur intérêt : cultures associées ponctuelles (sur les résidus de sarclage), couvrantes (zones trop abruptes en bords de ravines), concentrées autour de l'alambic, ou intercalaires.

Du fait de l'enclavement des parcelles, les transferts entre le champ et l'extérieur sont réduits. Durant les deux premières années de culture, les intrants sont inexistantes. A partir de la troisième année, la fumure minérale croît avec l'âge de la plantation pour tenir compte de la baisse de fertilité des sols. Celle-ci ne semble pas due à un bilan minéral

Précédent cultural	Année Cycle Itinéraires	Année 1 : 1984		Année 2 : 1985		Année 3 : 1986	
		1er cycle	2ème cycle	1er cycle	2ème cycle	1er cycle	2ème cycle
Géranium dégradé abandonné	Traditionnel amélioré	Pomme de terre / ) Maïs ( Haricot I		Haricot D et I / Pomme de terre		Géranium rosat pur	
		Tabac / ) Maïs ( Haricot I		Pomme de terre / Maïs		Haricot D et I / Pomme de terre	
		Haricot D et I / ) Maïs ( Haricot I		Tabac / Jachère		Pomme de terre / Maïs	
		Haricot D et I / Pomme de terre		Haricot D et I / Jachère		Tabac / Jachère	
	Intermédiaire ou intensif	Pomme de terre / Maïs		Haricot D / Pomme de terre		Géranium rosat pur	
		Tabac / Maïs		Pomme de terre / Maïs ou Riz		Haricot D / Pomme de terre	
		Haricot D / Maïs Haricot D / Pomme de terre		Tabac / Riz ou Dolique Haricot D / Maïs ou Dolique		Pomme de terre / Maïs Tabac / Maïs	
	Intensif	----- Géranium pur -----					
	Intensif avec géranium en culture associée	( Pomme de terre / ) Maïs ( Haricot		Haricot D / Maïs		Haricot D / Maïs	
		----- Géranium rosat -----					
( Tabac / ) Maïs ( Haricot I			Haricot D /	Suite à l'effet dépressif du tabac, le géranium a été conduit pur sans intercalaire à partir de 1985			
----- Géranium rosat -----							
( Haricot / ) Maïs ( Haricot I			Haricot D / Riz		Haricot D / Maïs		
----- Géranium rosat -----							
----- Géranium rosat associé au pêcher intensif -----							
----- Géranium rosat associé au pêcher de plein vent -----							

**Tableau 4 :** Successions testées

**Remarques :** Haricot D ou I : respectivement à croissance déterminée ou indéterminée  
Les cultures associées sont notées par exemple )Maïs / (Haricot celles qui se succèdent au cours de la même année Tabac/Maïs (tandem)  
(Haricot

Année Cycle	Année 1 : 1987		Année 2 : 1988		Année 3 : 1989	
	1er cycle	2ème cycle	1er cycle	2ème cycle	1er cycle	2ème cycle
Itinéraires  Traditionnel amélioré			Géranium rosat pur		Géranium rosat pur	
	Haricot D et I / Pomme de terre		Géranium rosat pur		Géranium rosat pur	
	Pomme de terre / Maïs		Haricot D et I / Pomme de terre		Haricot D et I / Géranium avec couverture végétale (lotier)	
Intermédiaire ou intensif	Haricot D / Pomme de terre		Géranium rosat pur		Géranium rosat pur	
	Pomme de terre / Maïs		Haricot D / Pomme de terre		Haricot D / Géranium avec couverture végétale (kikuyu ou lotier précédé de pomme de terre)	
Intensif	Géranium rosat pur					
Intensif en culture pure ou associée	( Haricot D / Maïs		Haricot D / Maïs		Haricot D	
	( Géranium rosat					
	Suite à l'effet dépressif du tabac, le géranium a été conduit pur sans intercalaire à partir de 1985				Haricot D / Pomme de terre	
	( Haricot D / Maïs		Haricot D / Maïs		Haricot D	
	( Géranium rosat					
	Géranium rosat associé au pêcher intensif					
	Géranium rosat associé au pêcher de plein vent					

Tableau 4 (suite 1)

Année Cycle	Années 7 et 8 : 1990 et 1991		Année 9 : 1992		Année 10 : 1993	
	1er cycle	2ème cycle	1er cycle	2ème cycle	1er cycle	2ème cycle
Itinéraires Traditionnel amélioré	Géranium rosat pur		Pomme de terre / Maïs		Haricot / Pomme de terre	
	-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----		Pomme de terre / Maïs (avec couverture de légumineuse)	
	-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----	
	-----Géranium rosat avec couverture végétale (lotier)-----		-----Géranium rosat avec couverture végétale (lotier)-----		-----Géranium rosat avec couverture végétale (lotier)-----	
Intermédiaire ou intensif	Géranium rosat pur		Pomme de terre / Maïs		Haricot / Pomme de terre	
	-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----		Pomme de terre / Maïs (avec couverture de légumineuse)	
	-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----	
	-----Géranium avec couverture végétale (kikuyu ou lotier)-----		-----Géranium avec couverture végétale (kikuyu ou lotier)-----		-----Géranium avec couverture végétale (kikuyu ou lotier)-----	
Intensif	-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----		-----Géranium rosat pur-----	
Intensif en culture pure ou associée au géranium	( Haricot D		Haricot D		Haricot D	
	( Géranium		-----Géranium avec couverture d'arachide pérenne-----		-----Géranium avec couverture d'arachide pérenne-----	
	Haricot D / Pomme de terre ou maïs		-----Géranium avec couverture d'arachide pérenne-----		-----Géranium avec couverture d'arachide pérenne-----	
	( Haricot D		Haricot D		Haricot D	
	( Géranium		-----Pêcher intensif avec couverture de lotier-----		-----Pêcher intensif avec couverture de lotier-----	
	-----Pêcher de plein vent avec intercalaire (haricot, ...)-----		-----Pêcher de plein vent avec intercalaire (haricot, ...)-----		-----Pêcher de plein vent avec intercalaire (haricot, ...)-----	

Tableau 4 (suite 2)

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

**Tableau 5** : Les systèmes de culture comparés

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 ( <i>Cratopus humeralis</i> ) 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



particulièrement déséquilibré, du fait de la restitution de la quasi totalité des résidus de la distillation (sauf pour le calcium et la potasse, lessivés dans le tas de compost). Elle serait la conséquence de l'absence de lutte contre l'érosion en présence de plantes sarclées.

Cette dégradation de la fertilité s'accompagne d'un accroissement des dépérissements et de l'enherbement. Les espèces vivaces deviennent prépondérantes ; les temps de sarclage augmentent, alors que la production chute. La baisse de productivité du travail conduit ainsi, au bout de quelques années, à la mise en culture d'une nouvelle parcelle et à la mise en jachère de l'ancienne.

Mais ce système traditionnel de culture itinérante s'est marginalisé avec une sédentarisation progressive des surfaces cultivées en raison d'une augmentation de la pression foncière : en 1983, près des trois quarts des planteurs produisent le géranium en permanence sur la même parcelle.

#### **4.2. Le système dégradé en monoculture**

L'évolution vers ce système non reproductible découle de différentes contraintes : structurelles (taille de l'exploitation, mode de faire-valoir, enclavement, ...), financières et, souvent d'un manque de formation technique.

Les modifications des pratiques découlent de ces problèmes :

- les apports des engrais minéraux sont réduits,
- les cultures associées concurrencent le géranium au moment du remplacement annuel des manquants,
- les adventices ne sont plus maîtrisées, en l'absence de jachère arborée et de traitements herbicides ; la productivité de la main-d'oeuvre devient très faible.

La dégradation de la fertilité et les problèmes phytosanitaires qui conduisent à l'abandon de la parcelle en système traditionnel, s'accroissent. La fertilisation minérale est supprimée, les cultures associées deviennent prépondérantes, le géranium se raréfie.

A un certain seuil, il ne peut même plus fournir suffisamment de compost pour les associations ; le planteur maintient alors une densité de géranium minimale (5 000 à 10 000 plants par ha).

Depuis plus de 10 ans, la production totale d'huile essentielle de la Réunion chute inexorablement, atteignant alors un minimum de 32 t en 1983. L'existence d'une place pour l'huile essentielle de géranium Bourbon de 50 à 60 t sur le marché international et la possibilité de faire apparaître, avec une relative facilité, des gains de productivité au niveau des modes culturels permettent d'envisager un programme de relance de cette production (DDA, 1984). L'ensemble des partenaires du développement se retrouve associé aux agriculteurs : organismes d'aménagement foncier, de financement, de vulgarisation, de formation, de recherche et coopératives.

Prêts et subventions devraient permettre aux producteurs de restaurer la fertilité de leur sol (amendements minéraux en fonction d'analyses systématiques et fumures minérales) et de la maintenir (cordons antiérosifs), puis d'intensifier leur culture de géranium (plantation en courbe de niveau à une densité élevée, traitements fongicides contre l'antracnose, herbicides, ...). Ces recommandations techniques découlent des essais thématiques antérieurs conduits dans des systèmes de culture différents de ceux alors rencontrés dans le milieu (MICHELLON, BRIDIER, 1988).

En 1987, trois ans après la mise en place du Plan de Relance du Géranium, les terrains replantés avoisinent les 1000 ha, soit plus de la moitié de la surface totale. Mais la production atteint son niveau le plus bas (16 t) jamais enregistré. Dans les Hauts de l'Ouest où la monoculture est quasi généralisée, le rendement moyen est de 7 kg par ha (GIGNOUX, 1987). Les résultats obtenus à l'échelle de cette région sont du même ordre que ceux de la parcelle que nous avons installée après 15 ans de monoculture.

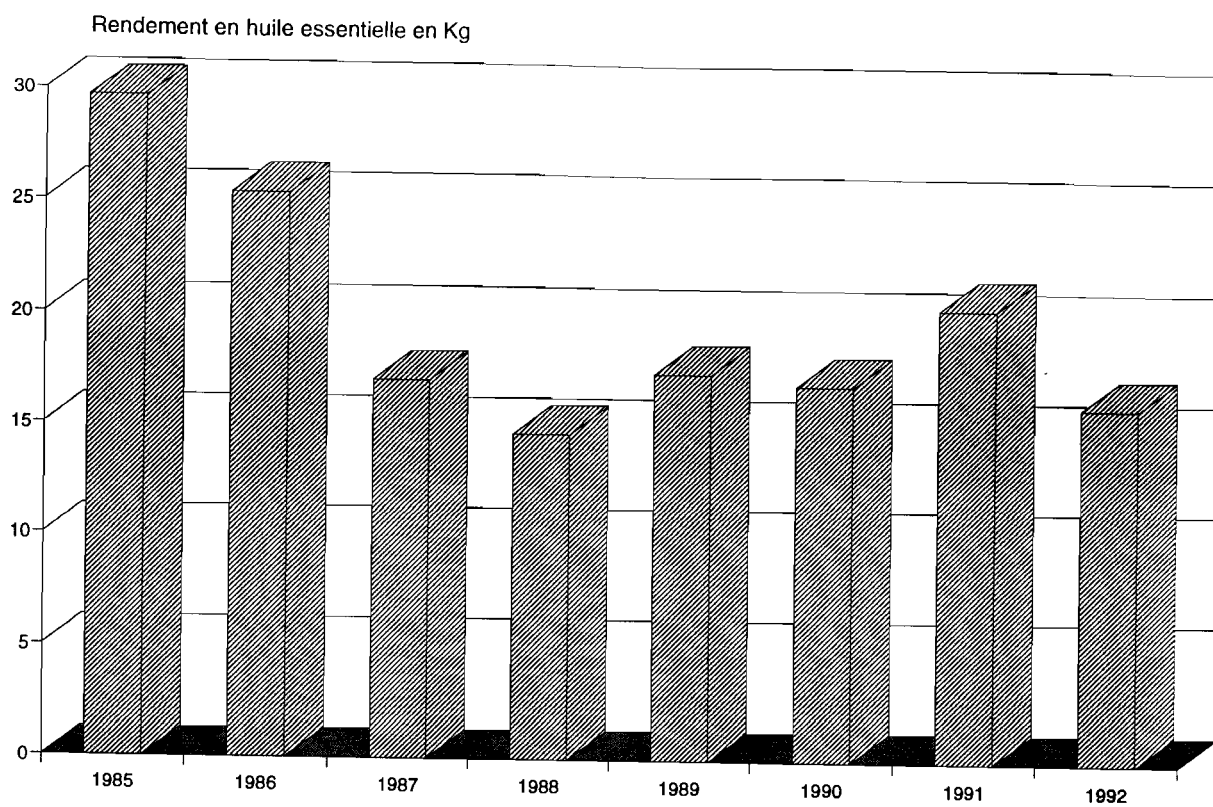
Dans nos expérimentations, sur un terrain érodé, la replantation d'un géranium en culture pure, sans rotation, ne permet pas d'augmenter très sensiblement sa productivité. Même avec un itinéraire intensif comportant des doses d'engrais et amendements minéraux dont l'intérêt a été mise en évidence après de nombreux essais thématiques et tests (MARIOTTI, 1952 ; FRITZ, 1973 ; MICHELLON, 1986), les rendements restent faibles (moins de 20 kg par ha en moyenne, figure 3). Ils sont inférieurs de moitié à ceux d'un géranium implanté après la défriche de l'*Acacia mearnsii* (figure 4). Mais cette production obtenue après jachère sous-estime nettement les potentialités de ce milieu, en raison des conditions d'exploitation très difficiles qui reflètent bien les contraintes des rares terrains encore en friche (accès coupé en saison cyclonique, ....).

Le maintien d'une densité de culture élevée constitue l'un des facteurs essentiels qui conditionnent le rendement.

Les dépérissements apparaissent comme les principaux agents de mortalité, qui est très élevée en monoculture. Ils sont dénommés «maladie de la terre» par les agriculteurs, et sont dus essentiellement :

- au flétrissement bactérien, *Pseudomonas solanacearum*, biotype 1,
- et aux deux pourridiés, *Armillaria heimii* et *Rosellinia necatrix* (BACONNIER, 1988).

Malgré un taux de remplacement élevé des manquants, la plupart des plantes dépérissent peu de temps après leur plantation (tableau 7).



**Figure 3** : Evolution de la production du géranium en monoculture sur sol dégradé

Huile essentielle en kg/ha/an

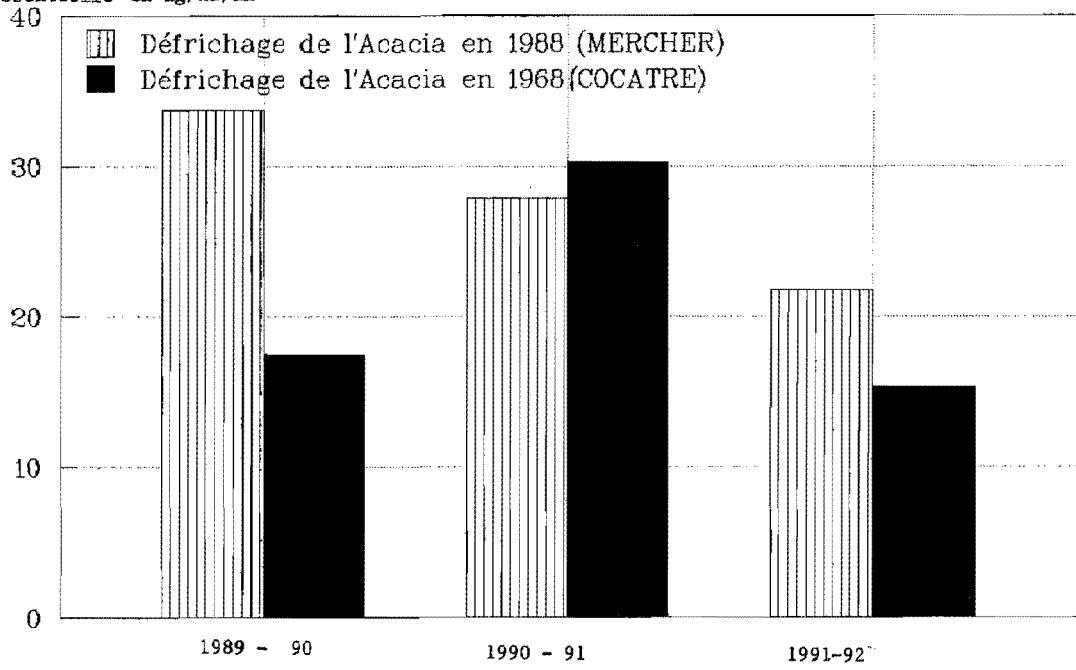


Figure 4 : influence de l'âge de la parcelle de géranium sur sa productivité en monoculture

Année	Monoculture	Culture avec intercalaire	Géranium en rotation
1984-1985	48	59	-
1985-1986	60	29	-
1986-1987	20	18	18
1987-1988	45	34	6
1988-1989	51	55	29
1989-1990	53	28	16

**Tableau 7** : Influence du système de culture sur le taux annuel de remplacement du géranium, nécessaire au maintien de la densité initiale de plantation.

Il a été replanté après un géranium dégradé en mai-juin 1984, ou 1986 après rotation (pomme de terre/maïs, suivi de haricot/pomme de terre). Les cultures intercalaires sont haricot et maïs (ou riz en 1985-1986), puis haricot seulement en mars, les années suivantes.

De plus, aucune modification à court terme ne semble apportée par la présence des lignes antiérosives composées alors de Bana grass (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoides*) et disposées tous les 3 m d'altitude (sur des pentes voisines de 20 %). De nombreux agriculteurs, qui ne valorisaient pas les végétaux plantés sur les cordons antiérosifs, mis en place grâce à des subventions, ont d'ailleurs supprimé ces protections qui leur apparaissent plutôt comme une gêne.

### **4.3. Systèmes diversifiés à base de géranium**

#### **4.3.1. La matière organique**

En zone érodée, les apports organiques ont une action prépondérante sur le rendement des cultures, en particulier des vivrières, qui conservent un statut privilégié auprès des agriculteurs et bénéficient presque toujours exclusivement de ces restitutions. Ils permettent de régulariser leur production, malgré les incertitudes climatiques et la variabilité de la fertilité du sol.

Ainsi, dans certaines zones érodées, les rendements restent très faibles quelle que soit la culture, sauf si l'itinéraire technique mis en oeuvre est proche des pratiques traditionnelles. Une implantation avec un travail minimum du sol et un apport de matière organique permet alors d'obtenir des productions pratiquement égales à celles des terres moins érodées (tableau 8).

Mode d'implantation	Fumure localisée pour le haricot	Emplacement	Poids de grain par plante (g)	Densité en millier de plantes par ha	Rendement (q/ha)
Labour puis semis après sillonnage	40-80-80 + 5 t par ha de compost de géranium	Erodé	2,9	98	2,8
		Peu érodé	9,4	99	9,0
Semis direct mécanisé	60-120-120	Erodé	2,8	93	2,6
		Peu érodé	8,6	144	12,4
Semis après sillonnage direct en intercalaire de géranium	25-50-50 + 3 t par ha de compost de géranium	Erodé	11,0	44	4,8
		Peu érodé	13,8	46	6,3

**Tableau 8** : Interaction entre l'état structural du sol et l'itinéraire technique sur les composantes du rendement du haricot (COCATRE, 1984)

Cet intrant avait été considéré comme secondaire par la recherche sur des terrains très riches en matière organique (plus de 10 %). Pour le haricot, ces apports localisés au semis sont indispensables dans les zones érodées (tableau 8). Mais ils permettent aussi d'accroître sensiblement les rendements de la pomme de terre (tableau 9).

Compost de géranium	Sans	5 t	10 t	20 t	Moyenne
Fumure minérale :					
600 kg de 10-20-20/ha	8,0	9,9	10,1	11,7	9,9
1200 kg de 10-20-20/ha	6,3	13,1	14,3	15,0	12,2
Moyenne	7,2	11,5	12,2	13,4	11,1

**Tableau 9** : Influence de la fumure organique et minérale sur le rendement en t/ha de tubercules commercialisés de pomme de terre sur un sol érodé (Tan-Rouge, altitude 950 m)

Les effets de l'engrais et du compost sont significatifs et libres d'interaction. La réponse aux doses de compost est ajustable à une courbe du second degré (C.V. = 25 %, ETM = 1,2 t/ha).

La matière organique localisée en faibles quantités présente, lorsqu'elle n'est pas renouvelée, une action limitée sur la culture suivante. Ses effets cumulés permettent de restaurer la fertilité, après au moins 2 ans de culture en rotation.

#### 4.3.2. Les intercalaires

Le géranium assure un approvisionnement aisé et peu onéreux en matière organique grâce aux résidus de sa distillation (de 4 à 30 t de compost/ha/an à 22 % de matière sèche pour des rendements de 10 à 75 kg d'huile essentielle/ha/an).

Dans les systèmes comprenant des cultures vivrières intercalaires, les apports réguliers de compost destinés aux plantes vivrières, augmentent très sensiblement la productivité du géranium associé (figure 5).

Ainsi, en itinéraire comportant une fumure minérale élevée, le rendement du géranium associé apparaît doublé dès la deuxième année d'exploitation par rapport à une culture pure, dont la production se dégrade.

L'aspect sanitaire est amélioré : la mortalité apparaît très nettement diminuée en culture intercalaire avec restitution de matière organique dans les interlignes (tableau 7).

Ce système est bien adapté aux exploitations dont la surface est limitée mais qui bénéficient d'un accès au marché. Les intercalaires permettent d'augmenter la productivité du sol et la valorisation des journées de travail, 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).

L'association d'une culture industrielle, le tabac, parfois mise en place par les agriculteurs, a aussi été expérimentée. Après un géranium abandonné, cette association s'est avérée particulièrement salissante (CIRAD, 1985) et défavorable au géranium, dont la reprise et le rendement ont été très sensiblement affectés en première année (figure 5).

Parmi les espèces fruitières, le pêcher est le plus souvent implanté dans la zone, fréquemment en culture associée. L'association avec le géranium assure un revenu monétaire aux agriculteurs pendant l'installation du pêcher (nécessaire malgré une production très précoce sous les tropiques). Mais son intérêt semblait cependant compromis par la présence de nombreux ennemis communs aux deux plantes et, en particulier : les pourridiés, la cochenille du murier, *Pseudaulacaspis pentagona*, et des charançons, dont l'espèce la plus nuisible est *Cratopus humeralis*.

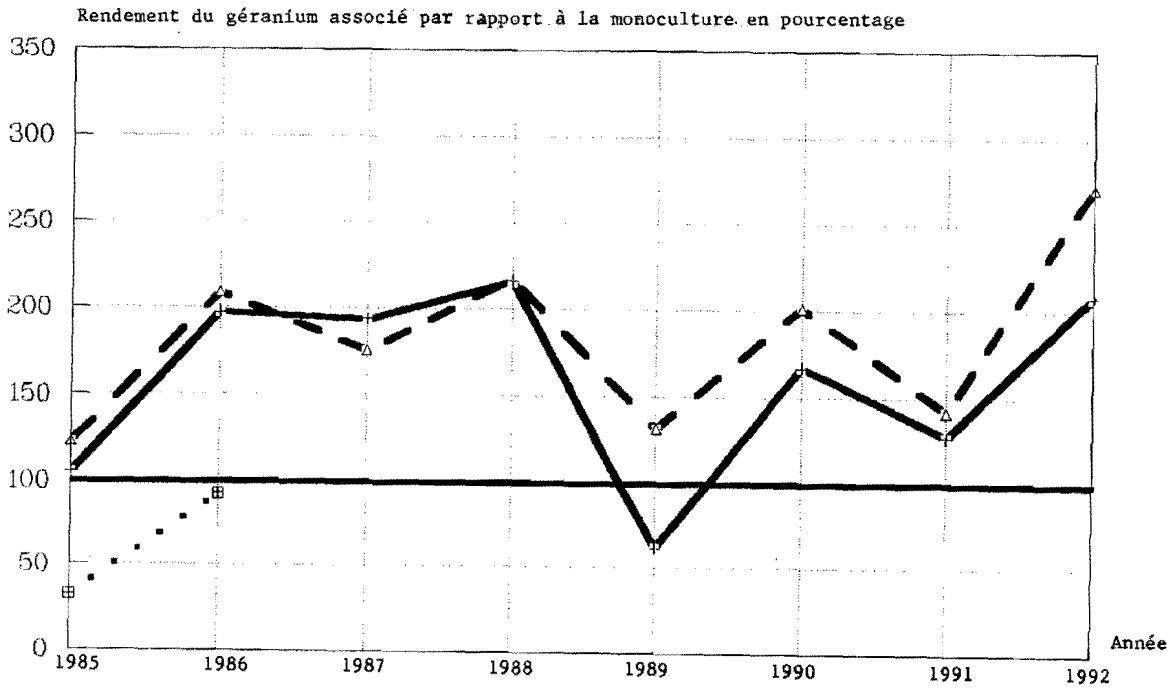
Ces craintes ne se sont pas avérées fondées (figure 6) :

- les rendements du pêcher intensif sont équivalents à ceux observés en culture pure dans la même zone (IRFA, 1988), tandis que ceux du géranium associé ne sont pas très sensiblement affectés par rapport à la monoculture pendant les quatre premières années (malgré une densité réduite de moitié).
- l'implantation d'un verger de plein vent, d'un investissement moins considérable, dans une culture de géranium intensive, permet d'obtenir une production d'huile essentielle équivalente à celle d'une culture pure (pendant 5 à 6 ans) avec un rendement en pêches nettement réduit (divisé par 4).

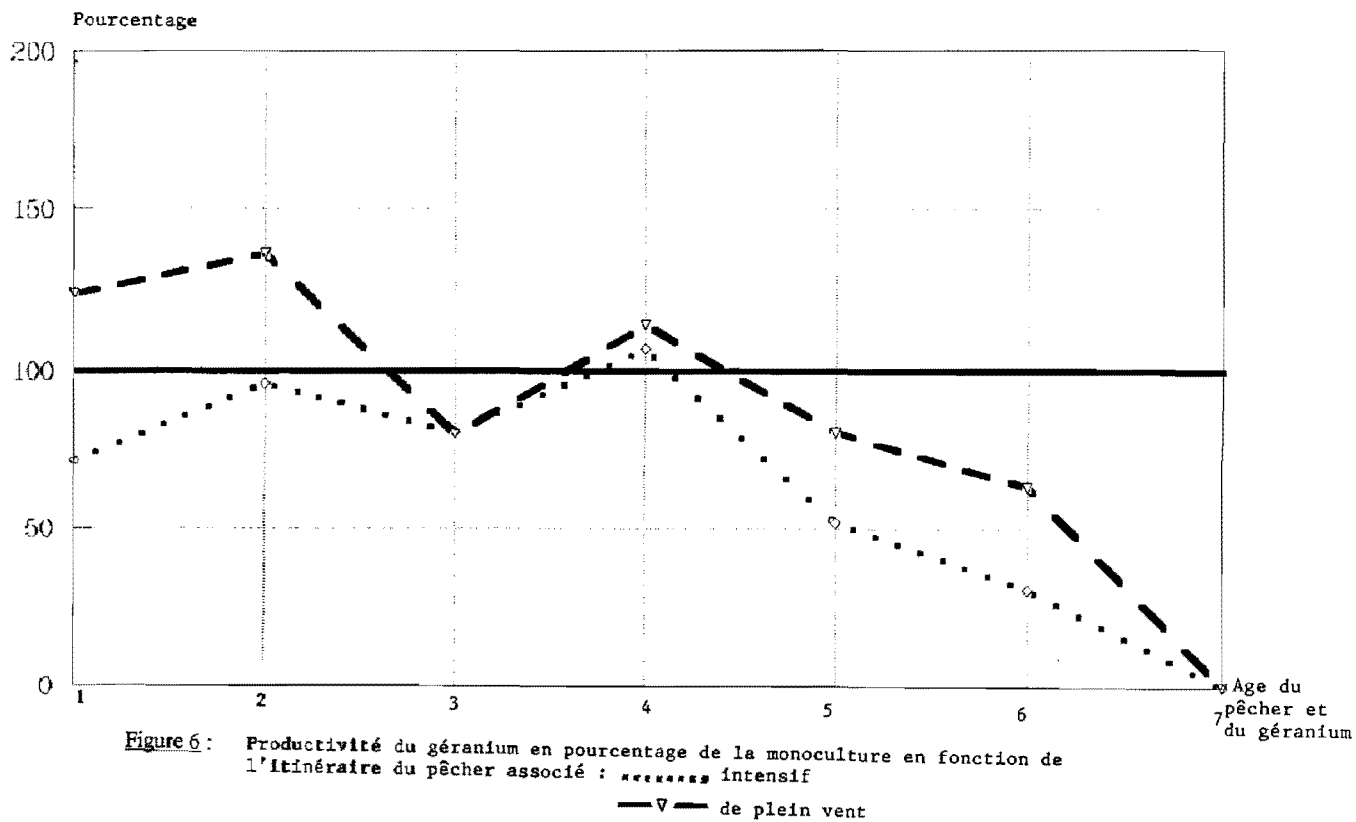
L'intérêt des cultures intercalaires vivrières dans le géranium se généralise à l'ensemble des situations caractéristiques des andosols retenues (figure 7) :

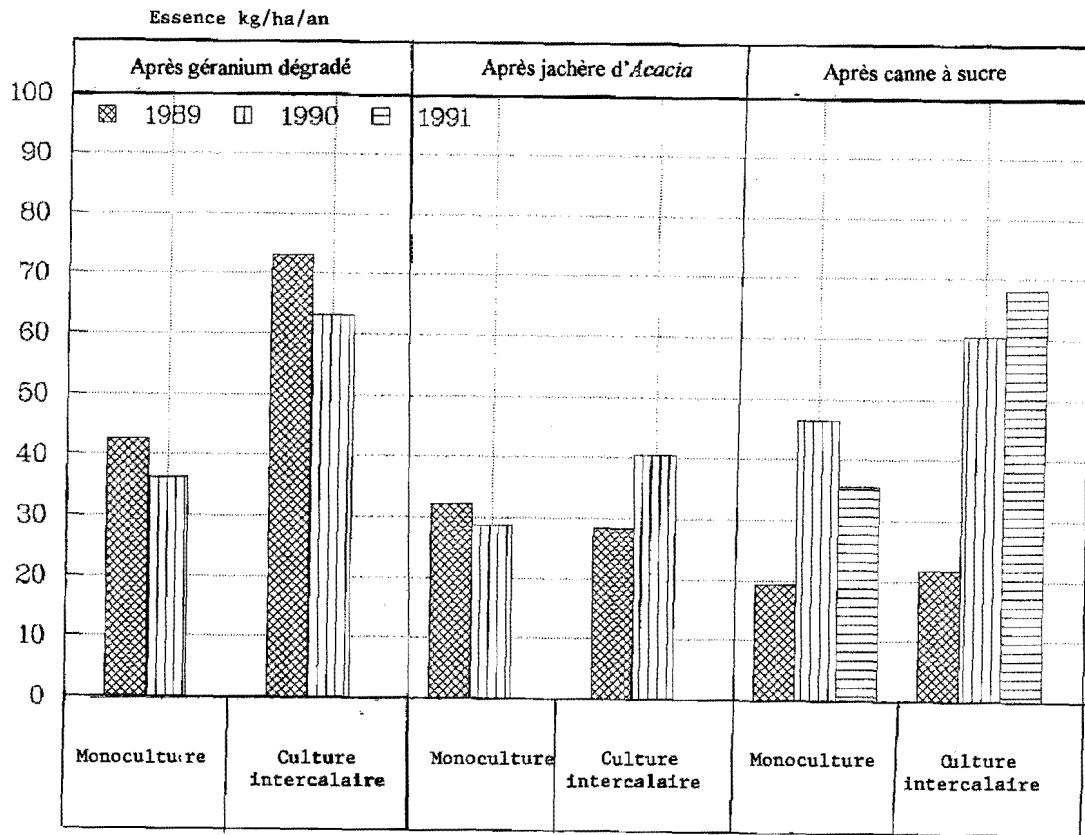
- il se confirme après un géranium dégradé envahi par une jachère herbacée, où les apports de matière organique conduisent à une production non négligeable sur l'ensemble des traitements (40 kg/ha d'huile essentielle en culture pure et plus de 60 kg/ha avec culture intercalaire),





**Figure 5 :** Influence des intercalaires sur la productivité du géranium associé exprimé en pourcentage du rendement du géranium conduit en monoculture (base 100)  
 Intercalaire de vivier ----- haricot et maïs (ou riz en 1985-86), puis haricot seul tous les ans  
 ——— pomme de terre puis maïs et haricot, ou haricot seul tous les ans  
 Intercalaire de culture industrielle ..... tabac puis maïs et haricot





**Figure 7** : Influence des cultures intercalaires sur la productivité du géranium implanté en trois situations représentatives : géranium abandonné (TAURAN), après jachère d'*Acacia* (MERCHER) ou canne à sucre (POTHIN)

- après jachère d'*Acacia*, les cultures intercalaires ne sont pas pratiquées par les agriculteurs lors de l'installation du géranium (GARIN, 1984). Elles ne présenteraient un intérêt que les années suivantes, accompagnées de restitutions organiques (année 1990),
- à une altitude inférieure, en rotation avec la canne à sucre, l'augmentation du rendement du géranium associé à des cultures vivrières est aussi très nette dès la deuxième année d'exploitation (40 kg/ha d'huile essentielle en culture pure et plus de 60 kg/ha avec culture intercalaire).

#### 4.3.3. Les rotations

Chez les agriculteurs qui bénéficient des structures d'exploitation les plus favorables, les rotations culturales permettent d'augmenter très sensiblement la production du géranium et d'améliorer la qualité de son huile essentielle (DEMARNE, MICHELLON, 1994). Ainsi, après deux ans de rotation, les rendements en expérimentation apparaissent très supérieurs à ceux d'une monoculture même avec une fumure seulement minérale (doublement de la production, figures 8 et 12). En outre, lorsque les précédents culturaux reçoivent des apports de compost, le rendement du géranium qui leur succède après 3 ans apparaît incomparablement accru (passant de 17 à 61 kg d'huile essentielle/ha/an, figure 12).

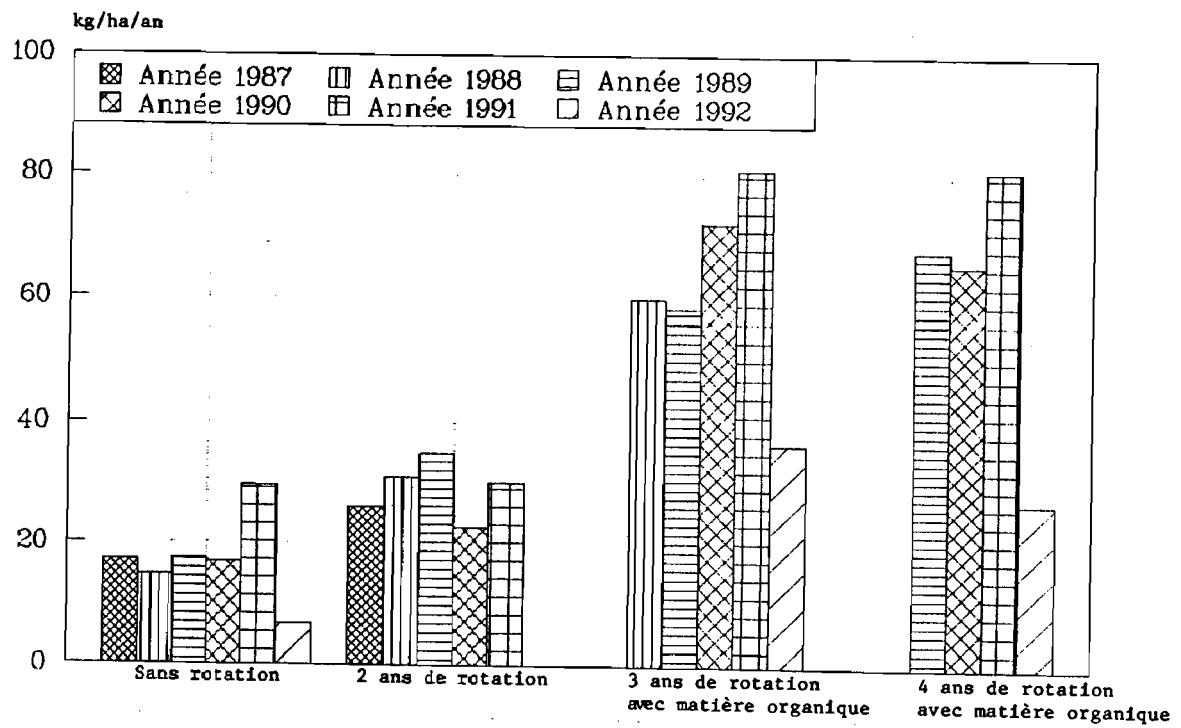
Pour préciser les quantités de «fumier» à apporter au géranium inclus dans des rotations avec fumure organique, un essai de doses croissantes a été mis en place sur le géranium conduit selon les différents itinéraires comparés. Après 3 ans de restitutions régulières, à raison de deux applications annuelles (voisines de 5 t par ha), la réponse à des nouveaux apports apparaît peu marquée pour le géranium :

- ni selon les itinéraires techniques (même lorsque l'apport de matière organique sur le précédent a été limité à une année seulement, comme avec travail minimum du sol),
- ni selon les années (figure 10).

L'importance de la réponse du géranium à l'«effet matière organique» mis en évidence dans les comparaisons de systèmes de culture avec intercalaire ou après rotation par rapport à la monoculture sans rotation, conduit à supposer que la méthode utilisée dans cet essai thématique biaise les résultats. Malgré l'absence d'apport de terre par l'érosion, la taille des parcelles élémentaires (moins de 15 m<sup>2</sup> avec des bordures réduites) apparaît très insuffisante pour que l'effet des traitements s'y cantonne : le fumier interagit avec l'activité des racines, de la faune et des microorganismes du sol (voir paragraphe 4.3.) qui ne s'arrêtent pas aux limites des parcelles.

Les dépérissements dus aux pourridiés et au flétrissement bactérien, qui conduisent à des remplacements très importants en monoculture sont réduits dans les systèmes avec intercalaires. Ils apparaissent encore plus faibles pour les plantations effectuées après rotation (tableau 7).

Les rotations sont aussi réalisées en système traditionnel, au sein même de la parcelle de géranium, lorsque les dépérissements s'étendent. Des cultures vivrières sont alors mises en place dans les zones laissées vacantes par le géranium. Après cette rotation, la production du géranium, obtenue sans traitement phytosanitaire et une fumure réduite, apparaît supérieure à celle de la monoculture intensive (figure 11).



**Figure 8 :** Evolution du rendement du géranium conduit en culture pure intensive et travail minimum du sol avec ou sans rotation (Cocâtre)

La parcelle après 2 ans de rotation est récoltée mécaniquement, mais ce mode d'exploitation est...

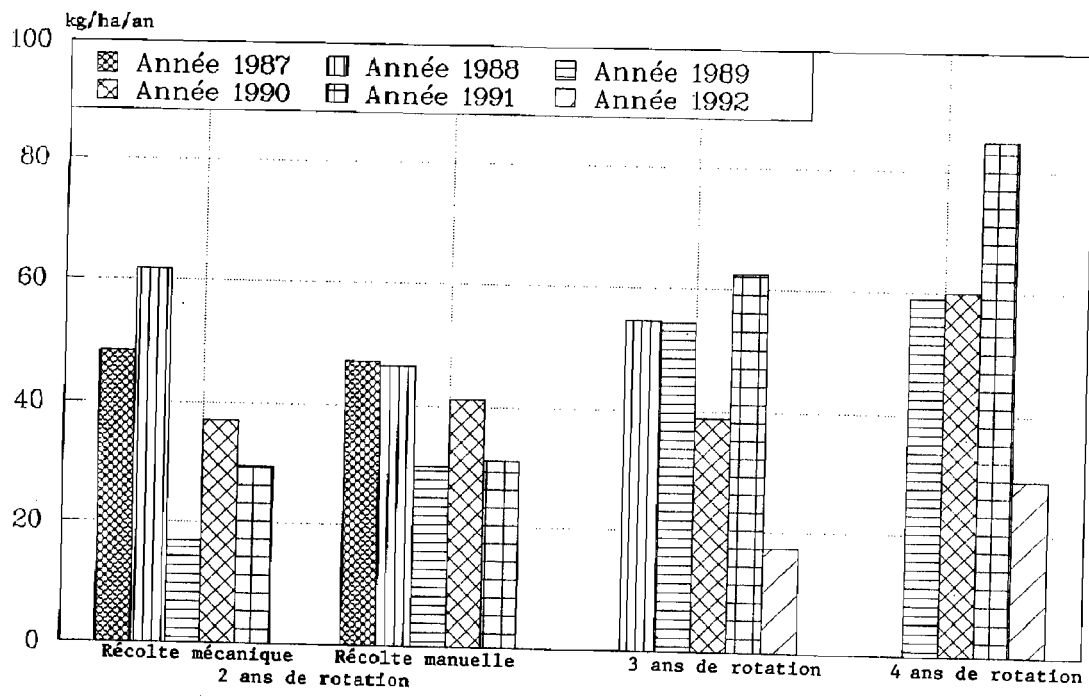
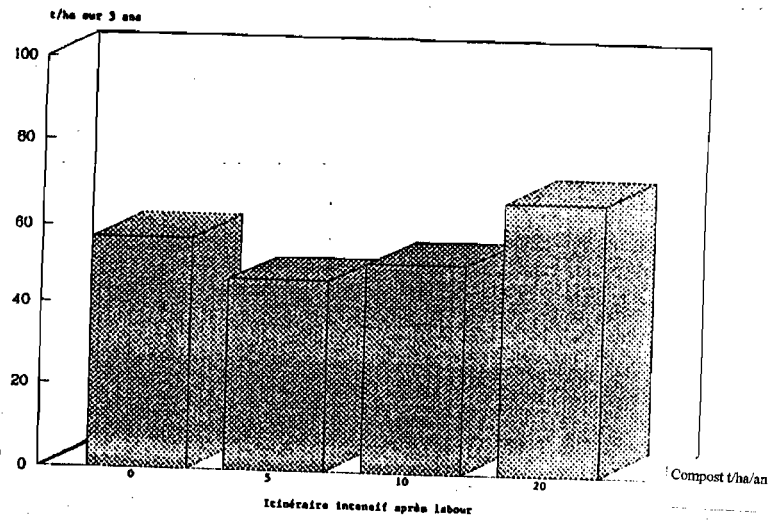
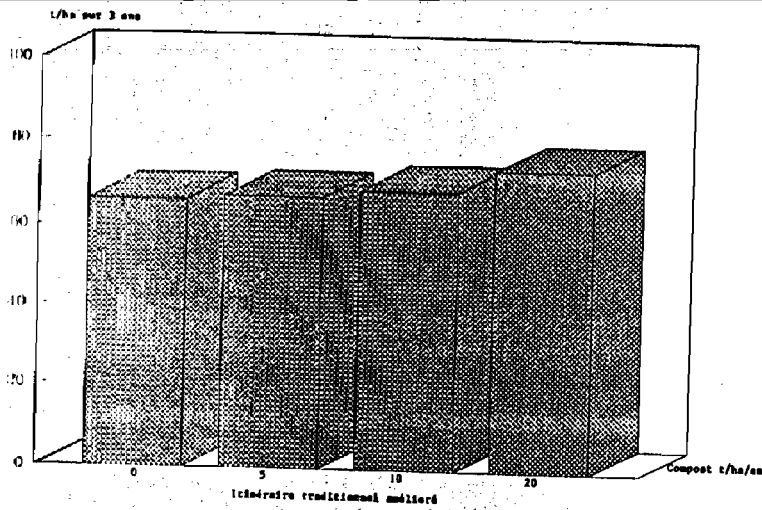


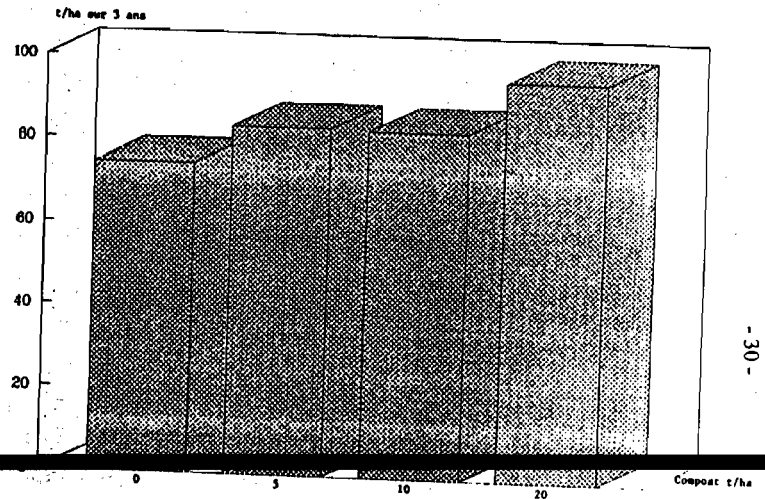
Figure 9 : Evolution du rendement du géranium conduit en culture pure intensive après labour selon la durée de rotation (Cocâtre)



**Figure 10 :** Effet d'apports croissants de compost de géranium sur le rendement en matière verte du géranium :

Les rendements ne sont pas significativement différents : ni selon les itinéraires : traditionnel amélioré (C.V. = 11 %), intermédiaire ou intensif après labour (C.V. = 32 %), intensif avec travail minimum du sol (C.V. = 13 %), ni selon les années (C.V. = 8 % l'année 1, 10 % l'année 2 et 12 % l'année 3).

Les effets des traitements apparaissent seulement significatifs au seuil 5 % dans l'analyse globale (C.V. = 7 % ; ETR = 4,8)





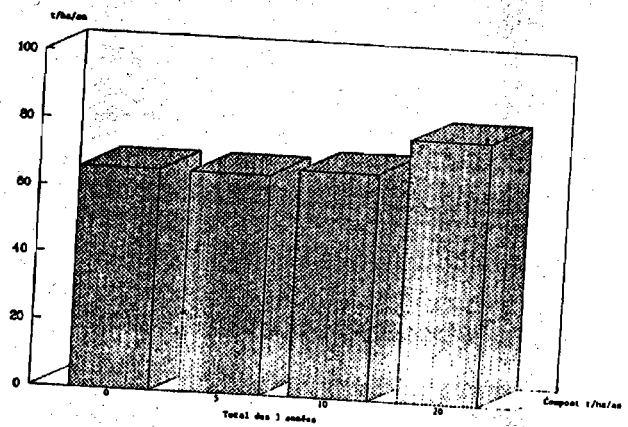
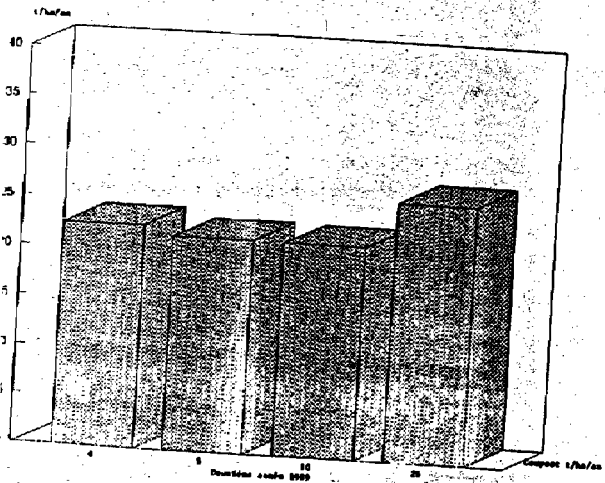
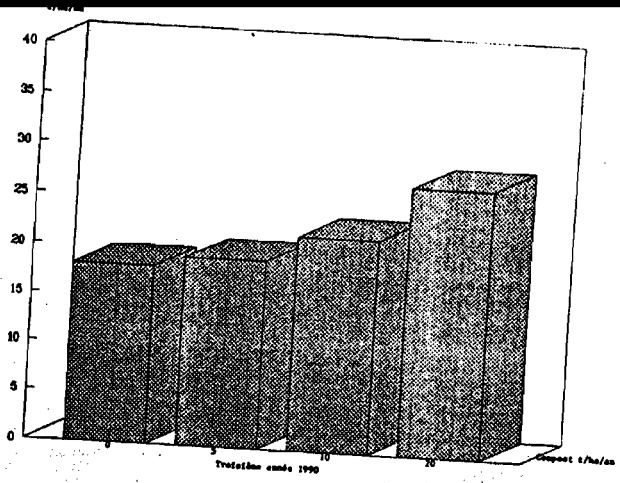
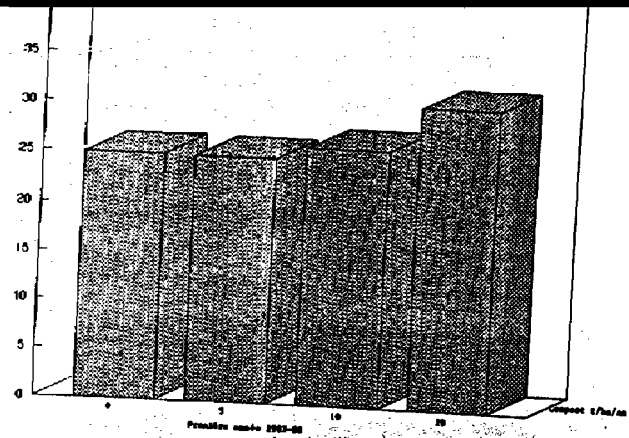


Figure 10 (suite): Effet d'apports croissants de compost de géranium sur le rendement du vert de géranium

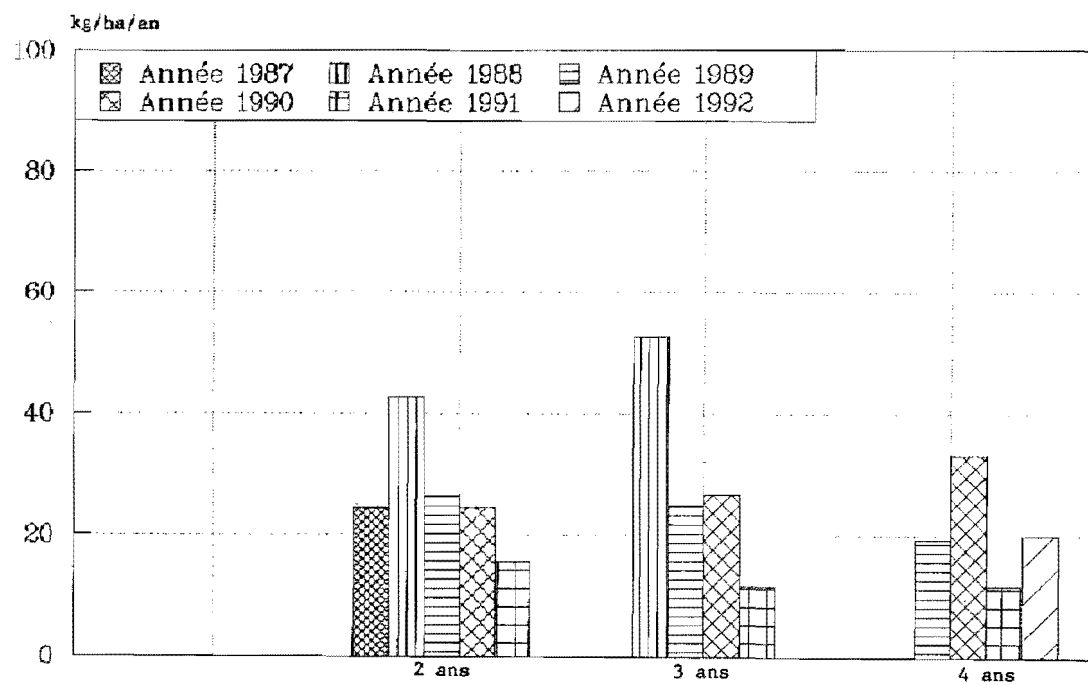


Figure 11 : Evolution du rendement du géranium conduit en itinéraire traditionnel amélioré selon la durée de rotation

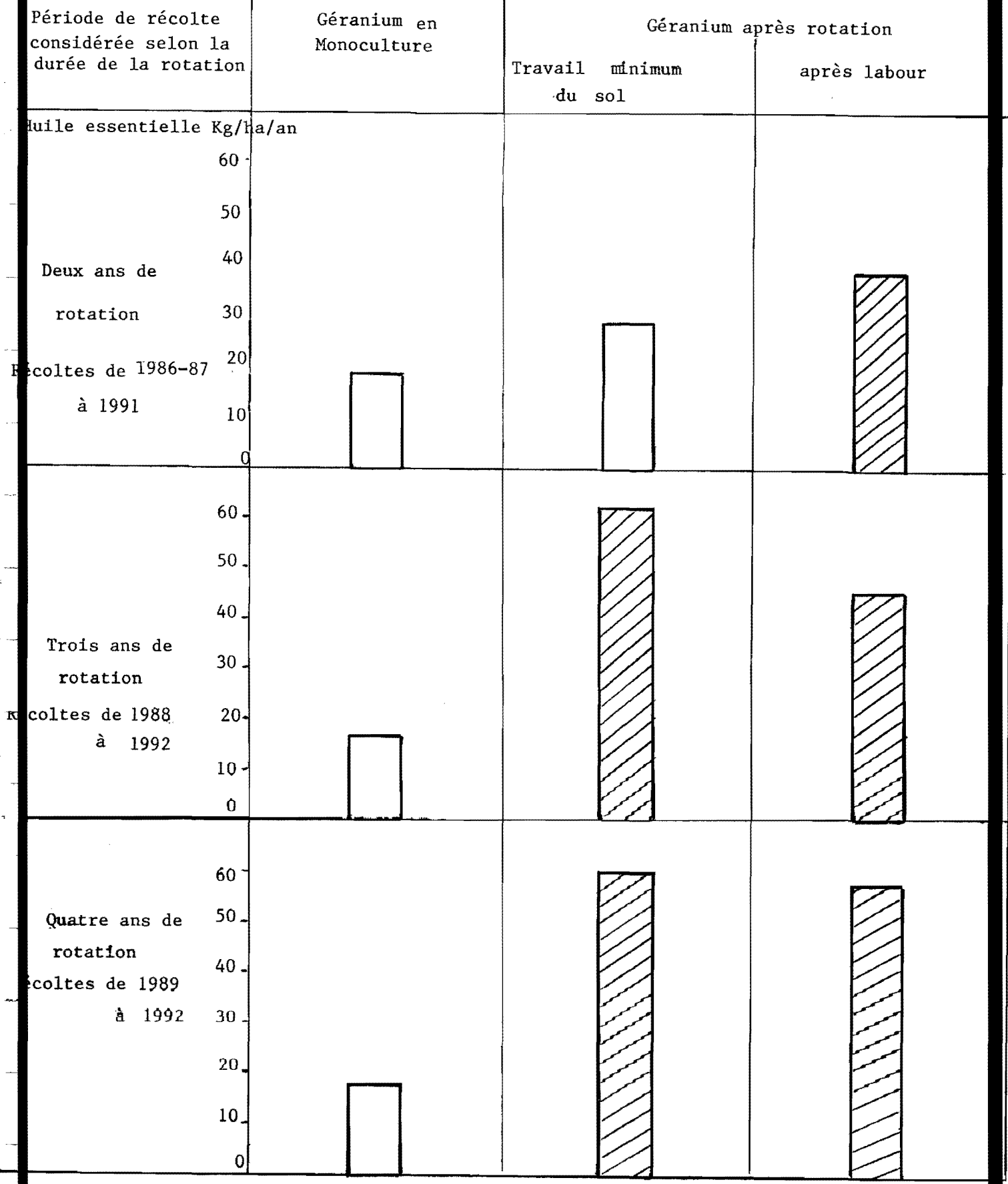




Figure 12 : Comparaison des rendements du géranium conduit en culture pure intensive avec ou sans rotation (Cocâtre)

-  itinéraire sans apport de matière organique
-  itinéraire avec apport de matière organique

Comparée à un système intensif conduit avec rotation sans restitution organique, sa production est équivalente (2 ans de rotation), mais elle apparaît très inférieure lorsque les cultures vivrières précédentes reçoivent des apports de compost (3 et 4 ans de rotation).

Les rendements obtenus pour le géranium en système traditionnel amélioré sont très aléatoires. Ils atteignent 50 kg d'huile essentielle par ha lorsque les conditions climatiques sont favorables, comme en 1988, année sèche, sans dépression cyclonique. Mais les autres années, des dégâts d'antracnose, *Glomerella vanillae* (Zimm.) Petch et Rag var. *Pelargonii* Bouriquet, apparaissent pendant la saison cyclonique et peuvent conduire à des pertes voisines de la moitié de la production annuelle espérée et une mortalité supérieure au tiers des plantes (MICHELLON et al., 1986). Les traitements préventifs au captane, appliqués dans l'itinéraire intensif, associés à une taille suffisante pour limiter les dégâts dus au vent, permettent de lutter efficacement, même en cas de cyclone violent.

#### 4.3.4. Le travail du sol

Les agriculteurs qui ont recours à des entreprises extérieures, en période de pointe de travail, utilisent souvent le matériel de la zone cannière. Ils introduisent alors le labour dans leur itinéraire.

Le labour favorise la levée et l'enracinement des plantes, mais outre les dangers de l'érosion, il provoque une baisse de rendement de la plupart des cultures à cycle court (maïs et haricot : tableau 10, pomme de terre : figure 13) car il entraîne un assèchement et une destructuration du sol (PERRET, 1993). De plus, dans les itinéraires avec restitution de matière organique, il réduit la productivité du géranium (figures 9 et 12).

Travail du sol	Travail minimum (semis direct)	Labour seulement en mars (avant le haricot)	Labour seulement en octobre (avant le maïs)	Labour avant chacun des 2 cycles annuels
<b>Maïs</b>				
1985-1986	2,19	2,16	1,81	2,14
1986-1987	1,10	0,85	0,86	0,43
1987-1988	5,24	4,16	5,30	3,00
<b>Haricot</b>				
1986	0,55	0,35	0,35	0,13
1987	1,72	1,66	1,68	1,65

**Tableau 10** : Influence du travail du sol sur le rendement en t de grains par ha du maïs (semé en octobre-novembre) et du haricot (mars-avril) sur une parcelle à l'horizon A structuré (Cocâtre, MICHELLON, 1988).

Plus globalement, les conséquences de la diversification des cultures, résumées au niveau de la parcelle sur les figures 14, 15 et 16 se généralisent à l'échelle régionale (estimation des surfaces possible grâce à une couverture photographique aérienne effectuée en 1987).

tubercules par ha

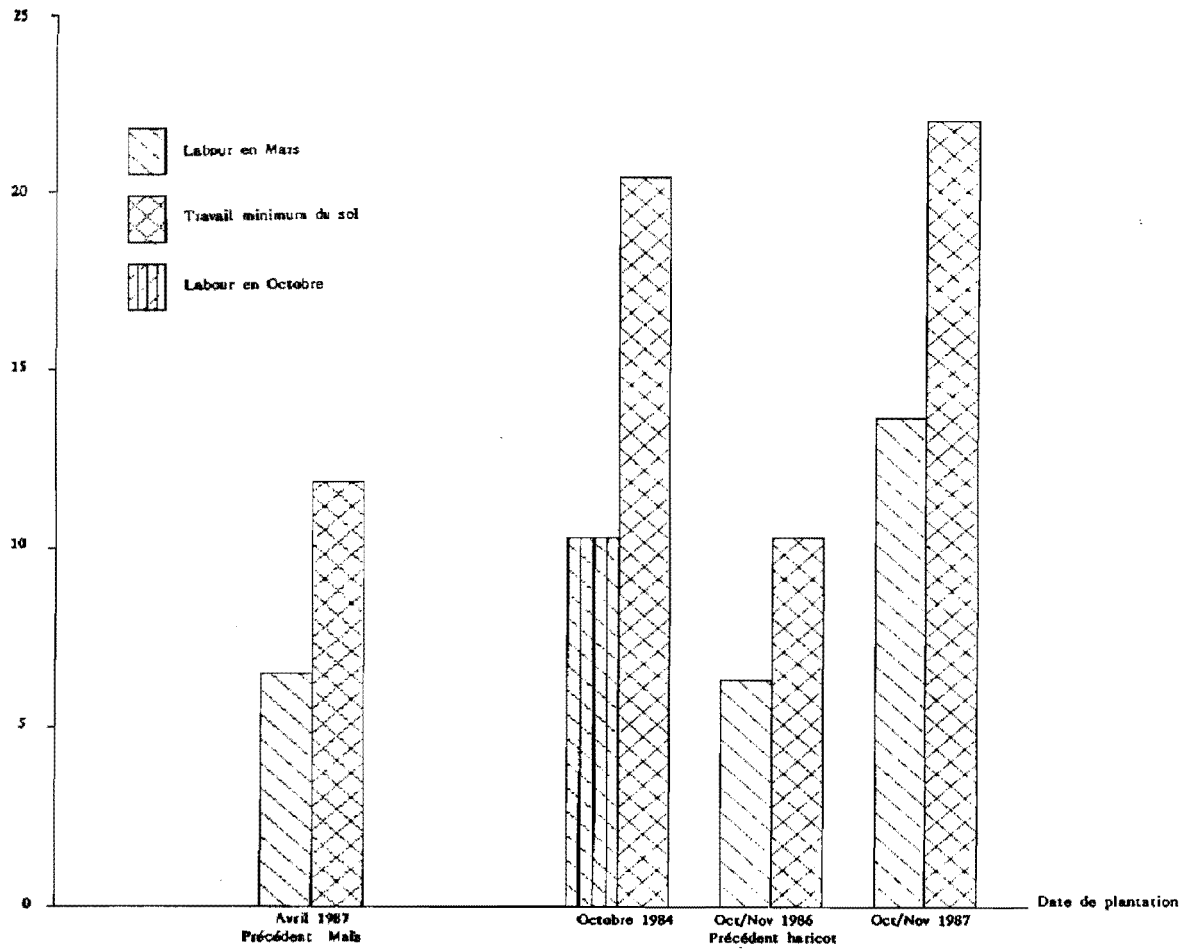
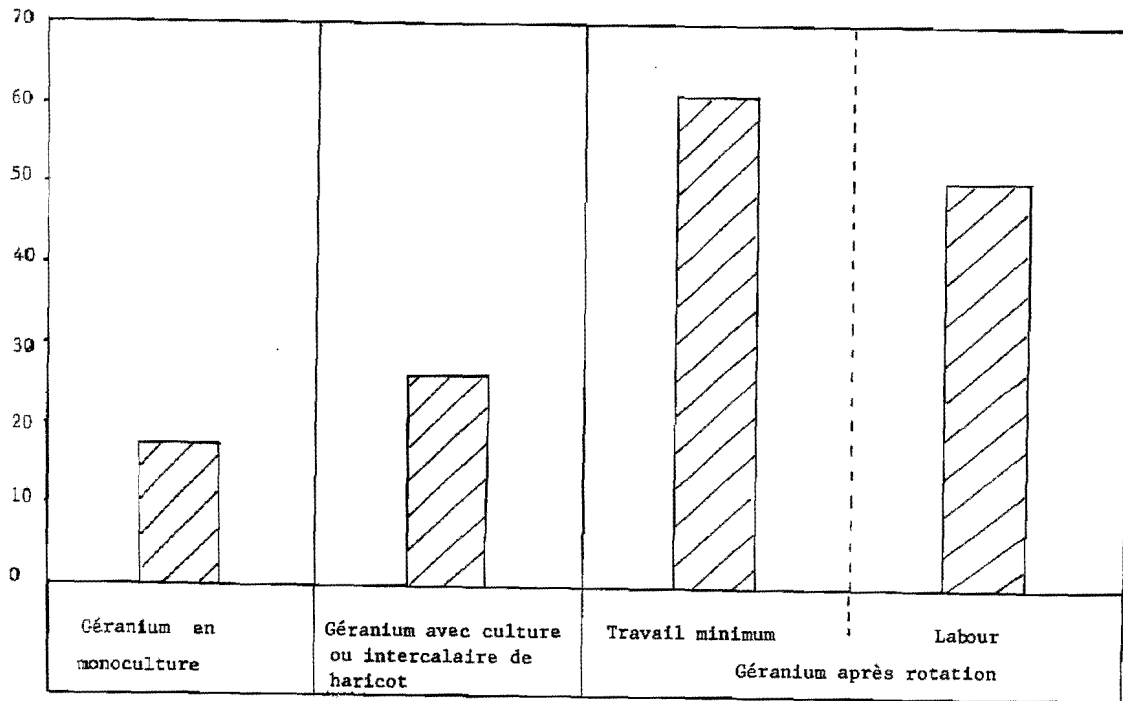
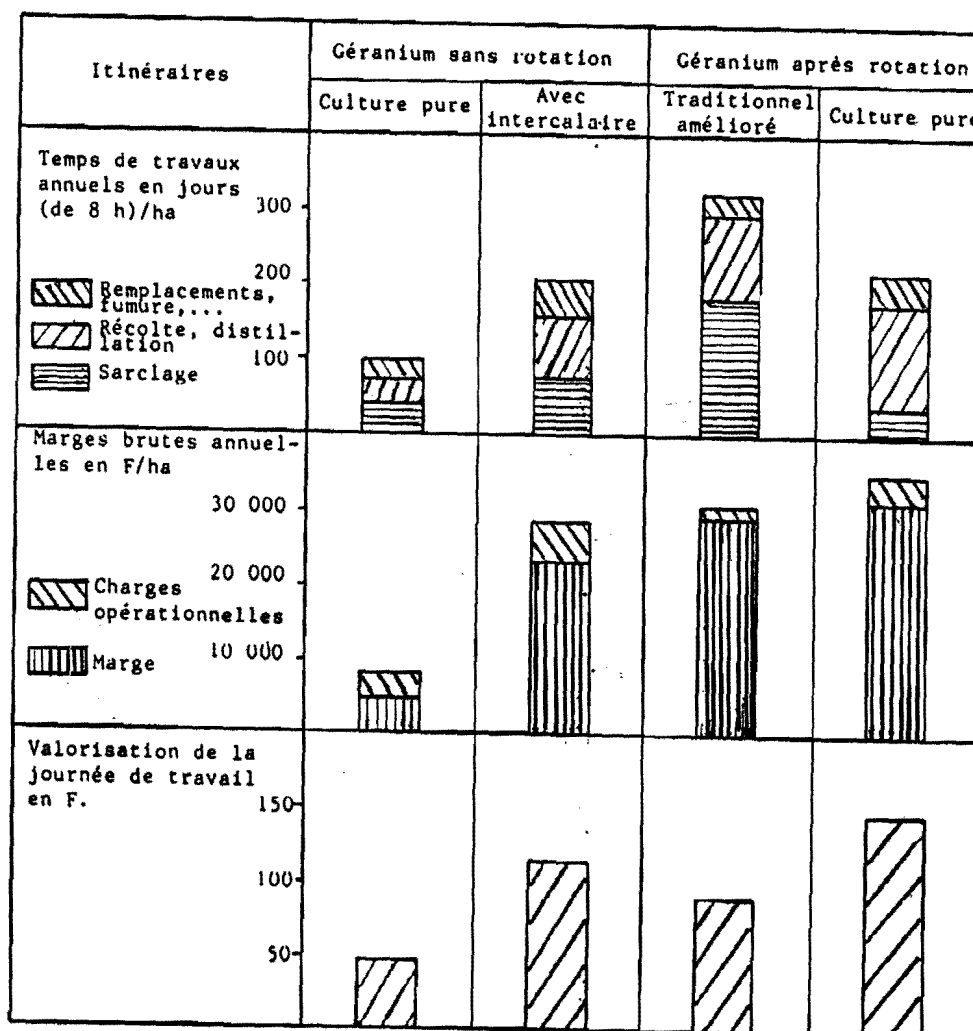


Figure 13 : Influence du travail du sol sur la productivité de la pomme de terre

Rendement en huile essentielle kg/ha/an



**Figure 14 :** 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



**Figure 15 : Influence des rotations et des itinéraires sur les temps de travaux, les marges et la valorisation des journées de travail pour un géranium en production (Trois-Bassins, 1988)**

Dans l'itinéraire traditionnel amélioré grâce aux rotations, les traitements phytosanitaires ne sont pas réalisés et la fumure minérale est réduite.

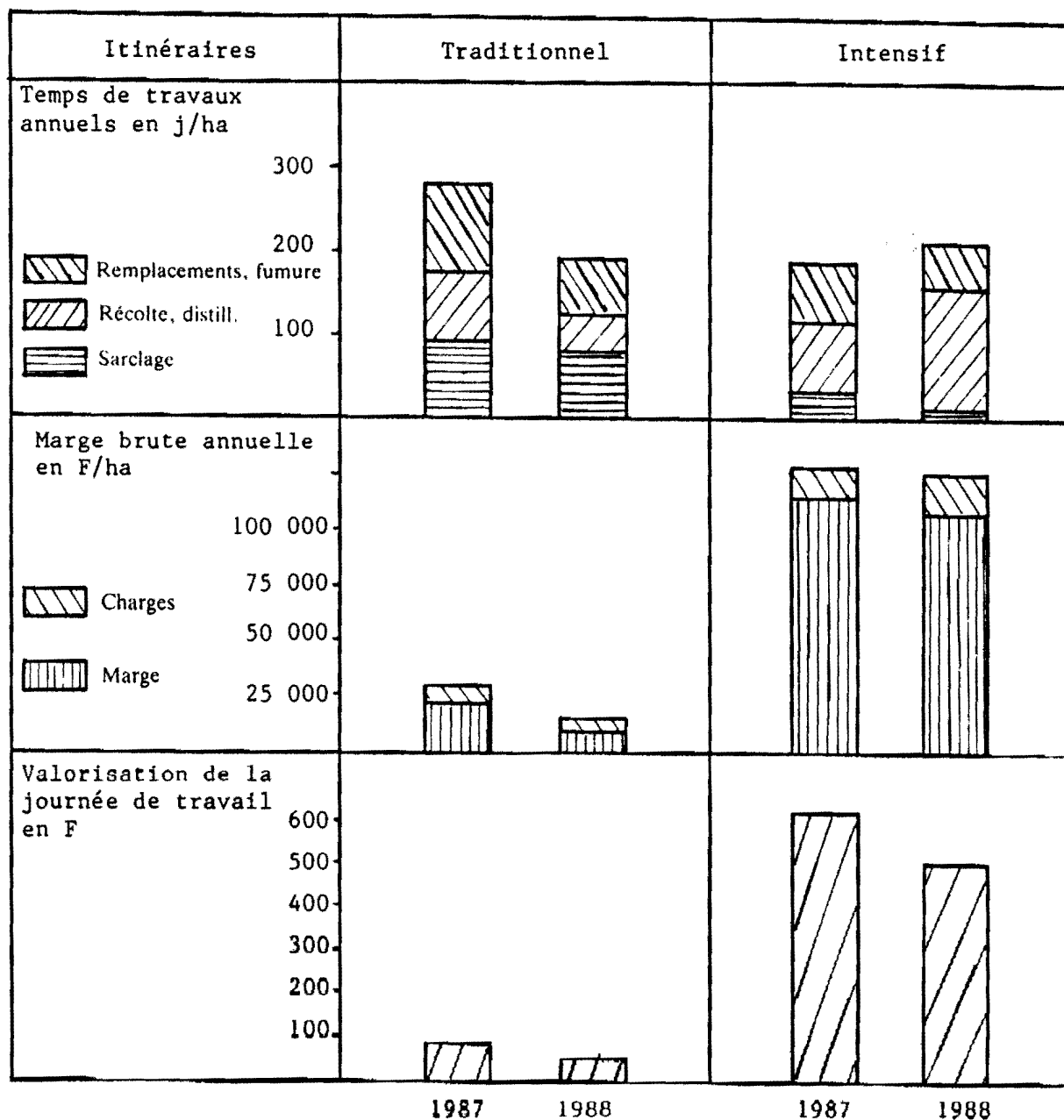


Figure 16 : Influence de l'itinéraire technique dans les temps de travaux, les marges et la valorisation des journées de travail pour la succession annuelle haricot-pomme de terre (après pomme de terre-maïs)

Dans l'itinéraire traditionnel amélioré grâce aux rotations, les traitements phytosanitaires ne sont pas réalisés et la fumure minérale est réduite.



Le rendement du géranium apparaît presque 4 fois plus élevé (25 contre 7 kg par ha) dans le Sud, caractérisé par des exploitations de polyculture élevage désenclavées, bénéficiant d'un accès au marché, ... que dans l'Ouest où domine la monoculture du géranium dans des systèmes en colonat (GIGNOUX, 1987 ; BRIDIER, 1985 et 1986 ; SUAD, 1989).

Mais ces exploitations du Sud ne sont pas assurées de pérennité, car les plus intensives ont épuisé leur sol en l'espace d'une génération (Piton Hyacinthe, ...).

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 rotundus*, *Nothoscordum inodorum*, ...), concourt aussi à la dégradation du système et à l'augmentation des temps de sarclage.

Afin de réduire ces contraintes et de concevoir des systèmes agricoles durables pour les Hauts de la Réunion, des techniques avec couverture permanente ont été développées à partir de 1988.

#### **4.4. Systèmes durables avec couverture végétale**

Deux alternatives permettent de construire ces systèmes avec protection permanente du sol :

- les couvertures mortes, obtenues grâce aux résidus de récolte, qui constituent l'option la plus simple, mais qui doivent être renouvelées régulièrement,
- les couvertures herbacées permanentes, solution définitive à condition qu'elles ne soient pas compétitives pour la culture.

##### **4.4.1. Couverture morte**

Pour constituer une couverture morte, les résidus de la défriche ou de la culture précédente, détruite au glyphosate (adventices, cannes et ses pailles, ...), sont conservés en place lors de la plantation du géranium. L'itinéraire technique n'est pas nécessairement modifié par rapport au sol nu (tableau 5). Par contre, les cultures vivrières, habituellement implantées après sillonnage, sont semées directement en poquets grâce à des cannes planteuses qui traversent le paillage (l'engrais peut être localisé comme en sol nu, et le fumier est apporté en surface).

La durée de la couverture morte dans une culture de géranium n'excède pas une année, même après canne à sucre alors que son exploitation est conduite pendant au minimum 5 années. Pour pérenniser cette couverture, certains agriculteurs ont eu recours aux résidus de la distillation, mais ils ne permettent pas de recouvrir une surface significative et sont généralement réservés aux cultures vivrières et maraîchères.

Les résidus de récolte sont augmentés avec des cultures intercalaires et deviennent suffisants lorsque des céréales à pailles sont associées au géranium. Dans les systèmes comparés, le riz pluvial n'a pas été retenu car le développement qu'il a connu à partir des années 1980 avec un objectif d'autoconsommation a été arrêté en 1988 suite à la vente de riz blanchi à des prix dérisoires (aides à l'exportation de cette céréale à partir de la CEE, MICHELLON, JEANNE, 1990). Il a été remplacé par l'avoine, préférée alors pour son intérêt fourrager.

Les effets des couvertures mortes et leur répercussion technico-économiques sont considérables :

- la prolifération des adventices est réduite dans ce couvert végétal dense. Hormis la défriche d'*Acacia mearnsii* où l'enherbement est limité, l'économie de main-d'oeuvre, principalement de sarclage, est très importante. Lors de l'installation du géranium, elle atteint une centaine de journées par ha après canne à sucre, ou un géranium abandonné retourné à la friche (MICHELLON, 1989),

- la productivité du géranium peut selon l'altitude être sensiblement améliorée, ainsi que le taux de reprise de ses boutures (figures 17 et 18) :

. vers 1100 m, les remplacements effectués à la plantation sont réduits de moitié sous couvert d'avoine, après géranium dégradé (après jachère, ce traitement était plus exposé au vent et les boutures ont subi des dégâts importants lors du cyclone). Au cours des deux premières années, les effets bénéfiques de la couverture d'avoine sur le rendement du géranium ne font que compenser la concurrence qui se manifeste en novembre en fin de cycle de cette plante,

. à 800 m, le déficit hydrique est beaucoup plus marqué, ainsi que les dégâts de ver blanc, *Hoplochelus marginalis*, qui infeste la zone. Après canne à sucre, le rendement obtenu en première année sur géranium apparaît doublé en culture pure lorsque les résidus de canne sont conservés, ou triplé avec culture intercalaire d'avoine (apportant 2 à 3 t de matière sèche par ha de paille supplémentaire).

Ces effets se maintiennent les années ultérieures. Ils semblent essentiellement liés (DOREE, 1989) :

- à une meilleure conservation de l'eau. Dès la mise en place de la couverture morte, l'ensemble des mesures de stock d'eau réalisées dans les couches superficielles est supérieur aux valeurs obtenues en sol nu,

- aux modifications de la faune et, en particulier, aux dégâts de ver blanc qui apparaissent réduits avec couverture (surtout avec avoine). Les larves sont disséminées dans l'ensemble de l'horizon supérieur du terrain, alors qu'en sol nu elles se concentrent sur les racines de géranium. L'ensemble racinaire joue ainsi le rôle de leurre.

Pour éviter de devoir perpétuellement renouveler les couvertures mortes qui se décomposent progressivement, des associations permanentes avec le géranium ont été élaborées avec des espèces pérennes rampantes à partir de 1988.

Remplacement annuel en pourcentage

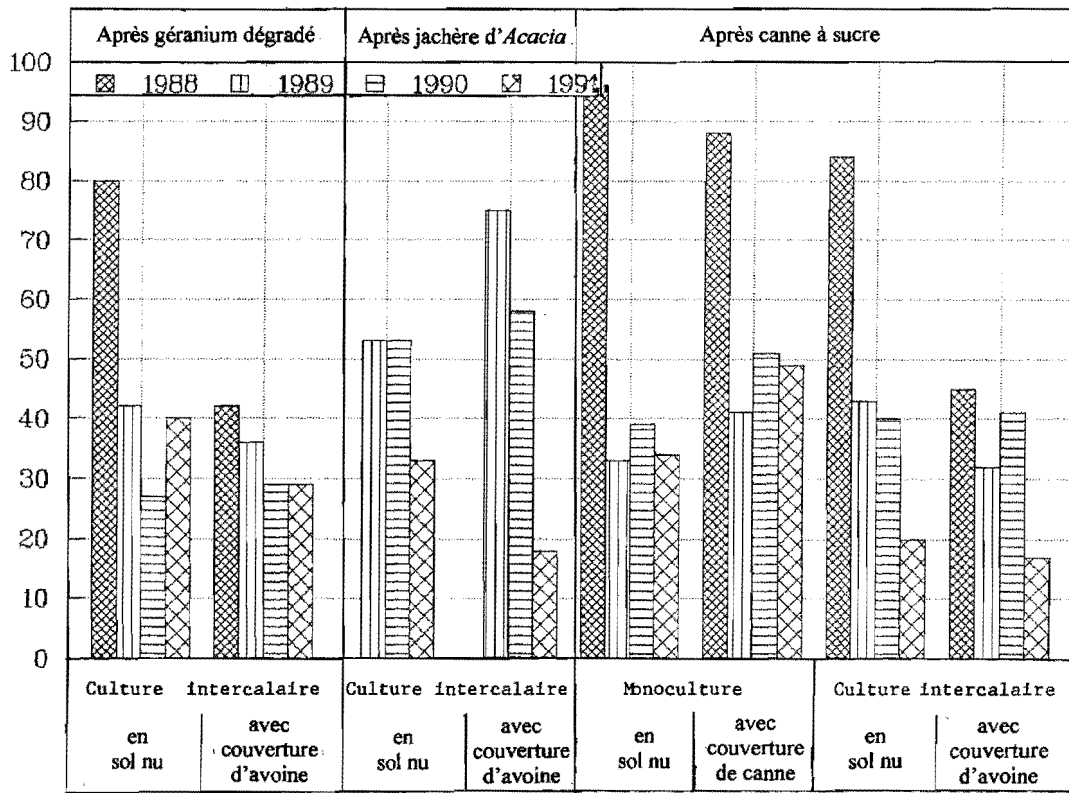


Figure 17 : Influence d'une couverture morte obtenue en conservant les pailles de canne ou d'une culture intercalaire d'avoine sur le pourcentage de remplacement annuel du géranium implanté en trois situations représentatives : géranium abandonné (TAURAN), après jachère d'Acacia (MERCHER) ou canne à sucre (POTHIN)

Essence kg/ha/an

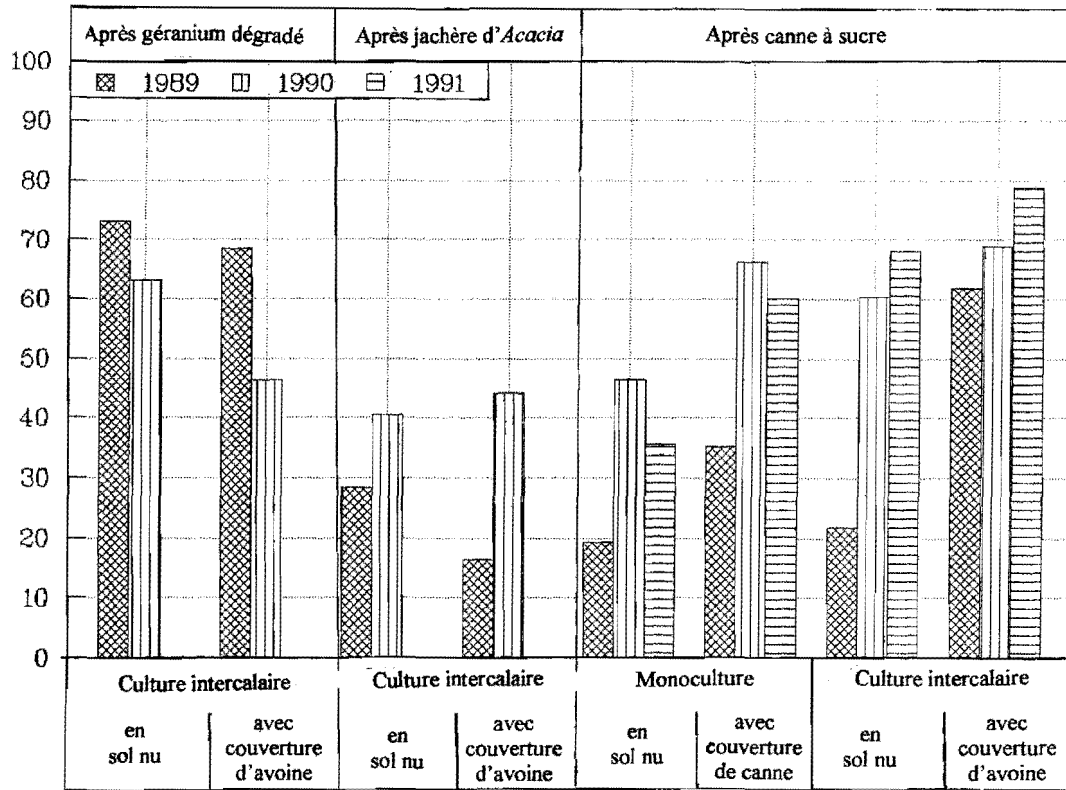


Figure 18 : Influence d'une couverture morte obtenue en conservant les pailles de canne d'une culture intercalaire d'avoine sur la productivité du géranium implanté en trois situations représentatives : géranium abandonné (TAURAN), après jachère d'Acacia (MERCHER) ou canne à sucre (BOUEND).

#### 4.4.2. Couverture herbacée permanente

Deux systèmes avec couverture sont principalement analysés, d'une part avec graminée (kikuyu), d'autre part avec légumineuse (lotier) :

##### a) Couverture de kikuyu

La rusticité et l'agressivité du kikuyu, et ses fortes potentialités de production ont conduit à la quasi-généralisation de cette graminée fourragère dans les pâturages d'altitude de la Réunion, comme sur les plateaux d'Afrique de l'Est. Cette plante pionnière a permis la reconquête des zones dégradées par la monoculture du géranium rosat.

Les systèmes avec couverture végétale ont été mis en oeuvre selon les itinéraires actuellement éprouvés en sol nu ; les modifications nécessaires étant appliquées au fur et à mesure de la résolution des problèmes rencontrés, ou de l'avancée des connaissances. Ainsi, certaines maladies des plantes se propagent moins rapidement dans les associations (TRENATH, 1976). Ce phénomène sera certainement masqué dans le dispositif actuel. Les traitements fongicides pratiqués ont en effet été mis au point en sol nu, et dans le cas de l'anthracnose du géranium, *Glomerella vanillae* (Zim.) Petch. et Rag. var. *Pelargonii* Bouriquet, sont préventifs. La dissémination de ses spores serait par surcroît favorisée par les éclaboussures de terre en sol nu (GAILLETON, 1962). D'ailleurs, avant la généralisation des herbicides, les agriculteurs laissaient *Setaria pallide-fusca* («queue de chat») envahir momentanément leur parcelle en été pour bénéficier de son effet protecteur contre les dégâts de vent et de l'anthracnose, plutôt que de conserver un sol nu.

De plus, la plantation du kikuyu a été réalisée après celle du géranium, alors qu'il est impératif de mettre en place le géranium, culture pérenne à port bas, dans une couverture déjà installée. L'inverse conduit à une concurrence des adventices et du kikuyu vis-à-vis du géranium, ou à des temps de travaux importants (sarclage).

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 rotundus* (FONTAR, THOMAS, 1992 ; HUMEAU, 1993).

La maîtrise de la couverture est parfois nécessaire 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 un graminicide spécifique, le fluazifop-p-butyl (à raison de 60 à 125 g/ha selon la saison). En outre, elle économise la main-d'oeuvre nécessaire aux sarclages en sol nu. Le contrôle de la croissance de cette graminée tropicale associée ou géranium avec le fluazifop-p-butyl est nécessaire surtout en saison chaude. Les traitements graminicides doivent être réalisés avec précaution, car il est impératif de ne pas détruire la couverture, sans peine de perdre ses effets bénéfiques. Dès que le sol est découvert, à nouveau exposé à la lumière, les adventices agressives prolifèrent (*Cyperus rotundus*, ...).

L'association du géranium avec le kikuyu conduit alors à une réduction de son rendement exprimé en matière verte par rapport au sol nu (tableau 11). Cet effet s'accroît lorsque le kikuyu est fauché et exporté pour l'affouragement des animaux et n'apparaît pas significativement atténué par une fumure complémentaire.

	Complément annuel de fumure	Matière verte en t/ha/an (moyenne de 1992 et 1993)
Sol nu	Sans (témoin)	34,8 a*
	75-35-120	33,3 a
Kikuyu maîtrisé par le fluazifop-p-butyl	Sans	25,0 b
	75-35-120	21,8 b
Kikuyu fauché dans l'inter- rang	Sans	17,7 c
	75-35-120	21,2 c

**Tableau 11** : Rendement du géranium rosat en sol nu ou associé à une couverture de kikuyu maîtrisée par le fluazifop-p-butyl ou fauchée

Deux niveaux de fumure sont appliqués : la fertilisation préconisée en sol nu (témoin), ou avec restitution des exportations supplémentaires estimées pour le fourrage (500 kg/ha d'engrais ternaire 15-7-24, soit 75-35-120).

\*Selon le test de NEWMAN et KEULS, les rendements affectés de la même lettre ne sont pas différents au seuil 5 % (C.V. = 15 %, E.T.M. = 3,7 t/ha).

Cet antagonisme entre le kikuyu et le géranium ne serait pas liée à des phénomènes d'allélopathie (FONTAR, THOMAS, 1992), mais à une forte concurrence mutuelle en période estivale (décembre à février). Elle se traduit par un ralentissement de la vitesse de croissance du géranium associé au kikuyu maîtrisé au fluazifop-p-butyl, comparativement à celle observée en sol nu (figure 19).

Cet essai thématique destiné à évaluer l'influence de divers traitements sur les productions de matière verte au champ est difficile à gérer en raison de la petite taille des parcelles élémentaires (soumises à des traitements herbicides différents, ...) qui, en outre, ne peuvent être distillées séparément.

Dans les parcelles de taille suffisante, conduites avec les agriculteurs, l'implantation du kikuyu et du géranium ont été simultanées avec un entretien facilité par la fauche, bien que ces techniques soient défavorables.

Le rendement de la distillation du géranium associé au kikuyu apparaît le plus souvent supérieur à celui récolté en sol nu, avec réduction concomitante de la teneur en eau, ces phénomènes étant probablement liés à l'effet de la substance de croissance, le fluazifop-p-butyl.

L'état sanitaire des cultures est amélioré par réduction des dégâts de certains parasites. Ainsi, l'ensemble du système racinaire du kikuyu semble jouer un rôle de leurre vis-à-vis du ver blanc, *Hoplochelus marginalis*.

Les distillations effectuées sur géranium entre 800 et 1100 m d'altitude (figure 20) pendant les années sèches 1990 et 1991, montrent que les rendements sont améliorés avec la couverture de kikuyu en zone basse infestée (65 kg/ha d'huile essentielle en moyenne contre 48 en sol nu).

Lors du passage d'un cyclone, l'association avec le kikuyu apparaît aussi très bénéfique, grâce à sa protection contre le vent violent (rendement obtenu à la Petite France multiplié par 5 en février 1989, lors du cyclone Firinga).

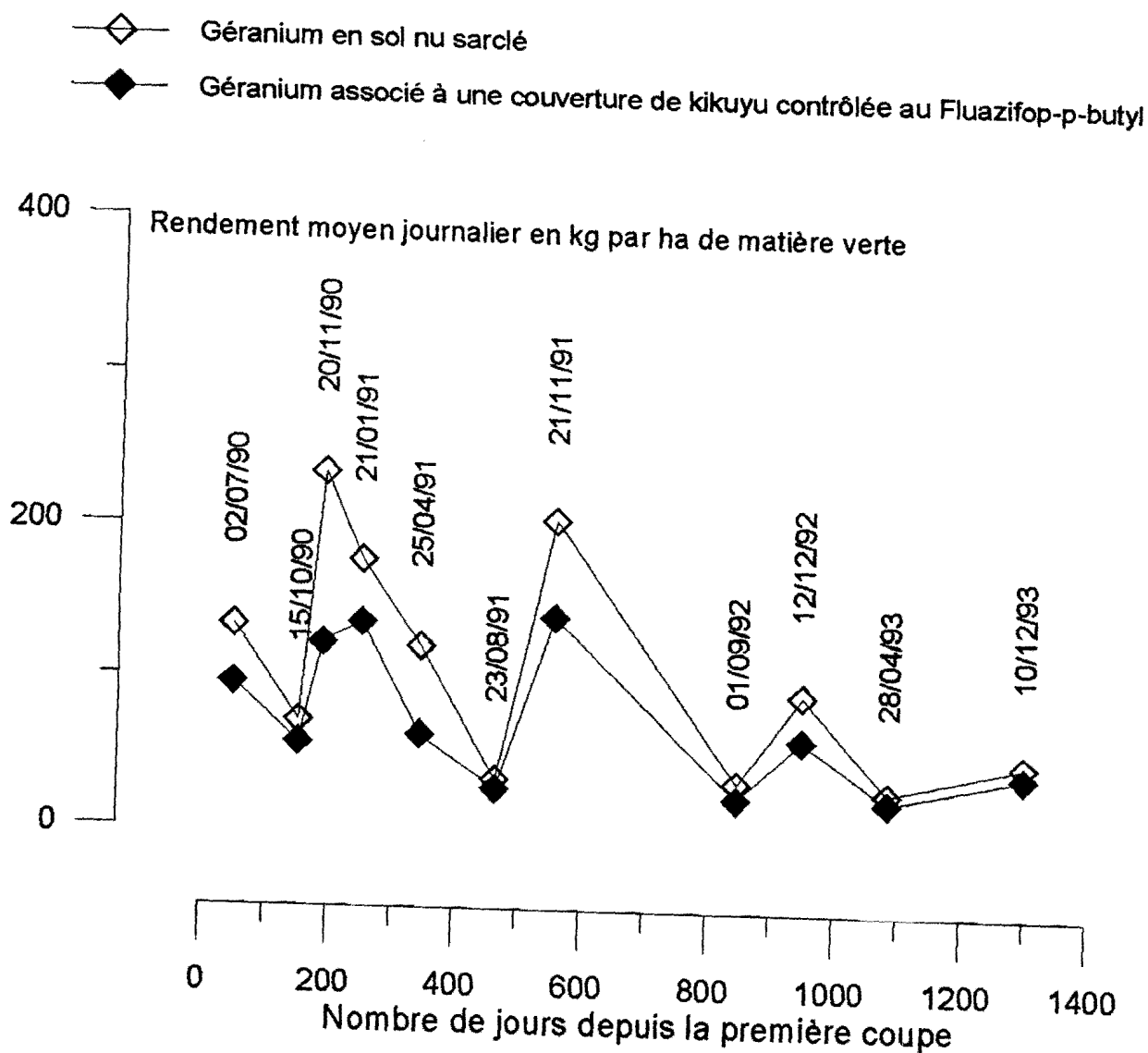


Figure 19 : Vitesse de croissance moyenne du géranium selon le système de culture

Huile essentielle en kg/ha/an

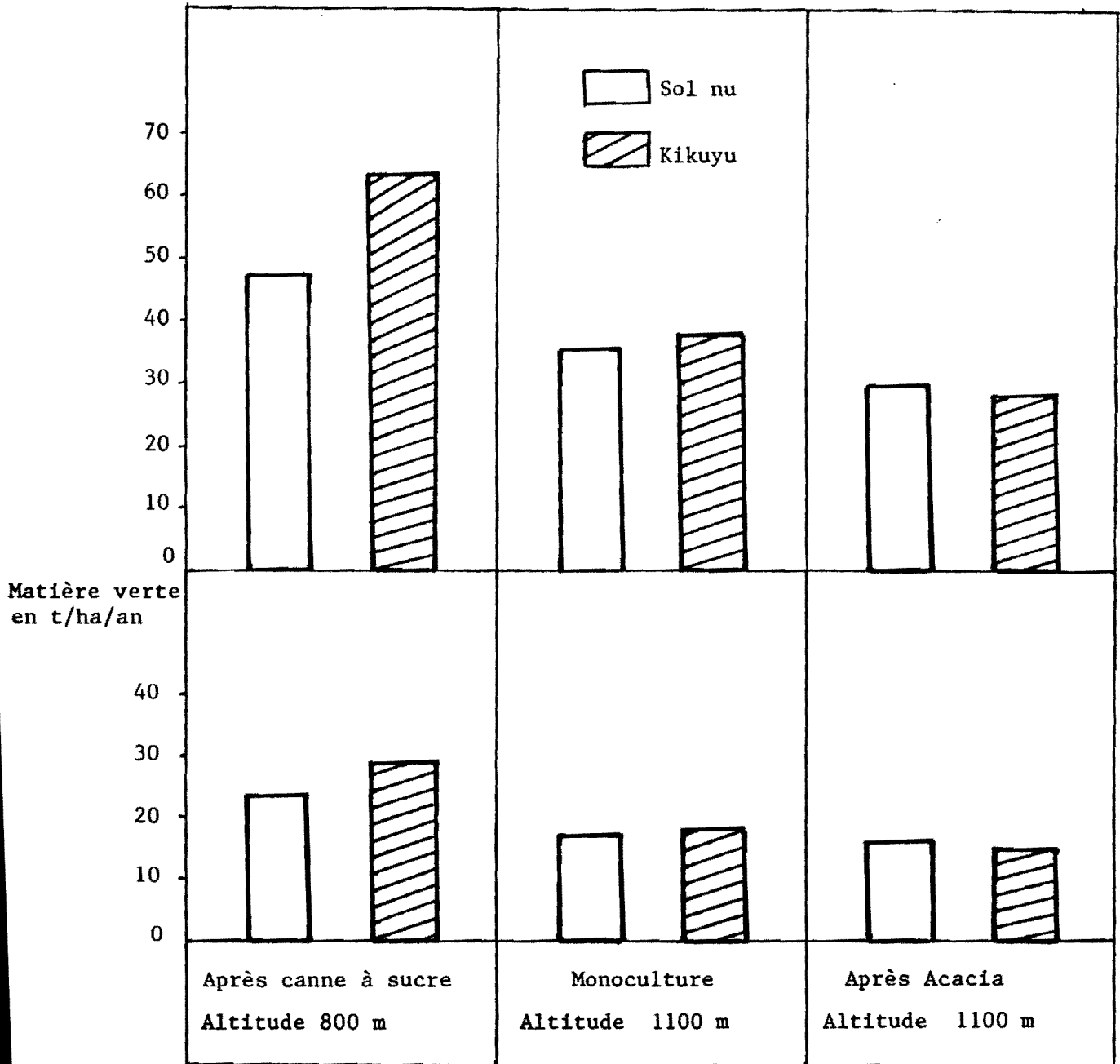


Figure 20 : Effet d'une couverture de kikuyu installée sur les rendements en matière verte et en huile essentielle du géranium rosat en fonction du système de culture et de l'altitude. Les rendements annuels sont calculés sur les moyennes de 1990 et 1991 (seulement en 1990 en monoculture)



La qualité de l'huile essentielle apparaît comparable (tableau 12), malgré une tendance à des évolutions peu favorables avec kikuyu : réduction des alcools (linalol, citronellol et géraniol) et augmentation de l'isomenthone et des esters (formiate de citronellyle et de géranyle).

Composé	Sol nu	Couverture de kikuyu
Linalol	10,8	8,9
(Z) oxyde de rose	0,8	1,1
(E) oxyde de rose	0,3	0,4
Isomenthone	6,5	9,9
Citronellol	23,8	20,9
Géraniol	19,1	18,0
Formiate de citronellyle	8,7	10,1
Formiate de géranyle	6,8	9,0
Gaïadiène 6-9	6,6	6,2

**Tableau 12** : Composition moyenne de l'huile essentielle de géranium en rotation avec la canne et distillé en mai et juillet, en %

### b) Couverture de lotier

Parmi les espèces de légumineuses fourragères étudiées par le CIRAD depuis de nombreuses années pour améliorer la ration des animaux, le choix s'est porté sur le lotier, car il est présent dans les prairies de la Réunion (FRITZ, 1967, 1968, 1969) et ses qualités agronomiques semblaient a priori intéressantes pour une plante de couverture.

Ainsi, le cultivar Maku, sélectionné en Nouvelle Zélande (DAVIES, 1969 ; AMSTRONG, 1974 ; LAMBERT et al., 1974), s'est avéré productif (MICHELLON, 1984) et pérenne dans les Hauts sous le vent, à 1300 m d'altitude. Une dizaine d'années après son installation, cette plante rampante à rhizomes et à stolons formait un tapis épais de plus de 10 cm, en l'absence d'exploitation, recouvrant l'ensemble des adventices (sauf les plantes pérennes dressées ou arbustes).

Cette couverture est relativement agressive réduisant sensiblement la prolifération de la flore adventice (tableau 13).

Mode de gestion du sol	7/12/92		23/02/93		25/04/94	
	Lotier	Adventices	Lotier	Adventices	Lotier	Adventices
Sol nu	0	28	0	25	0	88
Lotier herbicide	57	16	78	10	62	26
Lotier fauché	90	5	79	9	60	28

**Tableau 13** : Evolution du taux de recouvrement du sol par la couverture et les adventices en fin de saison chaude, au cours des 4 premières années d'exploitation du géranium

La conduite de l'association du lotier avec le géranium ne pose aucun problème en hiver. Par contre, en été, la couverture doit être maîtrisée dès les premières pluies, en novembre ou décembre. En effet, ses tiges prennent alors un port dressé, d'une hauteur de 20 cm environ au-dessus du sol, et s'enchevêtrent aux plantes de géranium dont les souches ont été taillées trop bas lors des récoltes précédentes. Pour éviter des pertes de temps et de matière verte lors des coupes suivantes, il faut donc ne pas trop rabattre le géranium au moment des

récoltes et maîtriser le lotier pendant cette période estivale. Pour cela, le lotier est soit exploité pour l'affouragement des animaux, soit traité par des herbicides à effet de contact limité dans le temps.

Pour améliorer la gestion du lotier associé au géranium ou aux cultures vivrières, maraîchères et fruitières, des essais d'herbicides ont été réalisés pendant plusieurs années (DEJANTE, MICHELLON, VINCENT, 1991).

Le fait de disposer d'une flore quasi monospécifique permet d'utiliser de très faibles doses d'herbicides pour maîtriser le lotier. Dans nos conditions, une ou deux applications en traitement dirigé sont suffisantes :

- en novembre-décembre : atrazine (250 g/ha) ou diuron (300 g/ha),
- en février-mars par un simple apport d'engrais en localisé sous le rang qui dessèche le lotier ou traitement à la bentazone (120 g/ha avec des risques de légère phytotoxicité sur géranium à des doses supérieures).

Lors de la mise en place de cet essai, au cours de la première saison chaude, le lotier a mal été maîtrisé (débroussailluse utilisée avec peu de précaution) occasionnant une forte mortalité des pieds de géranium (plantes sectionnées à la base). Par la suite, le remplacement annuel des plantes manquantes de géranium a permis d'améliorer la densité avec lotier qui s'est rapprochée peu à peu de celle obtenue en sol nu.

Cette mauvaise maîtrise du lotier en été s'est traduite par une concurrence vis-à-vis du géranium en novembre 1991 et 1992. Le rendement en matière verte du géranium associé apparaît alors inférieur à celui obtenu en sol nu (tableau 14) en première année, mais il n'est plus affecté ensuite par la couverture de lotier, quel que soit son mode de gestion : par herbicide ou par fauche (figure 21).

Mode de gestion du sol	Complément de fumure	Première année	Deuxième année	Troisième année	Total
Géranium en sol nu	Sans	23,32 <sup>a</sup>	19,94	13,80	57,06
Géranium avec lotier herbicide	Sans	17,93	17,68	12,82	48,43
	Avec	15,63 <sup>b</sup>	17,99	13,22	46,84
Géranium avec lotier fauché restitué	Sans	16,64	19,14	12,60	48,38
	Avec	18,51 <sup>b</sup>	20,05	13,65	52,21
Géranium avec lotier fauché exporté	Sans	16,44	15,61	11,76	43,81
	Avec	18,01 <sup>b</sup>	17,20	11,87	47,08
Effet statistiquement significatif		Lotier C.V. = 17 % E.T. = 3,02 t/ha	Aucun C.V. = 18 % E.T. = 3,21 t/ha	Aucun C.V. = 17 % E.T. = 2,21 t/ha	

**Tableau 14** : Rendement annuel du géranium en tonnes de matière verte par ha selon le mode de gestion du sol, à Cocâtre pendant les 3 premières années d'exploitation

Selon le test de NEWMAN et KEULS, les rendements affectés de la même lettre ne sont pas statistiquement différents.

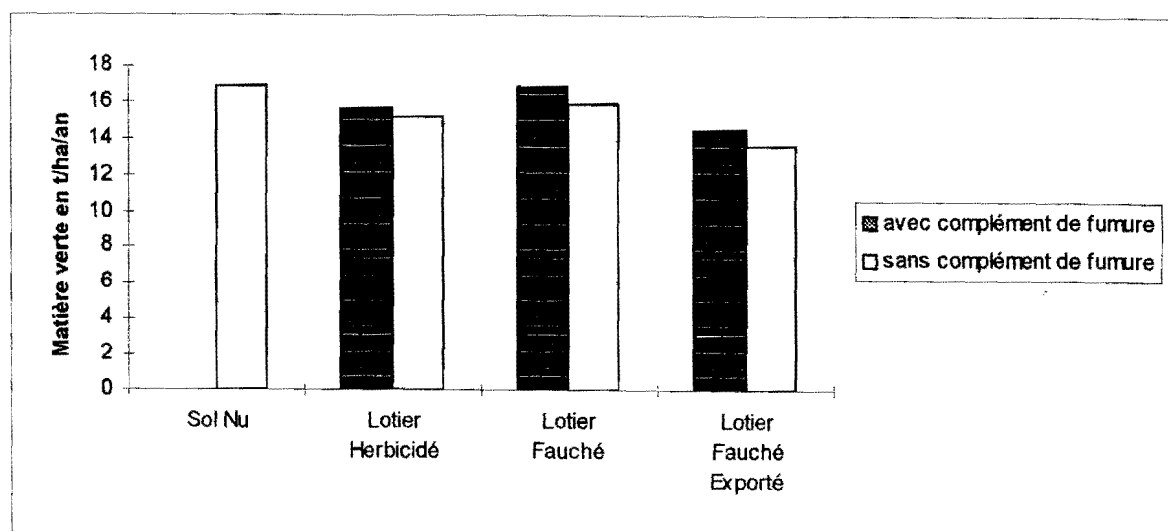


Figure 21 : Effet d'une couverture de lotier velu installée et gérée soit par fauche par herbicide, sur le rendement en matière verte du géranium rosat

Exploité pour l'affouragement des animaux, au moment où sa maîtrise apparaît nécessaire pour ne pas concurrencer le géranium, le lotier présente une production faible (0,8 t/ha de matière verte par coupe à 12,4 % de matière sèche) par rapport à une culture pure (MICHELLON, 1984). Dans ces conditions, il n'apparaît pas utile de prévoir une fumure complémentaire destinée à compenser les exportations minérales du lotier, même exploité comme fourrage.

Les légumineuses de couverture constituent une source d'azote importante pour les cultures associées, permettant de réduire leur fumure (SEGUY et *al.*, 1992). Le lotier semble à cet égard très efficace car il permettrait de supprimer d'azote sur certaines cultures, comme le maïs (MICHELLON, ANSELLEM, NARANIN, 1994). En Nouvelle Zélande, BROCK (1973) évalue la fourniture annuelle d'azote au sol entre 140 et 200 unités par ha, selon l'apport de phosphore, qui s'ajoutent respectivement aux 270 à 390 kg d'azote par ha exportés dans le fourrage.

Localement, les études sur la fixation d'azote atmosphérique par la méthode de dilution isotopique en  $^{15}\text{N}$ , réalisées par le Laboratoire de Physiologie et de Biochimie Végétale de l'Université de Caën, montrent que cette activité est efficace et qu'une part importante de cet azote est transférée au géranium (MICHELLON et *al.*, 1994 et tableau 15). Comme pour le maïs, il est possible de réduire ou de supprimer la fumure azotée du géranium en présence de lotier.

	Sol nu		Couverture	
	Monoculture	Rotation	Kikuyu	Lotier
<u>Macro-éléments en %</u>				
N	2,39	2,39	2,26	2,64
P	0,22	0,22	0,20	0,25
K	2,42	1,79	1,90	2,52
Ca	1,93	2,56	2,69	1,92
Mg	0,25	0,22	0,24	0,25
S	0,16	0,17	0,15	0,19
<u>Oligo-éléments en p.p.m.</u>				
Fe	161	126	118	65
Mn	80	82	78	96
Zn	25	25	32	27
Cu	5,4	6,2	4,4	6,4
Bo	33	42	40	34

**Tableau 15** : Teneurs en éléments minéraux, en proportion de la matière sèche du géranium selon le mode de gestion du sol et de la culture (Cocâtre, avril 1993)

Il semblerait que la productivité du géranium puisse être améliorée par le lotier, surtout en sol décapé par l'érosion comme le suggèrent les résultats des tests réalisés dans le cadre des études pluridisciplinaires sur les andosols (CIRAD, 1977, et tableau 16).

Mode de gestion du sol	Sol nu	Couverture de lotier
Parcelle caractérisée par :		
Horizon A non décapé (> 20 cm d'épaisseur)	42,7	44,5
Horizon B (B affleurant)	46,4	61,7

**Tableau 16** : Effet d'une couverture de lotier sur le rendement du géranium en t de matière verte par ha, en fonction de l'état structural du sol (Cocâtre, 1000 m, récoltes de mai 1990 à juillet 1991)

La qualité du végétal récolté est cependant altérée en sol nu. En été, le géranium y subit en effet de forts dégâts d'un charançon phylophage, *Cratopus humeralis*, qui provoque de profondes échancrures dans le limbe des feuilles. Des traitements insecticides sont réalisés systématiquement, mais ils sont insuffisamment efficaces. Dans ces conditions, les parcelles sont relativement épargnées par rapport aux voisines où le géranium est cultivé sans lotier.

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. Malgré l'exigüité des parcelles, les dégâts de *Cratopus humeralis* apparaissent considérablement réduits sur géranium avec couverture de lotier par rapport à celui en sol nu. Nous avons tenté de quantifier cette différence en évaluant un pourcentage de destruction du feuillage (tableau 17).

Mode de gestion du sol	Défoliation en %
Géranium en sol nu	3,3
Géranium avec couverture de lotier	1,5

**Tableau 17** : Pourcentage de destruction du feuillage du géranium par le *Cratopus humeralis*. L'évaluation a été réalisée le 26 avril 1994. Dans le calcul de la moyenne des pourcentages de défoliation des parcelles avec lotier, celles qui sont adjacentes aux traitements en sol nu sont exclues (effet de bordure)

Lors des récoltes qui succèdent à ces attaques, les rendements en tiges et feuilles du géranium sont très hétérogènes, et sont affectés en sol nu par rapport à ceux obtenus avec la couverture de lotier.

Pour apprécier l'effet de légumineuses sur la protection d'huile essentielle de géranium dans des situations représentatives des mélanges de trèfle et de lotier ont été implantés simultanément avec la culture. Comme pour la couverture de kikuyu, il est préférable de mettre en place le géranium dans le lotier déjà installé sous couvert d'une culture vivrière ou maraîchère, pour ne pas immobiliser de surface (MICHELLON, DEJANTE, VINCENT, 1992).

La couverture de légumineuse apparaît bénéfique :

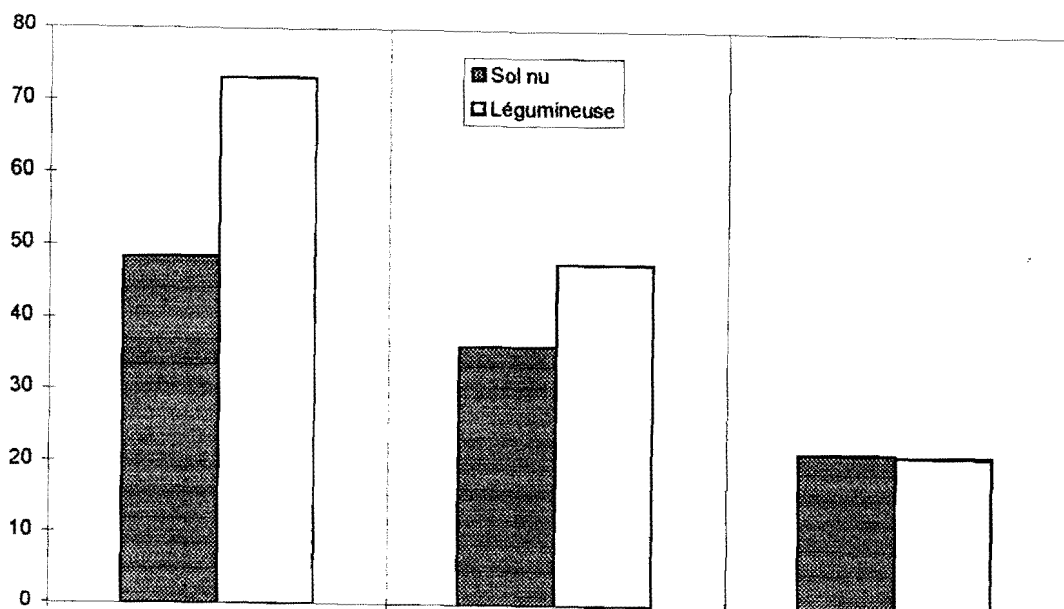
- vers 1100 m d'altitude, après géranium abandonné sur sol dégradé, le lotier domine et permet d'augmenter le rendement en huile essentielle d'une dizaine de kg par ha (figure 22),

Après jachère d'*Acacia*, l'effet de la couverture est moins net, car les conditions d'exploitation y sont très difficiles (isolement, accès coupé en saison cyclonique).

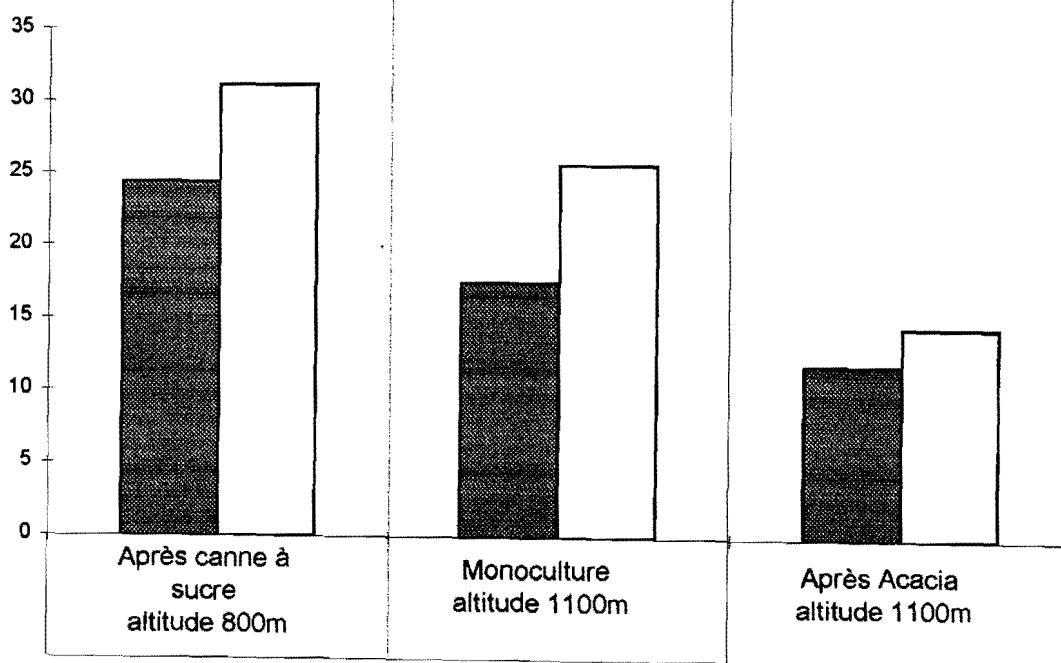
- à 800 m d'altitude, le déficit hydrique est beaucoup plus marqué, ainsi que les dégâts de ver blanc qui infeste la zone. La couverture de trèfle du Kenya qui s'installe mieux que le lotier, augmente la production de près de 50 kg d'huile essentielle en deux ans (supérieure de moitié par rapport au sol nu).

La qualité de l'huile essentielle apparaît très semblable en sol nu ou avec couverture de lotier (tableau 18). Il est cependant conseillé de réduire ou de supprimer la fumure azotée du géranium en présence de lotier pour éviter d'altérer la qualité de l'huile essentielle en été (augmentation de l'isomenthone).

Huile essentielle  
en kg/ha/an



Matière verte en  
t/ha/an



**Figure 22 :** Effet d'une couverture de légumineuse installée : trèfle du Kenya (à 800 m d'altitude) ou lotier velu (à 1100 m), sur les rendements en matière verte et en huile essentielle du géranium rosat en fonction du système de culture. Les rendements annuels sont calculés sur les moyennes des 2 années 1990-1991 et 1991-1992 (seulement 1990-1991 en monoculture)

Composé	Sol nu	Couverture de lotier
Linalol	9,2	9,4
(Z) oxyde de rose	0,9	1,1
(E) oxyde de rose	0,3	0,4
Isomenthone	8,6	10,9
Citronellol	22,5	22,3
Géranol	18,2	19,0
Formiate de citronellyle	9,1	9,0
Formiate de géranyle	8,0	8,0
Gaïadiène 6-9	6,0	4,9

**Tableau 18** : Composition moyenne de l'huile essentielle de géranium en rotation avec la canne et distillé en juin et juillet, en % (DEMARNE, MICHELLON, 1994)

Malgré les faibles connaissances sur les conditions de gestion de ces associations acquises lors de leur mise en place, l'ensemble des effets favorables induits par la couverture de légumineuse installée conduit à une amélioration des résultats économiques (figure 23).

## **V- MODIFICATION DES PROPRIETES BIOLOGIQUES, PHYSICO-CHIMIQUES ET HYDRODYNAMIQUES DU MILIEU EN FONCTION DES MODES DE GESTION DU SOL**

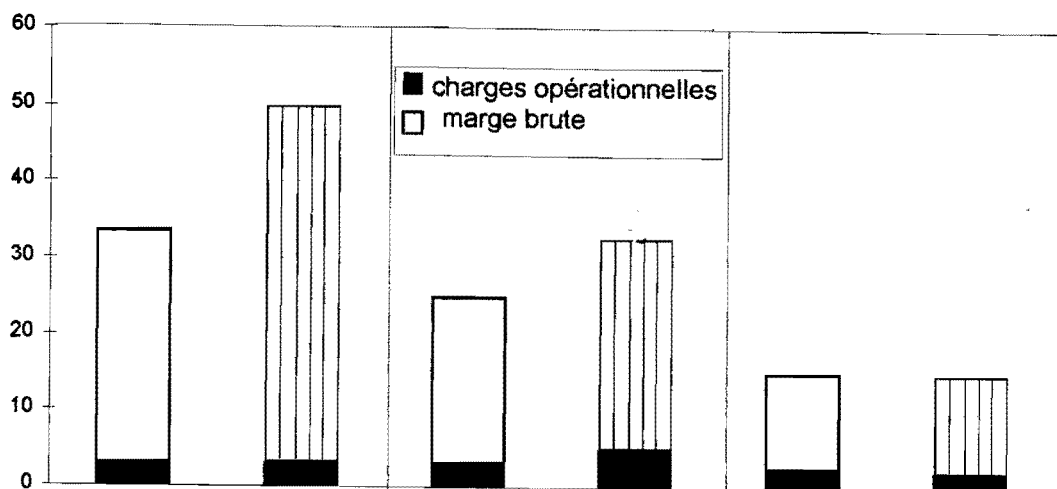
### **5.1. Caractéristiques générales des sols (rappel)**

Les sols d'origine volcanique appartiennent tous à une série homogène qui se différencie selon les conditions climatiques liées à l'altitude (RAUNET, 1991). Les expérimentations sont conduites vers 1000 m d'altitude sur andosol non perhydraté.

Formés sur un niveau à «gratons» (matériaux pyroclastiques) drainant, plus ou moins altéré, 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 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, 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.

Résultats économiques en milliers de F/ha



Valorisation de la journée de travail en F/j

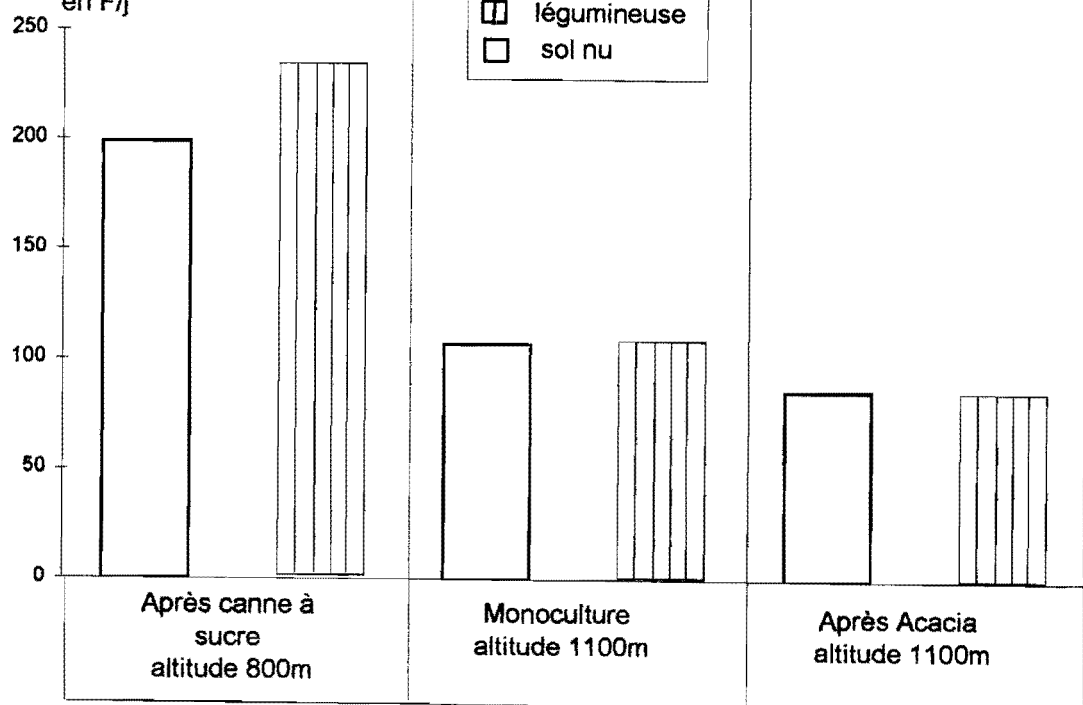
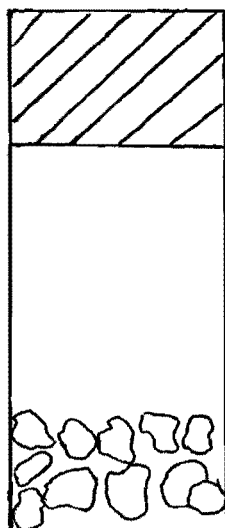


Figure 23 : Effet d'une couverture de légumineuse installée : trèfle du Kenya (à 800 m d'altitude) ou lotier velu (à 1100 m), sur les résultats économiques et la valorisation de la journée de travail d'une culture de géranium en fonction du précédent. Les rendements annuels sont calculés sur les moyennes des 2 années 1990-1991 et 1991-1992 (seulement 1990-1991 en monoculture)



### Profil type d'un andosol désaturé non perhydraté (RAUNET, 1991)

Le profil type des sols non remaniés est caractérisé par la succession de trois horizons principaux :



- Horizon A : - épaisseur de 15 à 20 cm  
- taux de matière organique élevé  
- brun foncé  
- structure continue  
- texture sablo-limoneuse
- Horizon B : - épaisseur de 40 à + 100 cm  
- faible taux de matière organique  
- brun jaune à brun clair  
- structure continue  
- texture limoneuse
- Horizon C : - altération du matériau  
pyroclastique d'origine  
- brun gris  
- caillouteux

En avril 1993, lors de la réalisation des tranchées pédologiques, des différences très marquées ont été observées en ce qui concerne **les transitions entre horizons et leur colonisation par les systèmes racinaires**. Les résultats sont cependant relativement homogènes par système de culture, même si deux fosses ont été observées dans chaque parcelle (dans des zones homogènes représentant les états extrêmes du niveau d'érosion à l'origine du suivi).

Chaque tranchée est creusée dans l'inter-rang à l'aplomb de deux plants de géranium et intègre deux fois un quart du système racinaire.

Ces transitions entre les horizons sont des éléments de diagnostic importants (CALLOT, 1984 et 1993). L'alimentation hydrique d'une plante est dépendante de la colonisation du sol par le système racinaire. Elle régule la nutrition minérale aux différentes périodes critiques du cycle végétatif, et en particulier, la nutrition azotée. Il est donc important que le système racinaire d'une plante puisse être réparti sur l'ensemble du profil pédologique entre les différents horizons. 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 peuvent apparaître 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 renseigne 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, etc ...). La base du profil de sol, au contact du substratum, 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, favorable à l'activité des racines et des microorganismes. 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. La porosité de cet horizon de transition notée Bbio, est d'origine racinaire et faunique. Elle assure un drainage naturel du sol. Lorsque l'activité racinaire profonde disparaît, cette macroporosité se colmate progressivement.

## **5.2. Dégradation du fonctionnement biologique du sol en monoculture**

Pour étudier l'évolution du sol au cours du système de culture traditionnel (mis en place depuis plus d'un demi-siècle après la forêt primaire) et les conséquences de la disparition de la jachère, trois états très contrastés ont été analysés (BURLE, 1993). Les parcelles ont été choisies dans des situations voisines afin de comparer :

- jachère à *Acacia mearnsii* de plus de 15 ans (qui correspond au stade de remise en culture du géranium) avec couvert de *Lantana camara* [propriété communale de Trois-Bassins, déjà étudiée par PY et CLARIOND (1989) ou PERRET (1993)],
- 5 ans de géranium en sol nu après jachère d'*Acacia* : stade proche de la fin du cycle traditionnel (terrain de M. MERCHER),
- un quart de siècle de culture du géranium en sol nu : géranium sédentarisé (Cocâtre).

### **5.2.1. Evolution des profils**

#### **a) Sous *Acacia mearnsii***

L'épaisseur de l'horizon A est comprise entre 20 et 30 cm (figure 24), la teinte de couleur brun foncé (8,5 YR 4/3), la structure est grumeleuse avec des agrégats discernables et soudés entre eux de quelques centimètres de large. Cette structure est créée par l'enracinement dense de *L. camara* et l'activité des vers de terre (estimés à 6,4 individus/m<sup>2</sup>, composés de *Pontoscolex corethrurus*, LAVELLE, 1993).

La mésofaune présente une forte activité dans la couche superficielle de litière avec enchytraeides, iules, oribates, amphipodes (*Talorchestia rectimana*), ... Cette activité biologique se poursuit dans les horizons sous-jacents où de très nombreuses galeries comblées de courtilières subsistent.

Les limites entre les horizons sont progressives et la distribution du système racinaire d'*A. mearnsii* est homogène. Bien entendu, la densité racinaire est plus importante dans l'horizon de surface mais, jusqu'à 1 mètre de profondeur, de nombreuses racines portant des nodosités apparaissent.

Enfin, il est intéressant de noter qu'il existe en profondeur un horizon de couleur plus rouge (7,5 YR 4/6) et plus poreux au contact de l'altérite (Bbio).





#### **b) Après 5 ans de culture de géranium en sol nu**

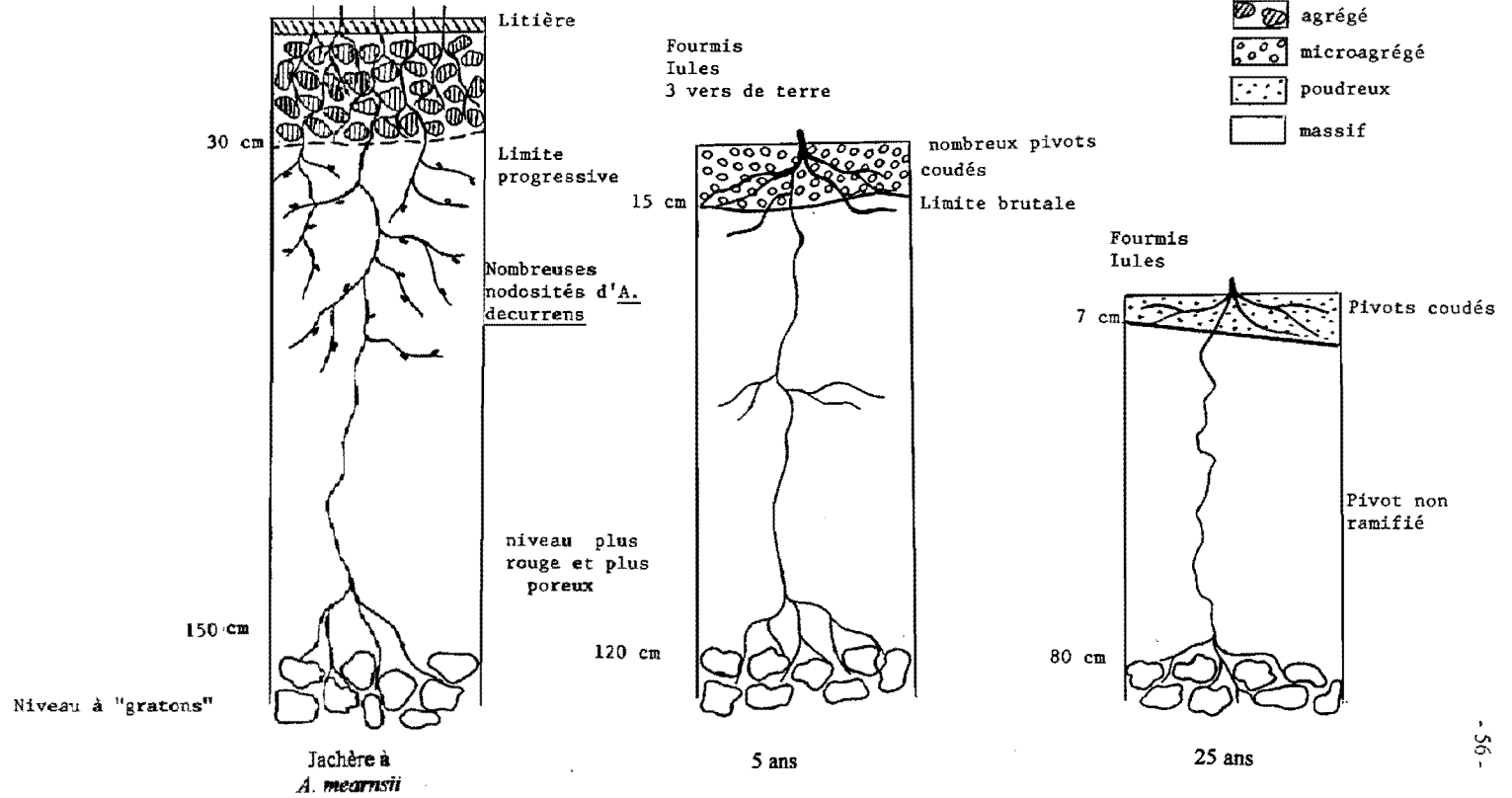
Après 5 ans de culture, l'horizon organique de surface a diminué (15 à 20 cm). Cette diminution s'est accompagnée d'un changement net de structure avec des agrégats de taille plus réduite et non soudés entre eux.

Figure 24 : Evolution comparée des profils pédologiques et racinaires sous *A. mearnsii* et monoculture de géranium

Iules  
Crevettes  
Enchytraeïdes  
8 vers de terre  
Courtillières

type de structure

-  agrégé
-  microagrégé
-  poudreux
-  massif



Monoculture de géranium en sol nu

L'activité biologique se réduit considérablement, notamment la population de vers de terre qui passe à 3,5 individus/m<sup>2</sup>.

Tous ces changements sont liés et résultent de l'influence des agents climatiques (principalement humectation, dessiccation) et de la diminution du stock organique.

Le passage de l'horizon organique au niveau sous-jacent est plus brutal. Cette limite brutale concentre les racines dans l'horizon de surface et rend alors la plante plus sensible aux variations physiques climatiques (JAILLARD et al., 1979).

La structure de l'horizon B est plus continue avec une macroporosité pratiquement nulle qui limite le développement du système racinaire. Des racines d'*Acacia* non décomposées apparaissent et traduisent le faible «turn over» de la matière végétale dû à une activité biologique réduite dans cet horizon.

L'enracinement du géranium est très fortement développé dans la couche superficielle avec des pivots coudés qui caractérisent la discontinuité structurale entre les deux horizons. Le chevelu racinaire du géranium est important sur cet horizon où il est alors en forte concurrence avec les plantes adventices.

Dans l'horizon B, le système racinaire du géranium se limite à un pivot ramifié entre 50 et 70 cm, front d'activité de la macrofaune, et au contact du graton, ce qui correspond à deux horizons dont la porosité est plus élevée.

### **c) Après 25 ans de monoculture de géranium en sol nu**

Dans ces parcelles où l'érosion est intense (PERRET, 1992), l'épaisseur du sol au-dessus du niveau de base avec gratons a considérablement diminué par rapport au témoin sous *Acacia mearnsii*.

L'épaisseur de l'horizon A organique est encore réduite (7 à 10 cm) avec une structure très particulière et poudreuse rendant ces sols sensibles à l'érosion. La limite rectiligne et brutale avec l'horizon sous-jacent traduit l'absence de brassage biologique.

Aucun ver de terre n'a été relevé au cours du creusement des fosses pédologiques, seules quelques fourmis et iules participent à la fragmentation de la matière organique.

Dans ce milieu à structure dégradée, l'enracinement du géranium reste très superficiel avec un faible chevelu racinaire limité à l'horizon A. Ce développement racinaire concentré sur un plan à la base de cet horizon, explore un domaine de sol très réduit et apparaît très sensible aux stress hydriques et défavorable à l'alimentation minérale de la plante. Un seul pivot non ramifié permet la colonisation de l'horizon B. La tortuosité de ce pivot montre les difficultés qu'il a eu à se développer dans cet horizon où la macroporosité est très faible.

Au niveau à gratons, la ramification du pivot semble montrer une amélioration du système poral. Cette colonisation des couches profondes, où les variations saisonnières des teneurs en eau sont faibles (JAILLARD et LUC, 1980), montre les conditions limites dans lesquelles se trouve la plante.

### 5.2.2. Evolution de la macrofaune

En août 1994, les invertébrés visibles à l'oeil nu ont été dénombrés et pesés dans la litière et jusqu'à une profondeur de 30 cm (BOYER, LAVELLE, MICHELLON, 1994), selon la méthode préconisée par ANDERSON et INGRAM (1993). Ils sont classés en huit groupes taxonomiques :

- chilopodes : myriapodes prédateurs,
- diplopodes : myriapodes saprophages,
- isopodes : crustacés terrestres, avec en particulier *Talorchestia rectimana*,
- fourmis,
- larves de coléoptères, avec en particulier celles de ver blanc,
- larves de diptères, dont certaines détritophages,
- vers de terre,
- et les autres groupes (lépidoptères, ..., mais en notant l'absence de termites).

Les densités moyennes exprimées en nombre d'individus par m<sup>2</sup> sont très élevées sous jachère (figure 25) en particulier pour les diplopodes (680/m<sup>2</sup>), les isopodes (541/m<sup>2</sup>) et les vers de terre (232/m<sup>2</sup>). Ces derniers représentent plus de 95 % de la biomasse exprimée en poids frais, soit plus de 250 g par m<sup>2</sup>.

En sol nu, en monoculture de géranium, les densité et biomasse de la macrofaune sont très faibles : fourmis, larves de diptères et de coléoptères prolifèrent, contrairement à la jachère, alors que les diplopodes, isopodes, et surtout les vers de terre disparaissent complètement avec la sédentarisation du géranium.

Cette évolution de la macrofaune, et en particulier des vers de terre (par leurs galeries et déjections), a une influence prépondérante sur les caractéristiques du sol.

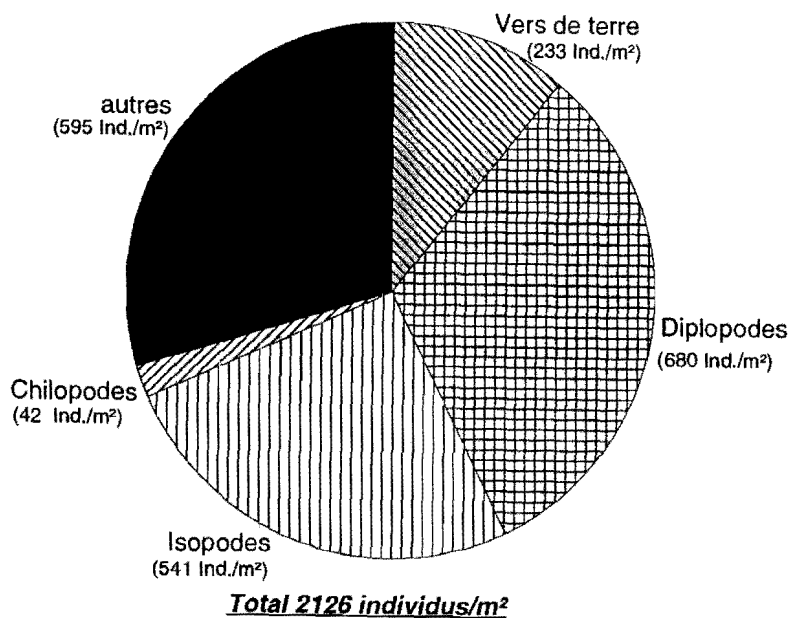
Dans les régions tropicales, les déjections de vers de terre endogés participent fortement à la macroagrégation du sol (LAVALLE, 1988 ; BLANCHART, 1992). Une partie des déjections est déposée en surface sous forme de turricules et les structures créées en profondeur ont pour effet de modifier les propriétés physiques (amélioration de la porosité, de la capacité de rétention en eau et de l'infiltration) et la texture des horizons de surface (WALLWORK, 1976, LAVALLE, 1983).

De même, les vers de terre interviennent sur le cycle de la matière organique et des nutriments par des mécanismes complémentaires :

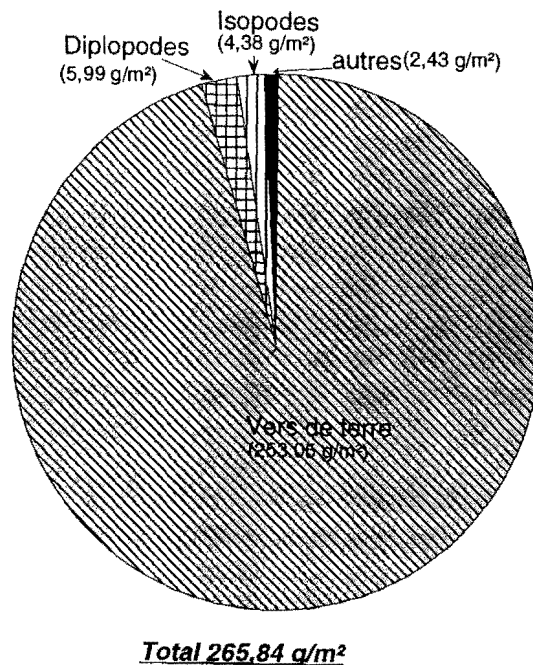
- l'augmentation de la minéralisation et de l'humification dans leur tube digestif (LAVALLE, 1986 ; BAROIS et al., 1987),
- la régulation de l'activité de la microflore libre du sol (LAVALLE, 1988 ; STORK et EGGLETON, 1992), à une échelle de temps de quelques heures à quelques jours,
- la protection de la matière organique dans leurs déjections (LAVALLE et al., 1992 ; BLANCHART et al., 1993) pendant une longue période (jusqu'à plusieurs années).

Enfin, l'activité des vers de terre peut influencer la croissance des plantes de façon directe ou indirecte par :

Densité en individus /m<sup>2</sup>

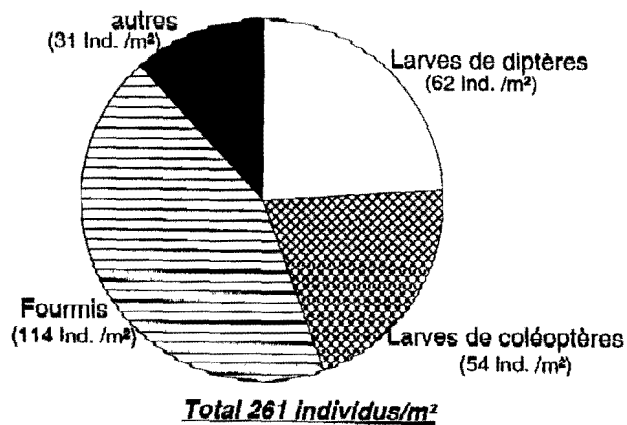


Biomasse en g /m<sup>2</sup>

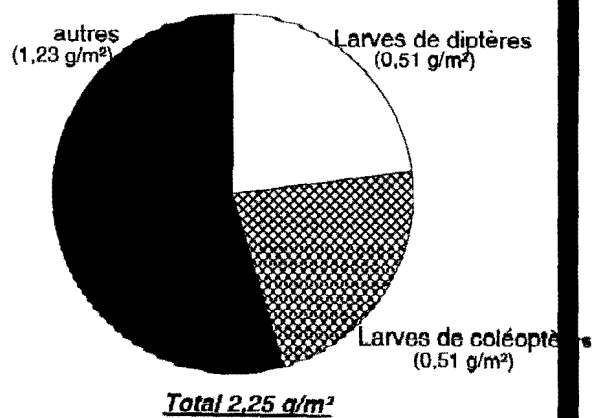


Jachère arborée de 15 ans

Densité en individus /m<sup>2</sup>



Biomasse en g /m<sup>2</sup>



25 ans de géranium en monoculture

**Figure 25 :** Densité et biomasse moyenne de la macrofaune du sol sous jachère arborée ou après 25 ans de monoculture de géranium. Seuls sont mentionnés les groupes dont les proportions sont supérieures à 1%.

- une amélioration des propriétés physiques du sol permettant un meilleur développement racinaire,
- des phases intenses de libération de nutriments (LAVELLE et al., 1992 ; STORK et EGGLETON, 1992),
- le transport de germes fixateurs d'azote ou de spores mycorhiziennes symbiotiques dans le tube digestif des vers (REDELL et SPAIN, 1991).

### 5.2.3. Influence sur les propriétés physiques et hydriques

Deux indices sont utilisés pour quantifier agrégation et stabilité structurale du sol (PY, CLARIOND, 1989 ; PERRET, 1993) :

- indice d'émiettement (M.W.D. : Mean Weight Diameter), obtenu par lavage à l'eau dans différents tamis en préservant l'émiettement original du sol. Il est exprimé en mm,
- indice de stabilité, rapport entre l'indice d'émiettement mesuré après destructuration du sol aux ultrasons et l'indice d'origine. Cet indice varie entre 0 et 1. Plus sa valeur est élevée, meilleure est la stabilité.

Le défrichage de la forêt d'*Acacia* suivi par la culture continue du géranium en monoculture entraînent une dégradation des propriétés physiques du sol (tableau 19) : agrégation et stabilité structurale. La destructuration des horizons de surface s'accompagne d'un colmatage des pores. La conductivité hydraulique à saturation devient très faible sous monoculture. L'eau s'infiltre peu et ruissele. La haie antiérosive (*Calliandra*, Bana grass) améliore très sensiblement la conductivité hydraulique : elle joue en quelque sorte le rôle d'un fossé.

Mode de gestion du sol	Conductivité hydraulique à saturation en mm/h	Indice d'émiettement (M.W.D.) en mm	Indice de stabilité	Teneur en	
				C g/100 g	N g/1000 g
Jachère de 15 ans	250 A	2,50 A	0,92 A	17,2 A	13,5 A
Monoculture de géranium en sol nu dégradé					
( - plein champ	40 B	1,10 B	0,52 B	7,1 B	6,2 B
) - à 1 m d'une haie de <i>Calliandra</i>	70 C	1,60 C	0,60 B	8,0 BC	7,9 BC
( - sous la haie de <i>Calliandra</i>	225 A	2,36 C	0,84 ACD	8,4 C	6,7 B
Géranium en rotation avec du vivrier en sol nu	60 BC	1,11 BD	0,76 C	7,1 B	5,6 B
Géranium avec couverture de kikuyu	105 D	1,41 BCD	0,83 CD	6,9 B	7,3 BC
Géranium avec couverture de lotier	70 C	1,37 BCD	0,87 AD	8,7 C	9,0 C

**Tableau 19** : Evolution des propriétés physiques, hydrodynamiques et des teneurs en carbone et azote du sol en fonction de son mode de gestion (d'après PERRET et al., 1996)

Selon le test de STUDENT, les caractéristiques du sol affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes (P = 0,1).

#### 5.2.4. Influence sur les caractéristiques chimiques

Les résultats sont regroupés sur la figure 26 (BURLE, 1993).

##### *\* Matière organique et azote*

Pour passer du taux de carbone au taux de matière organique totale, le coefficient couramment utilisé sur andosols est 1,72. Notre étude étant comparative, nous utiliserons le taux de carbone des analyses de sols.

Si nous considérons comme référence de fertilité le stade jachère sous *Acacia*, on constate une progressive diminution du taux de carbone organique et de l'azote en rapport avec le nombre d'années de culture.

Malgré cette diminution, les taux de carbone et d'azote restent relativement élevés après un quart de siècle de culture de géranium, ce qui est une caractéristique des andosols. Cependant, cette matière organique paraît faiblement humifiée.

	<i>Acacia</i>	5 ans géranium	25 ans géranium
Rapport C/N	15	18	13

**Tableau 20** : Influence de l'âge de la culture du géranium sur le rapport C/N

Sous jachère, le rapport montre une bonne humification (rapport théorique sous forêt : 15 à 20), par contre sur les deux parcelles en culture sa forte valeur indique un faible taux d'humification.

Les substances organiques, acides fulviques principalement, sont fortement liées aux produits amorphes (hydroxydes et allophanes) et peu accessibles à la microflore (PY et CLARIOND, 1989 ; RAUNET, 1991).

##### *\* Complexe adsorbant*

La capacité d'échange cationique est très forte sous jachère d'*Acacia*, elle diminue après 5 ans de culture de géranium et devient très faible après un quart de siècle de monoculture.

Une grande partie des charges négatives, donc de la CEC, est le fait de la matière organique en quantité importante dans ces sols. Par contre, les silicates d'alumine amorphes («allophanes») et les hydroxydes amorphes développent des charges positives et sont donc responsables d'une forte capacité d'échange anionique (AEC).

##### *\* Bases échangeables*

La jachère améliore considérablement la concentration en bases échangeables (notamment Ca et Mg) dans l'horizon de surface, par contre en profondeur, les trois sites ont un comportement comparable avec des teneurs proches de zéro.

Dans les 30 premiers cm, les bases échangeables sont en très faible quantité pour les deux parcelles en culture. Les taux de saturation du complexe adsorbant sont respectivement de 78 % et 53 % pour les parcelles en culture depuis 5 et 25 ans.



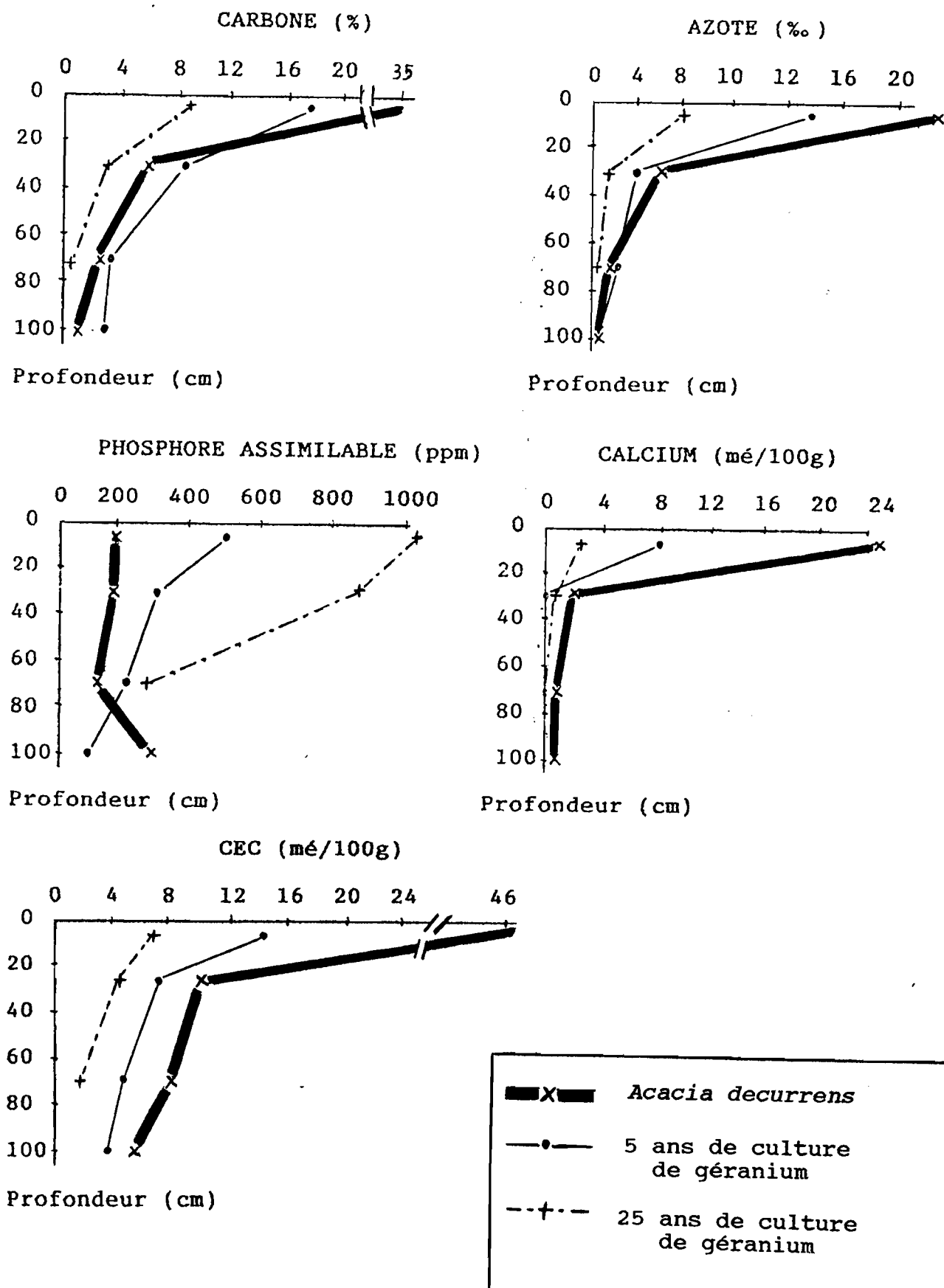


Figure 26 : Influence de la monoculture de géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques

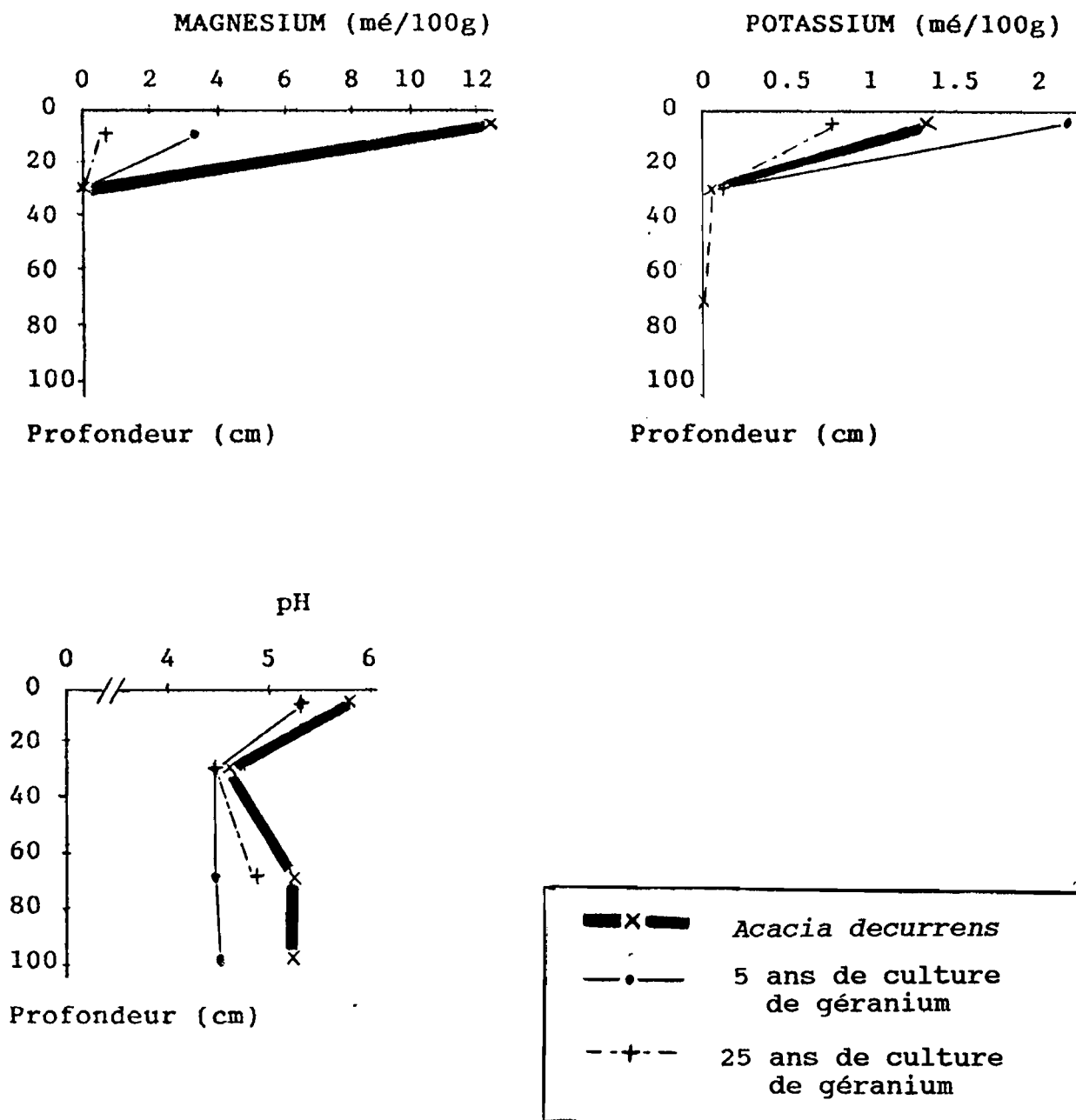


Figure 26 (suite) : Influence de la monoculture de géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques

### \* Phosphore assimilable

Les andosols de l'île de la Réunion sont riches en phosphore assimilable, mais la capacité d'échange anionique provoque une forte fixation de celui-ci.

Contrairement à tous les autres éléments chimiques, le phosphore assimilable est inversement proportionnel au nombre d'années de culture.

N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
70 à 80	15 à 25	100 à 130	100 à 150	15 à 25

**Tableau 21** : Estimation des exportations pour 20 tonnes de matière verte, soit 40 kg d'huile essentielle, en unités fertilisantes (MICHELLON, 1986)

Les exportations pour le géranium étant faibles et les fumures élevées (600 à 800 kg de 10-20-20 conseillés par FRITZ en 1973, 600 à 700 kg de 15-12-24 recommandés de puis 10 ans), il est probable que la partie non utilisée va augmenter le stock déjà disponible.

En définitive, la jachère arborée à *Acacia* améliore le stock organique, les bases échangeables et le complexe adsorbant. Elle permet une restauration de la fertilité chimique, qui est progressivement dégradée en monoculture de géranium en sol nu.

Ce système de culture avec jachère améliorante constituait autrefois la base de la culture traditionnelle. Mais l'évolution des conditions économiques a conduit à sa sédentarisation, avec augmentation de la durée de culture, qui entraîne des baisses importantes de rendement et une prolifération des dépérissements (pourridiés, flétrissement bactérien, ...).

### **5.3. Restauration de la fertilité grâce aux apports de fumier dans les systèmes en rotation ou avec cultures intercalaires**

#### **5.3.1. Modifications induites sur le profil cultural et l'enracinement du géranium**

Ces systèmes conduisent à des profils assez similaires avec une amélioration de la structure en surface, en comparaison avec les systèmes dégradés en monoculture. Les rendements les plus élevés en géranium sont obtenus avec rotations et travail minimum du sol, dont les profils ont été décrits par BURLE (1993).

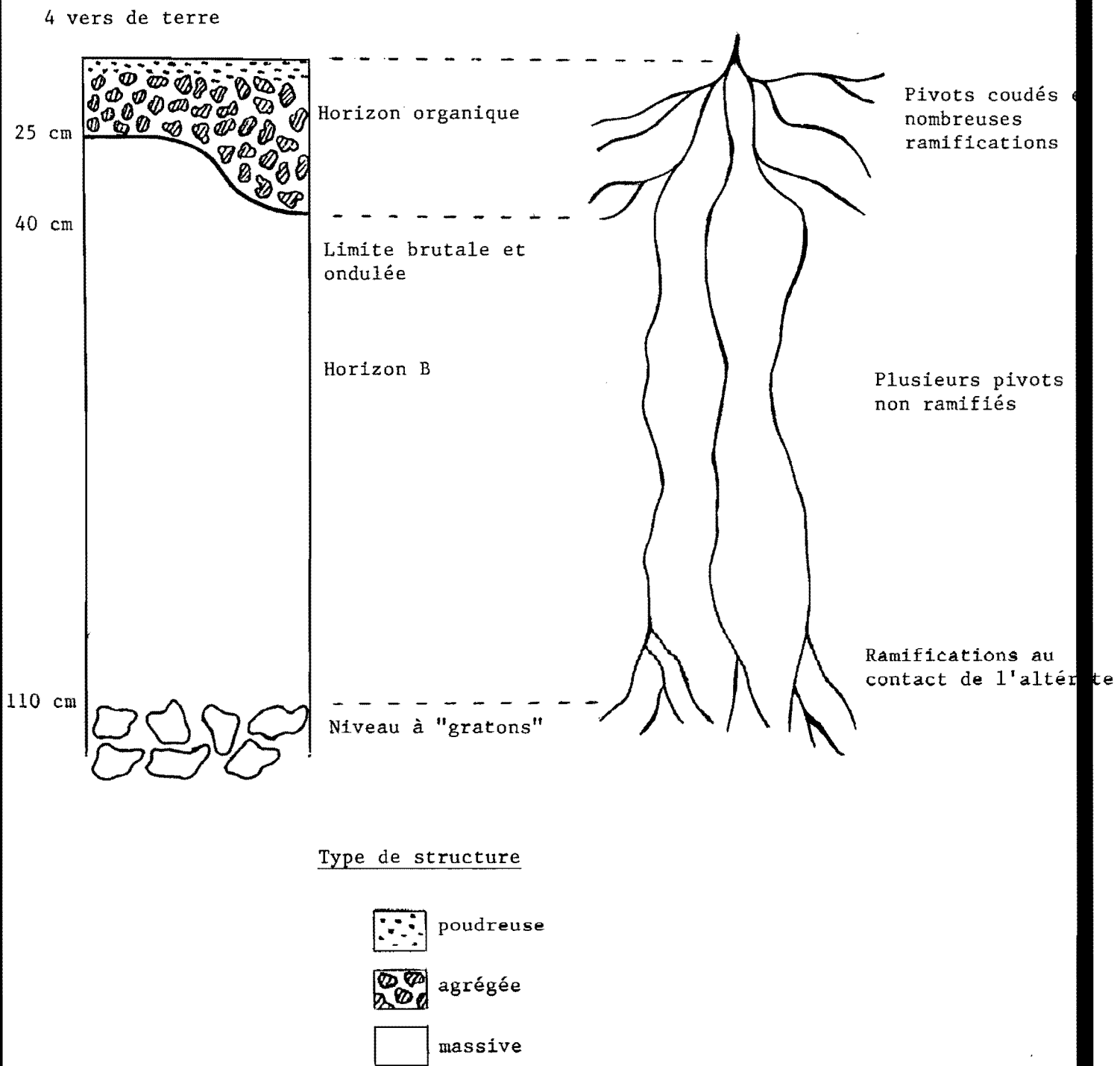
#### **a) Impact sur le profil cultural**

Dans ce système avec rotation, l'horizon A organique est épais, de 25 à 40 cm (figure 27) avec des agrégats de quelques millimètres.

Sur les cinq premiers centimètres de l'horizon, la structure est beaucoup plus fine avec peu d'agrégats stables. Malgré l'apport de fumier, l'activité biologique semble se limiter à la présence de vers de terre (4 individus/m<sup>2</sup>) dans les trente premiers centimètres de sol.

La limite de l'horizon A avec le niveau sous-jacent est brutale et ondulée. L'horizon B a une structure continue et ne présente pas de macroporosité. Les vers de terre en sont absents.

Figure 27 : Géranium en sol nu en rotation avec des cultures vivrières  
(6ème année de production du géranium)



Enfin, le niveau à «gratons» apparaît vers 110 cm de profondeur toujours surmonté par une couche de sol de couleur plus rouge et qui semble plus poreuse.

### **b) Modification de l'enracinement du géranium**

Dans l'horizon organique de surface, l'amélioration structurale permet un développement racinaire plus important. L'épaisseur de cet horizon augmente considérablement par rapport au sol en monoculture et plusieurs pivots établissent un grand nombre de ramifications. Dans les systèmes avec cultures intercalaires, la densité des racines augmente très sensiblement dans l'interligne, où le compost est localisé.

La macroporosité de l'horizon B étant faible, seuls les gros pivots à fort pouvoir de pénétration peuvent le traverser. Ces gros pivots peu ramifiés ont peu d'action sur l'alimentation hydrique et minérale, ils assurent uniquement un transfert des éléments minéraux (CALLOT et al., 1982) à partir des matériaux basaltiques.

Par rapport à la parcelle en monoculture où un seul pivot se développe dans l'horizon B, l'amélioration de l'épaisseur et de la structure de l'horizon A permettent à plusieurs pivots de traverser cet horizon B jusqu'au niveau à «gratons».

Dans cet horizon caillouteux en cours d'altération, les conditions de développement sont meilleures car les pivots se ramifient. De plus, des racines fines, actives dans les phénomènes d'absorptions, apparaissent.

En conclusion, ce système avec rotation améliore considérablement la structure continue de l'horizon B.

Ces changements de conditions du milieu ont modifié l'enracinement du géranium. Toutefois, la quantité de racines n'est pas en relation directe avec la biomasse des parties aériennes (CANNEL, 1986), il importe surtout de connaître les zones d'absorption préférentielle des racines actives qui sont en fait les racines les plus fines.

La modélisation des niveaux d'absorption racinaire dans ce système intégrant une rotation, permet de mettre en évidence deux niveaux préférentiels :

- l'horizon organique de surface où la structure est favorable,
- l'horizon à «gratons» où les racines altèrent le matériau basaltique et retirent les matériaux nécessaires à leur nutrition.

Dans le cadre de la lutte contre l'érosion, il faut noter les limites de ces systèmes de culture. En effet, sous l'action des facteurs climatiques, les premiers centimètres du sol acquièrent une structure farineuse, donc facilement mobilisable par les eaux de ruissellement. Dans le cas d'une rotation avec labour, l'horizon A est beaucoup plus pulvérulent, moins structuré, et encore plus sensible à l'érosion. Le dessèchement irréversible du sol en surface rend aussi plus difficile la pénétration des racines en profondeur (PERRET, 1992).

#### **5.3.2. Quantification de la macrofaune**

Quel que soit le système de culture en sol nu (figure 28), les densités et biomasse de la macrofaune restent très faibles (BOYER, LAVELLE, MICHELLON, 1994).

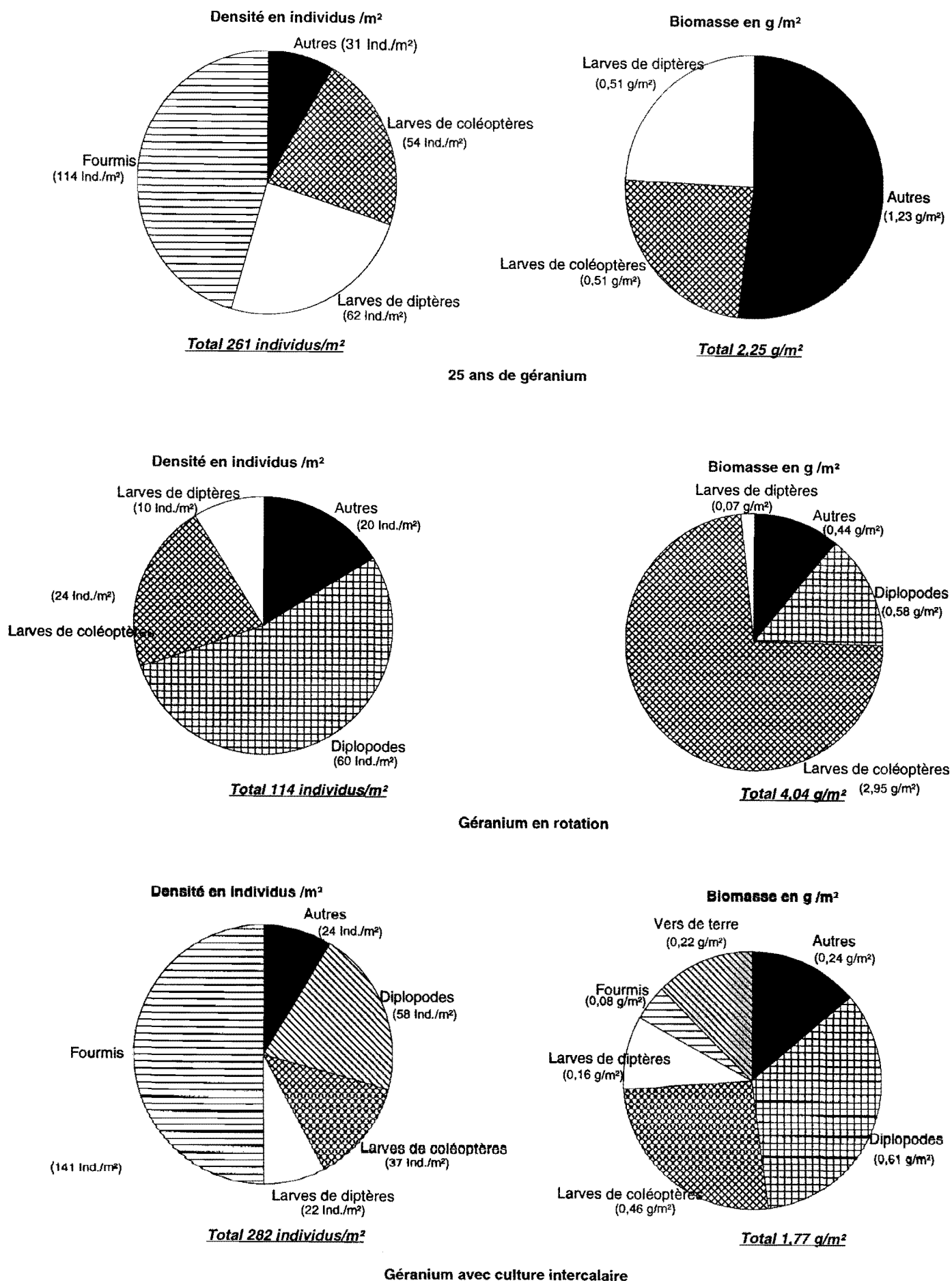


Figure 28 : Densité et biomasse moyenne de la macrofaune du sol sous différents systèmes de culture de géranium en sol nu.

Nous devons noter que contrairement au système de culture en rotation précédent (paragraphe 5.3.1.), où le géranium a bénéficié d'un apport de compost tous les ans, la parcelle étudiée n'a pas reçu de matière organique depuis la période de culture des vivrières (5 ans plus tôt).

Nous avons vu que lors de la sédentarisation du géranium, les diplopodes, isopodes et vers de terre qui dominaient sous la jachère disparaissent en monoculture. Avec un apport de matière organique faible en culture intercalaire (3 t/ha de compost de géranium par an pour le haricot), les diplopodes et vers de terre réapparaissent.

### 5.3.3. Propriétés physiques et hydriques

En sol nu, les propriétés physiques et hydriques ne sont que peu affectées par l'introduction d'une rotation avec apport de matière organique (tableau 19). La stabilité des agrégats est améliorée ( $I_s = 0,76$  sous géranium avec rotation, contre 0,56 en monoculture) comme l'ont aussi montré PY et CLARIOND (1989), et semble-t-il la conductivité hydraulique.

### 5.3.4. Evolution des caractéristiques chimiques

#### a) **Cultures intercalaires**

Les cultures intercalaires du géranium mises en place pendant une décennie sur un terrain dégradé conduisent à une productivité nettement accrue du géranium associé par rapport à la monoculture. Les profils chimiques actuels correspondants montrent des différences (figure 29) qui concordent avec les évolutions observées pour chaque système de culture depuis 5 ans, sauf pour le potassium, le carbone et l'azote. Mais les prélèvements ont été réalisés à une période climatique différente : (avant la saison pluvieuse de 1987, correspondant à une minéralisation plus importante de l'azote, ou en hiver pour 1993, après lessivage de l'azote et du potassium par les fortes pluies).

#### *\* Matière organique et azote*

Au cours des cinq dernières années, le carbone et l'azote diminuent sur tout le profil en monoculture ou avec des intercalaires. Cependant, la régression la plus importante concerne la monoculture. Les apports réguliers de compost destinés aux cultures vivrières, la fixation d'azote atmosphérique par les haricots et surtout l'activité biologique accrue dans le système avec intercalaire expliquent cette différence.

#### *\* Complexe adsorbant*

Du fait de l'importance dans les andosols de colloïdes à charges variables (allophanes), la capacité d'échange cationique (CEC) développée par le complexe argilo-humique est fortement liée avec le taux de matière organique (RAUNET, 1991).

La valeur de la CEC varie du simple au double sur tout le profil entre les deux itinéraires, en faveur de la culture avec intercalaires. L'absence de restitution organique provoque une diminution régulière de la CEC pour la monoculture.

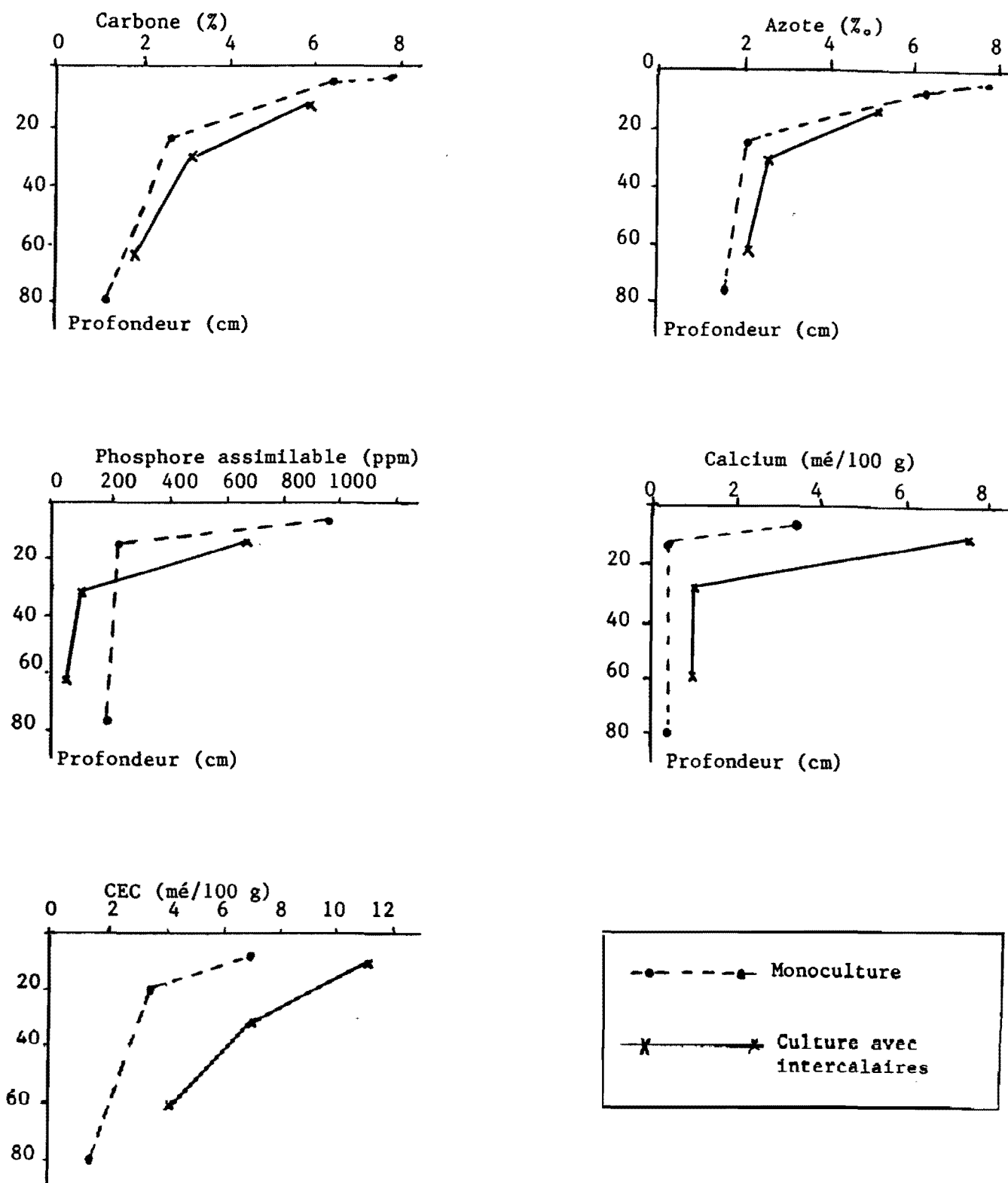


Figure 29 : Influence de la culture avec intercalaire sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol par rapport à la monoculture



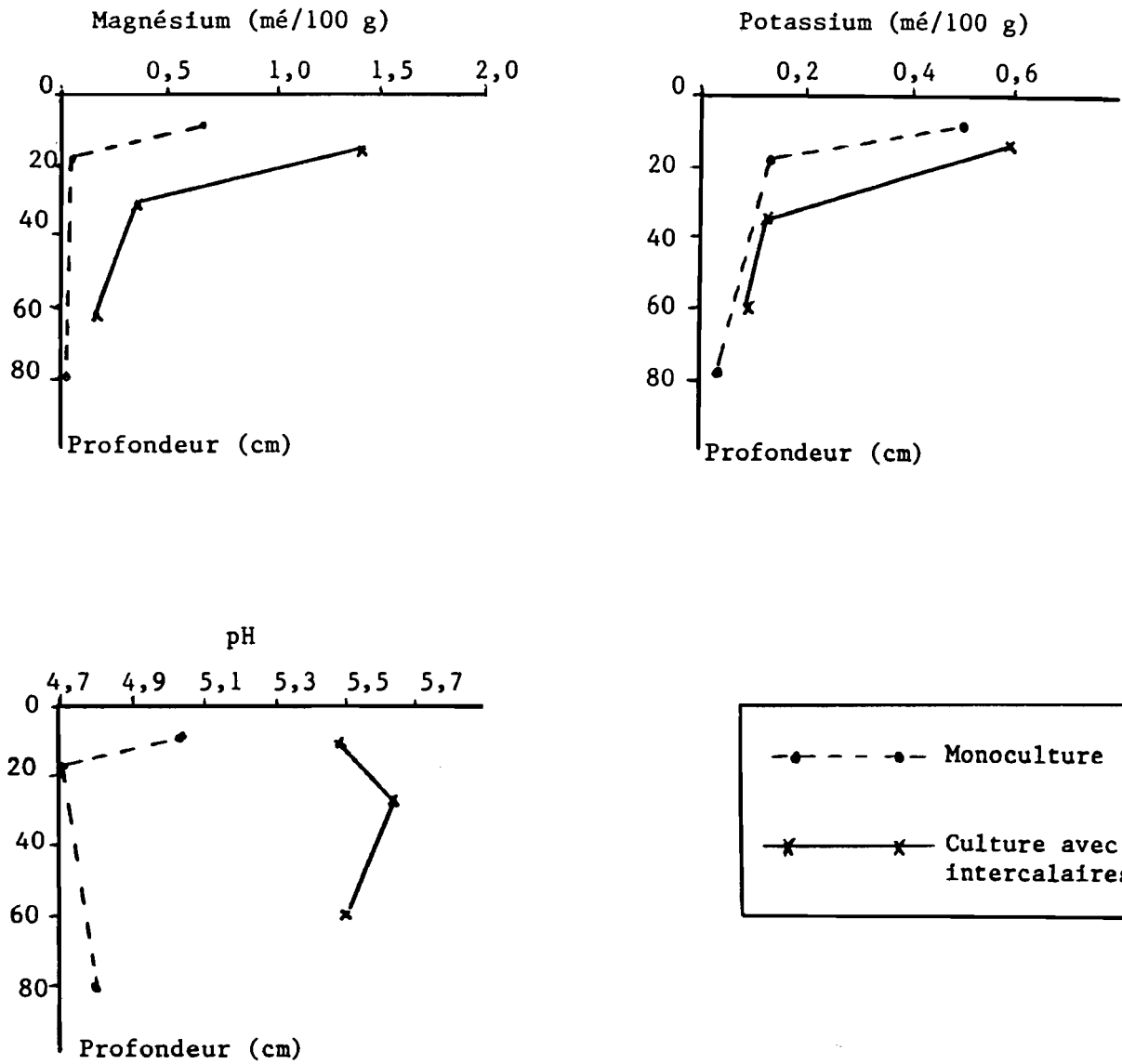


Figure 29 (suite) : Influence de la culture avec intercalaire sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol par rapport à la monoculture

### \* Bases échangeables

Le système avec cultures intercalaires améliore très sensiblement les teneurs en Ca, Mg et K contrairement à la monoculture. Les niveaux de fumure minérale étant équivalents, cette progression est probablement due à une meilleure activité biologique du sol et dans une faible mesure aux éléments minéraux contenus dans le compost de géranium.

Les analyses minérale ont montré que 10 tonnes de ce compost permettraient les restitutions suivantes, exprimées en unités fertilisantes.

N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
70-80	20	50	150	20

L'apport annuel de 3 t par ha de compost à la culture intercalaire (6 t pour 2 cycles par an) conduit donc à des restitutions équivalentes aux exportations liées au supplément de production.

### \* Phosphore assimilable

Comme en monoculture, la teneur en phosphore assimilable apparaît élevée, les apports compensant largement les exportations.

Globalement, les intercalaires améliorent sensiblement la productivité de la terre par rapport à la monoculture. L'apport régulier de compost de géranium conduit à une activité biologique plus importante dont les effets sur les caractéristiques chimiques sont marqués, en particulier au niveau du pH, des bases échangeables et du complexe adsorbant.

### b) Rotations

Les itinéraires techniques avec rotations culturales qui sont comparés à la monoculture comportent :

- deux niveaux intensifs conduits soit avec travail minimum du sol, soit avec labour au cours des cycles précédant la mise en place du géranium,
- un itinéraire traditionnel amélioré grâce aux rotations, avec des intrants réduits (fumure, pas de traitements phytosanitaires, ...) et entretien par sarclage.

Plusieurs répétitions décalées dans le temps ont été réalisées dans les mêmes conditions (géranium en rotation avec 2, 3, 4 ou 5 ans de cultures vivrières ou maraîchères). Les profils chimiques sont décrits pour les systèmes en sixième année de géranium, succédant à 3 ans de cultures diversifiées, et se généralisent aux autres cas.

### \* Matière organique et azote (figures 30 et 31)

Ces deux éléments varient dans le même sens pour tous les itinéraires considérés. La parcelle en monoculture présente une diminution du carbone et de l'azote tandis qu'une nette amélioration se produit en rotation avec travail minimum du sol.

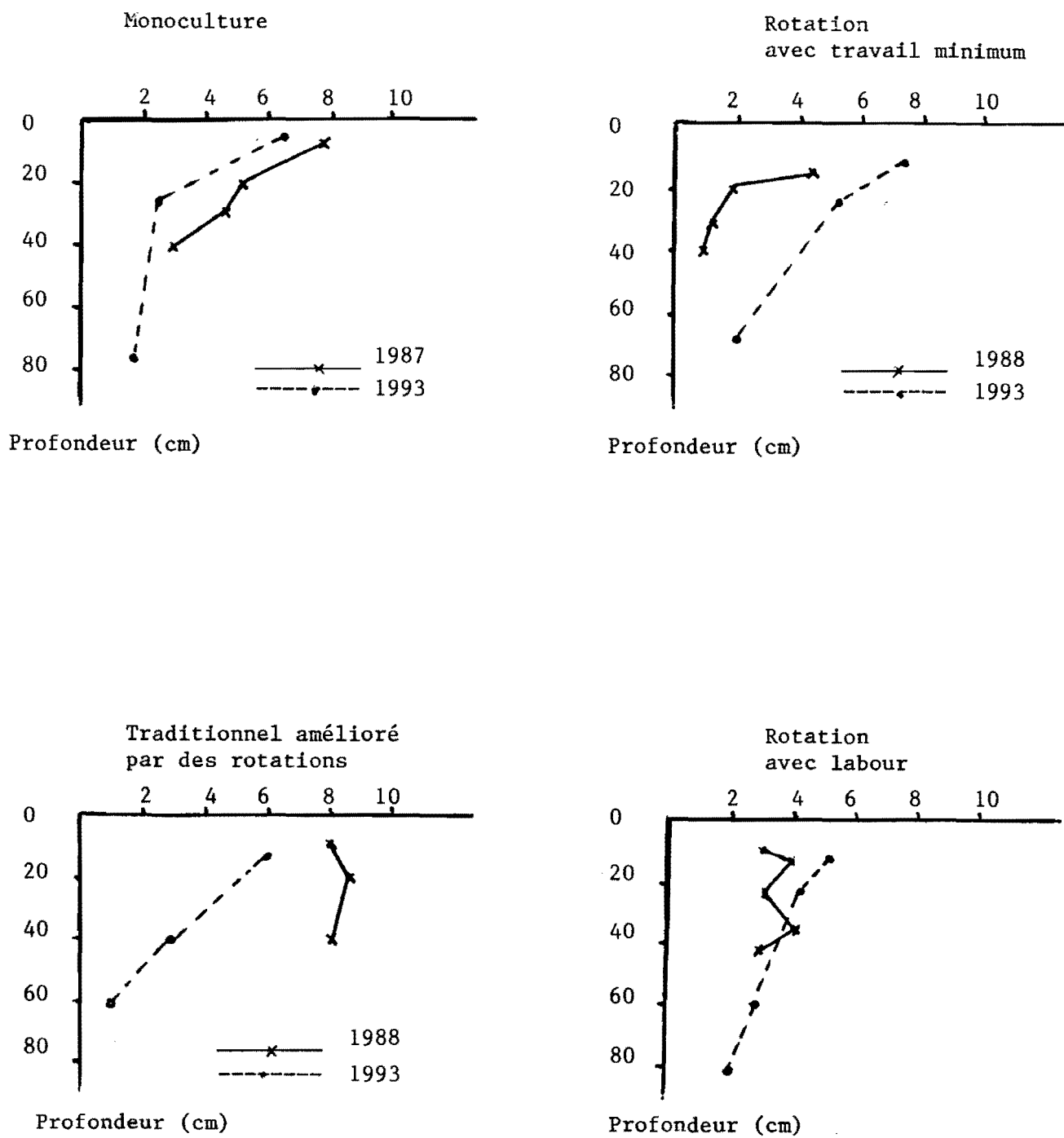
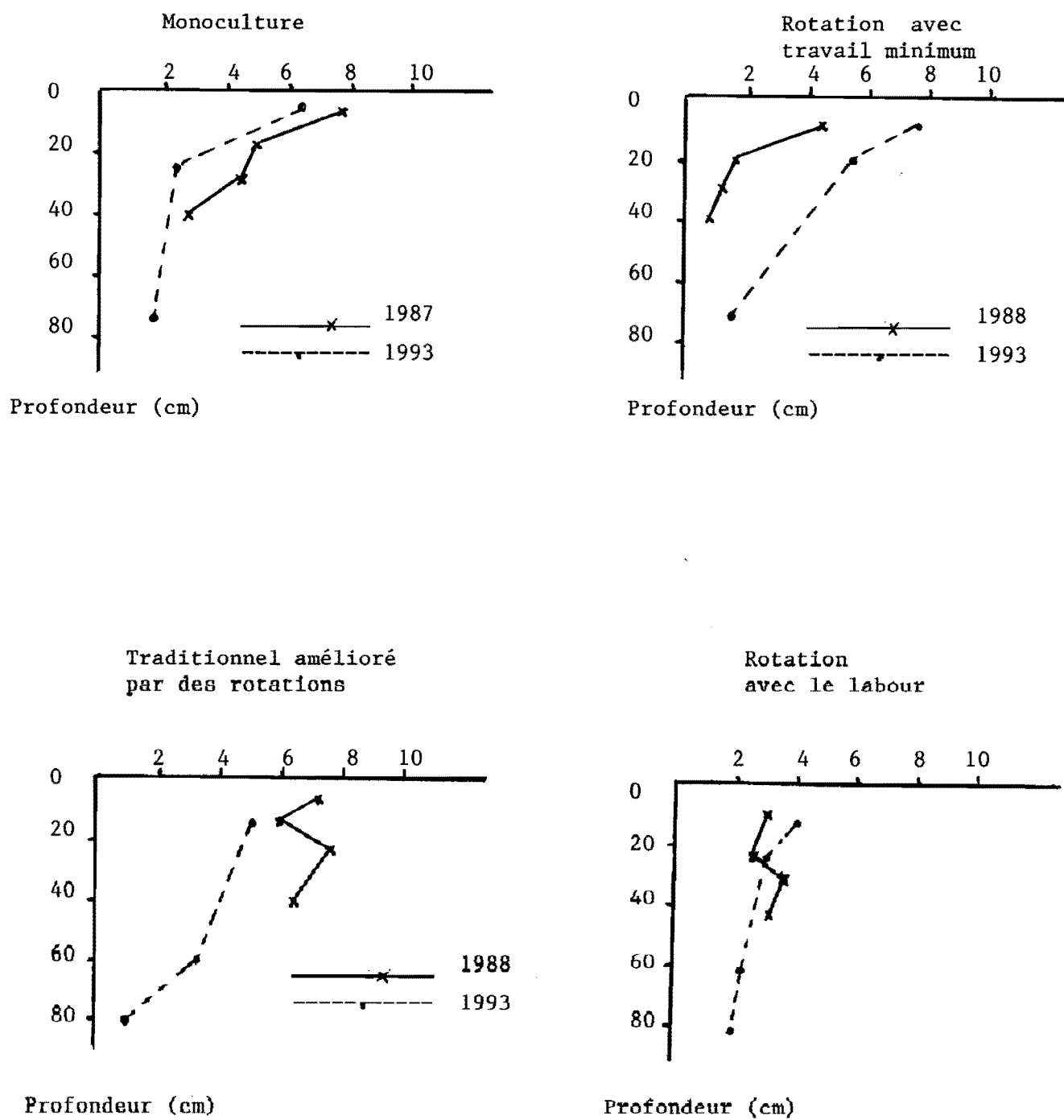


Figure 30 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution de la teneur en carbone (%)



**Figure 31** : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution de la teneur en azote (‰)

Le labour a permis d'homogénéiser le profil chimique pendant les premières années qui ont suivi la monoculture du géranium. Six ans plus tard l'activité de la faune reste réduite (ver de terre) et l'augmentation des teneurs en carbone et azote très limitée, malgré des apports de fumier équivalents à ceux du système avec travail minimum du sol.

Dans le système traditionnel amélioré, les restitutions sont réduites et les adventices pérennes n'ont pas été maîtrisées au cours des dernières années du cycle de géranium (*Phalaris arundinacea*, *Cyperus rotundus*, ...). Leur couverture épaisse a été détruite par sarclage et mise en andains avant la réalisation des profils de 1993.

**\* Complexe adsorbant (figure 32)**

La CEC étant fortement liée au taux de matière organique, nous retrouvons pour les différents itinéraires une évolution voisine de celle du carbone et une amélioration plus sensible avec rotation et travail minimum.

**\* Bases échangeables (figures 33, 34 et 35)**

Globalement, leurs teneurs sont faibles sur l'ensemble des profils. Seuls les itinéraires avec rotation et travail minimum du sol conduisent à une augmentation sensible des teneurs en calcium, magnésium, potassium.

Les pertes en calcium et magnésium sont liées :

- à la lixiviation de ces éléments, mesurée dans les lysimètres voisins (CHABALIER, 1989),
- à l'érosion intense qui sévit dans la zone à géranium, estimée à 20 t/ha en moyenne, atteignant 50 à 200 t/ha en année cyclonique (BOUGERE, 1988), et dépendant essentiellement du niveau de dégradation du sol et de sa gestion (PERRET, MICHELLON, TASSIN, 1994),
- à l'importance des exportations en calcium par le géranium, non restituées en monoculture, ...

En monoculture, l'acidité du sol s'accroît très sensiblement (figure 36) alors que le pH reste favorable aux cultures dans les systèmes avec rotation.

**\* Phosphore assimilable (figure 37)**

Seuls les systèmes intensifs avec rotations et travail superficiel du sol conduisent à une augmentation sensible des teneurs en phosphore assimilable.

Les systèmes avec rotation culturale pratiqués avec travail minimum pendant une décennie en sol nu conduisent :

- à des rendements supérieurs à ceux obtenus avec labour,
- à une amélioration des taux de matière organique, d'azote et de la capacité d'échange, qui, par contre, demeurent quasiment inchangés avec travail du sol, malgré les apports réguliers de fumier,
- et à une augmentation des bases échangeables : calcium, magnésium et potassium, qui chutent avec labour.

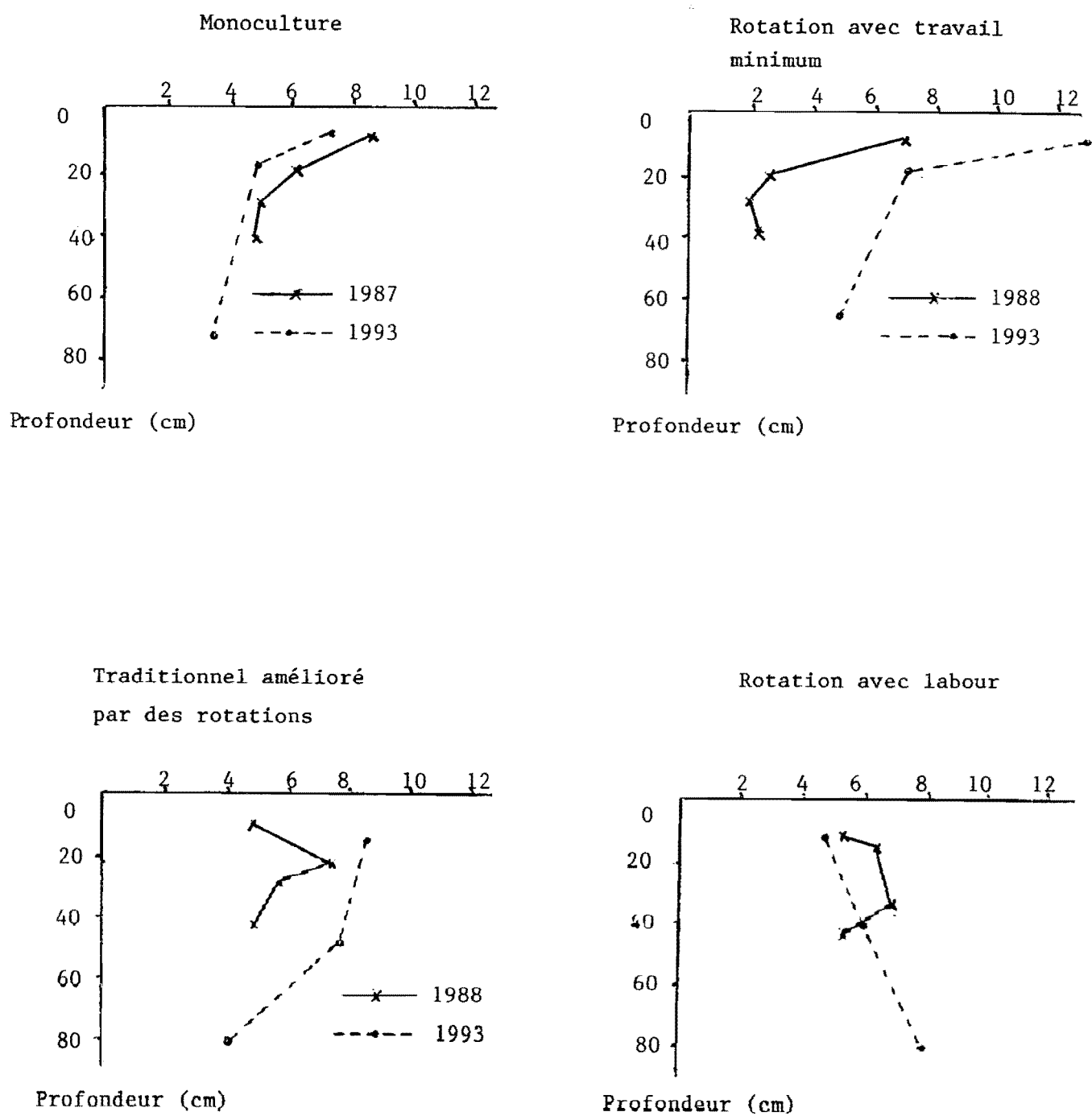


Figure 32 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution de la CEC (mé/100 g)

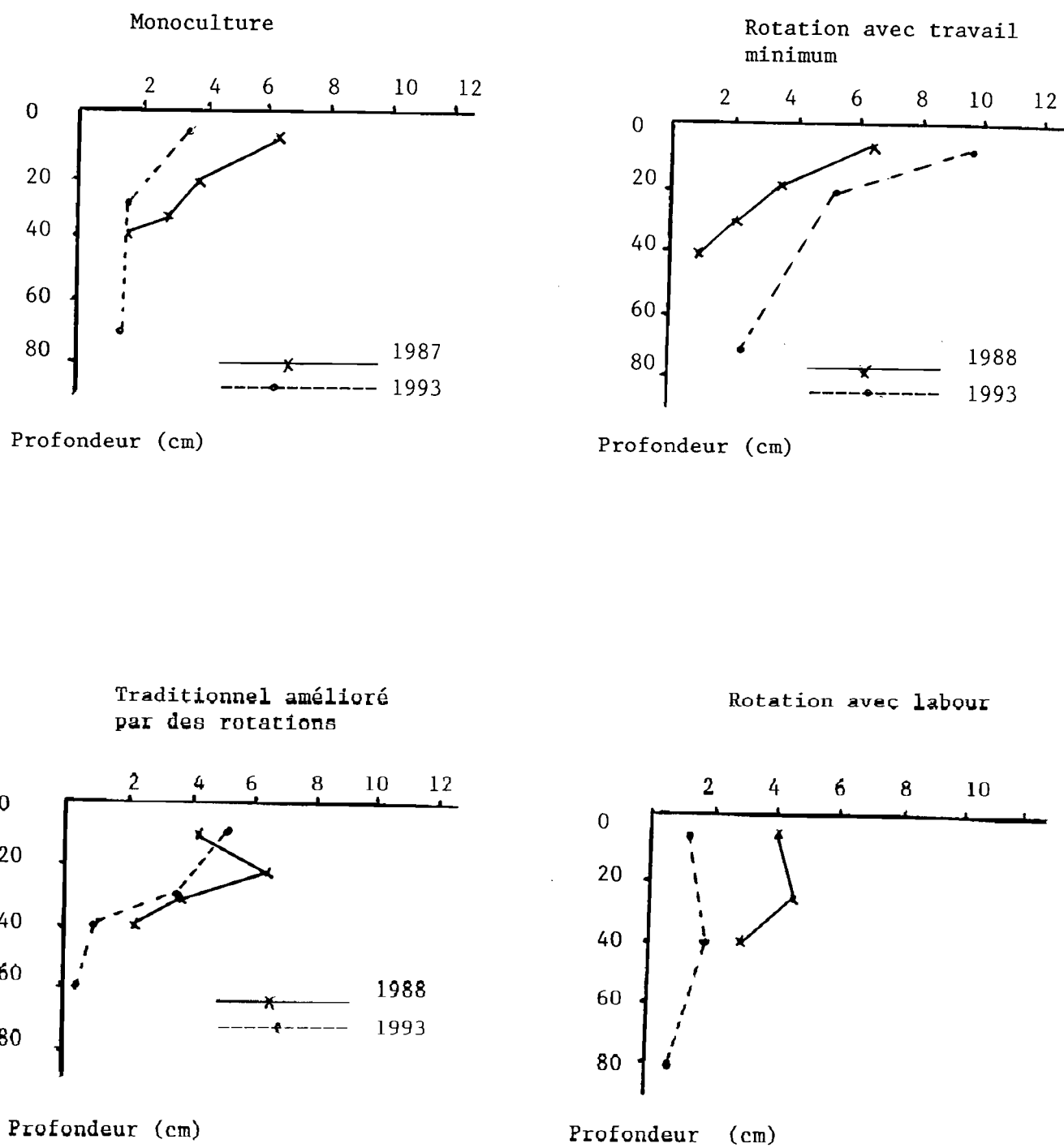


Figure 33 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution de la teneur en calcium (mé/100 g)

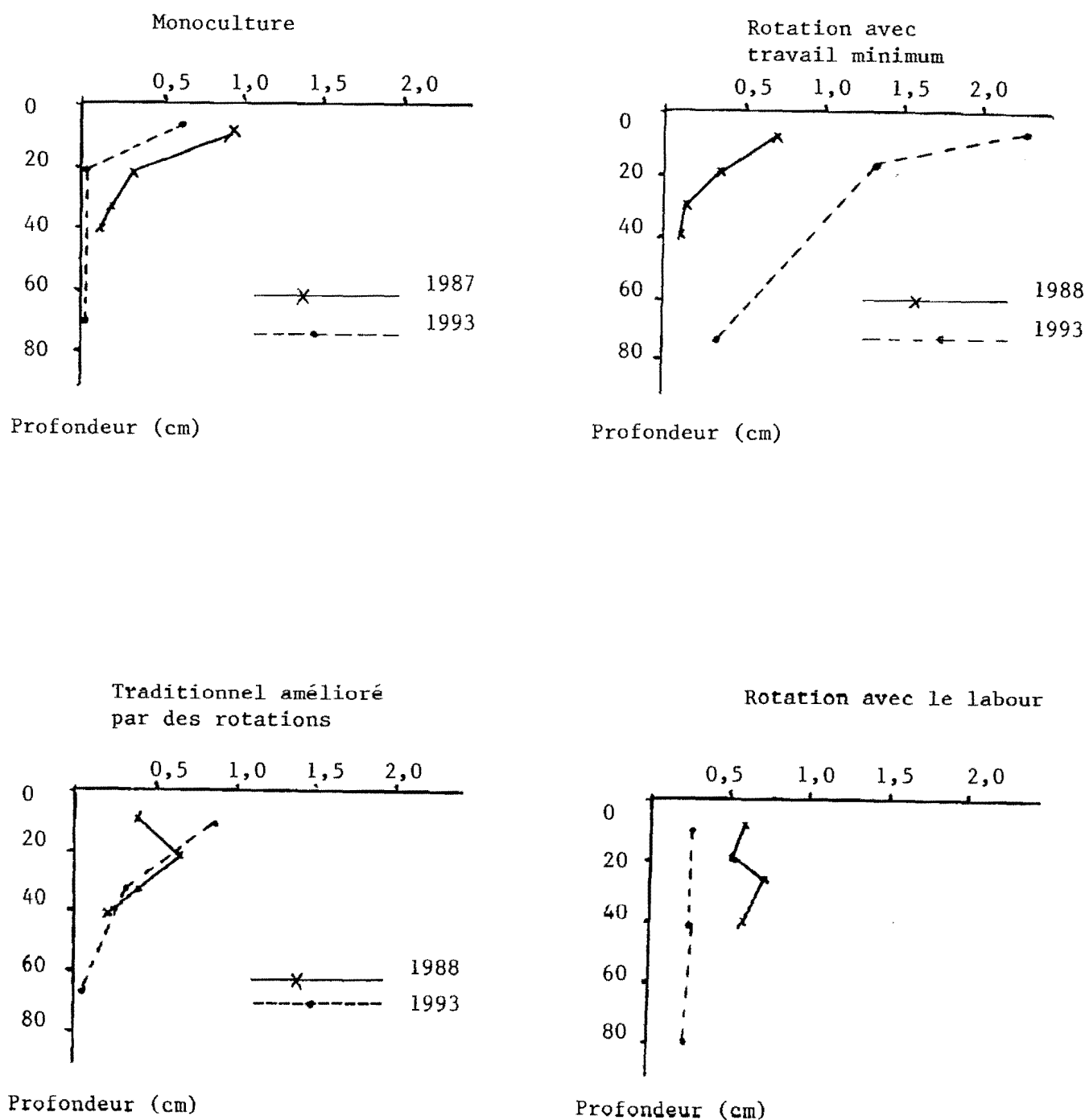


Figure 34 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution du taux de magnésium (mé/100 g)



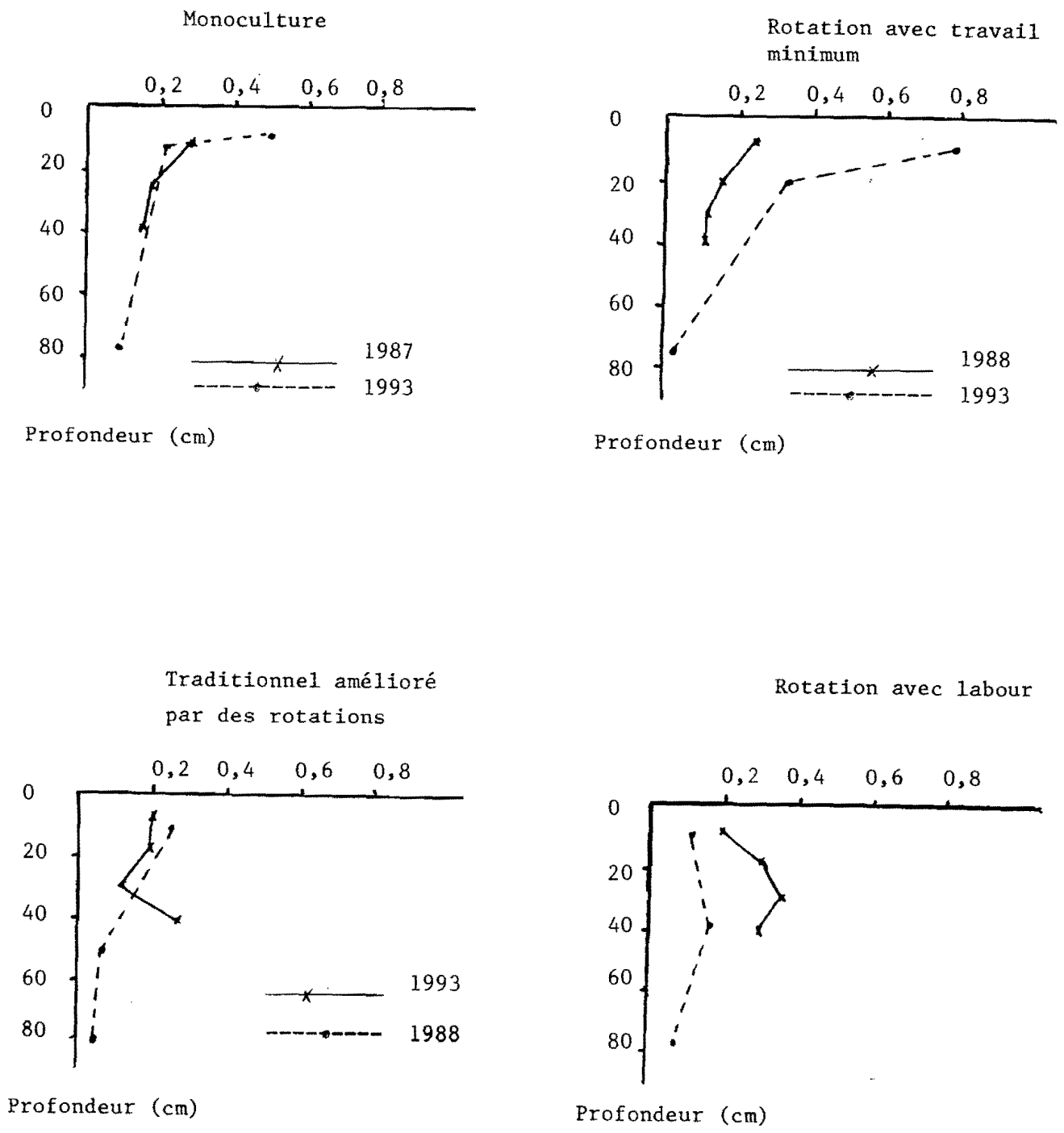


Figure 35 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution de la teneur en potassium (mé/100 g)

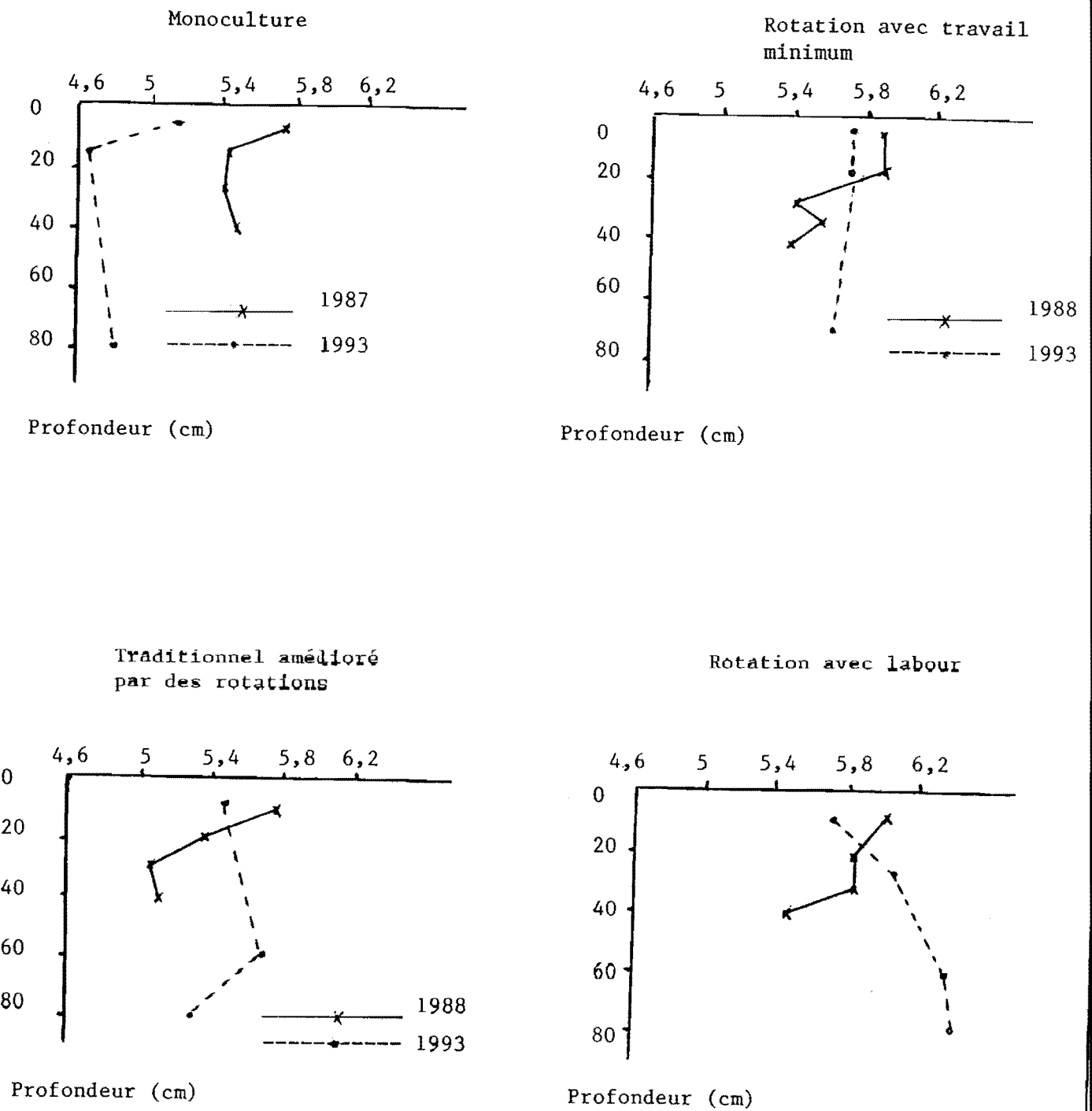


Figure 36 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution du pH eau

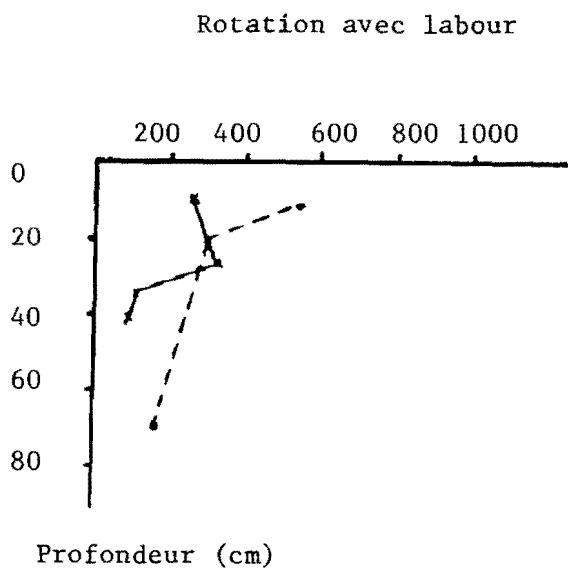
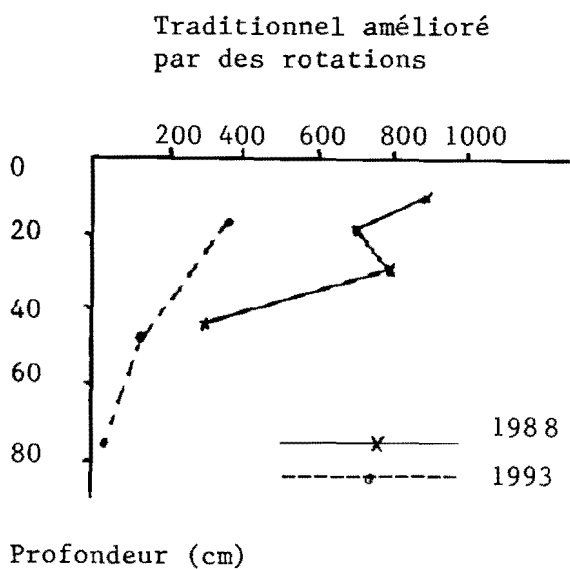
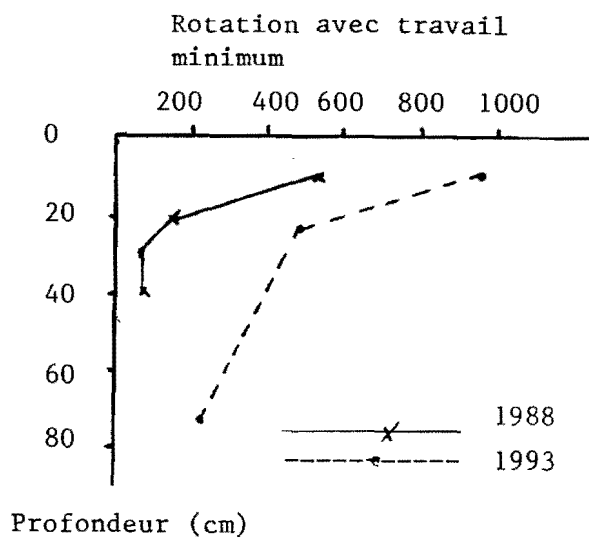
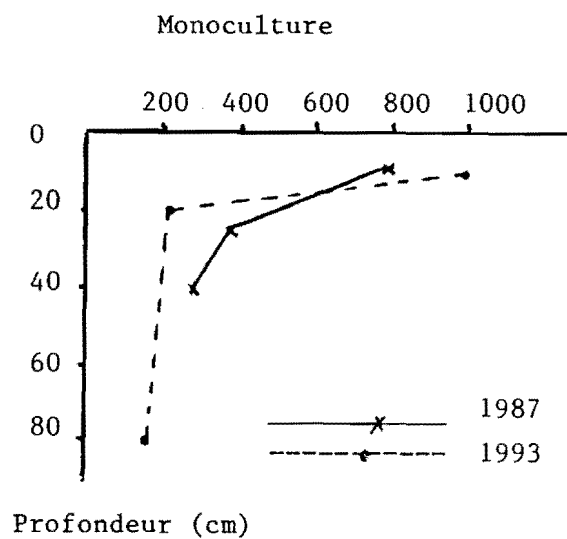


Figure 37 : Influence de la monoculture et de rotations sur l'évolution de la teneur en phosphore assimilable en p.p.m.

Les rendements du géranium inclus dans les rotations culturales sont supérieurs à ceux obtenus dans les systèmes de cultures intercalaires. Il en est de même de la plupart des paramètres chimiques analysés (figure 38), malgré des apports minéraux et des restitutions organiques inférieures.

#### **5.4. Amélioration du fonctionnement biologique des sols sous couverture herbacée**

##### **5.4.1. Profils culturaux et racinaires**

Les systèmes développés avec **couverture morte** conduisent à une amélioration de l'activité biologique par rapport aux itinéraires en sol nu et se caractérisent par un horizon A plus développé et mieux structuré. Contrairement au sol nu, ils présentent une transition progressive et ondulée entre l'horizon A et B révélant 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 microorganismes.

Les végétaux utilisés pour constituer les couvertures mortes n'étant plus présents dans les parcelles (avoines ou pailles de cannes décomposées) lors de la réalisation des profils, nous développerons les observations effectuées avec les couvertures vives.

##### **a) Couverture permanente de kikuyu**

Dans ce système de culture, l'activité lombricienne apparaît incomparablement plus développées avec une densité de 53 individus/m<sup>2</sup>, ainsi que celle du reste de la faune (fourmis, microarthropodes). La structure de l'horizon organique est grumeleuse avec les agrégats discernables et soudés entre eux, la profondeur de cet horizon est de 30 cm (figure 39). Une partie des agrégats adhérents aux racines et aux poils absorbants de kikuyu qui ont abondamment colonisé cet horizon de surface.

Contrairement aux systèmes de culture en sol nu, la limite de l'horizon A avec celui sous-jacent est progressive. Malgré leur densité importante, l'action des vers de terre se concentre dans les 30 premiers centimètres où la matière organique est plus abondante.

La colonisation, par les racines kikuyu, de l'horizon B explique l'absence de limite brutale entre les deux horizons.

L'enracinement du kikuyu est relativement profond (70 à 80 cm) et améliore considérablement la structure de cet horizon B par rapport aux systèmes de culture précédents. Entre la base du système racinaire du kikuyu et le niveau à «gratons» (110 cm) apparaît un horizon de couleur plus rouge (10 YR 5/6) dont la porosité semble être supérieure. L'enracinement du géranium s'adapte aux nouvelles contraintes structurales imposées par celui du kikuyu et à sa concurrence. Ainsi, dans l'horizon A, on note un important développement des racines latérales qui explorent le sol dans l'inter-rang avec semble-t-il une faible émission de jeunes racines absorbantes. Malgré l'amélioration de la macroporosité par les racines de kikuyu, un seul pivot non ramifié a colonisé l'horizon B. Mais il se ramifie dans l'horizon plus rouge au-dessous de l'enracinement du kikuyu jusqu'au niveau à «gratons».

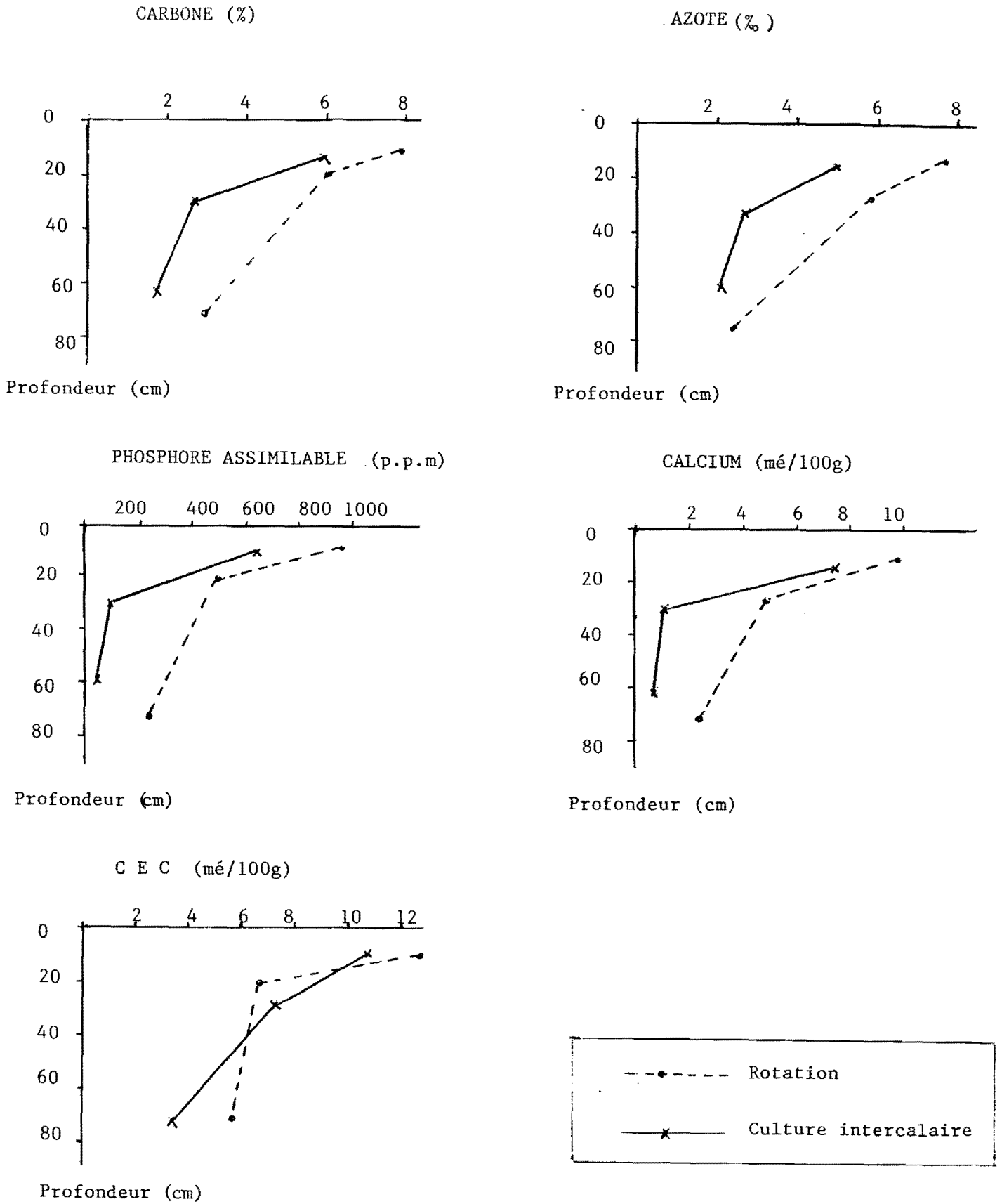
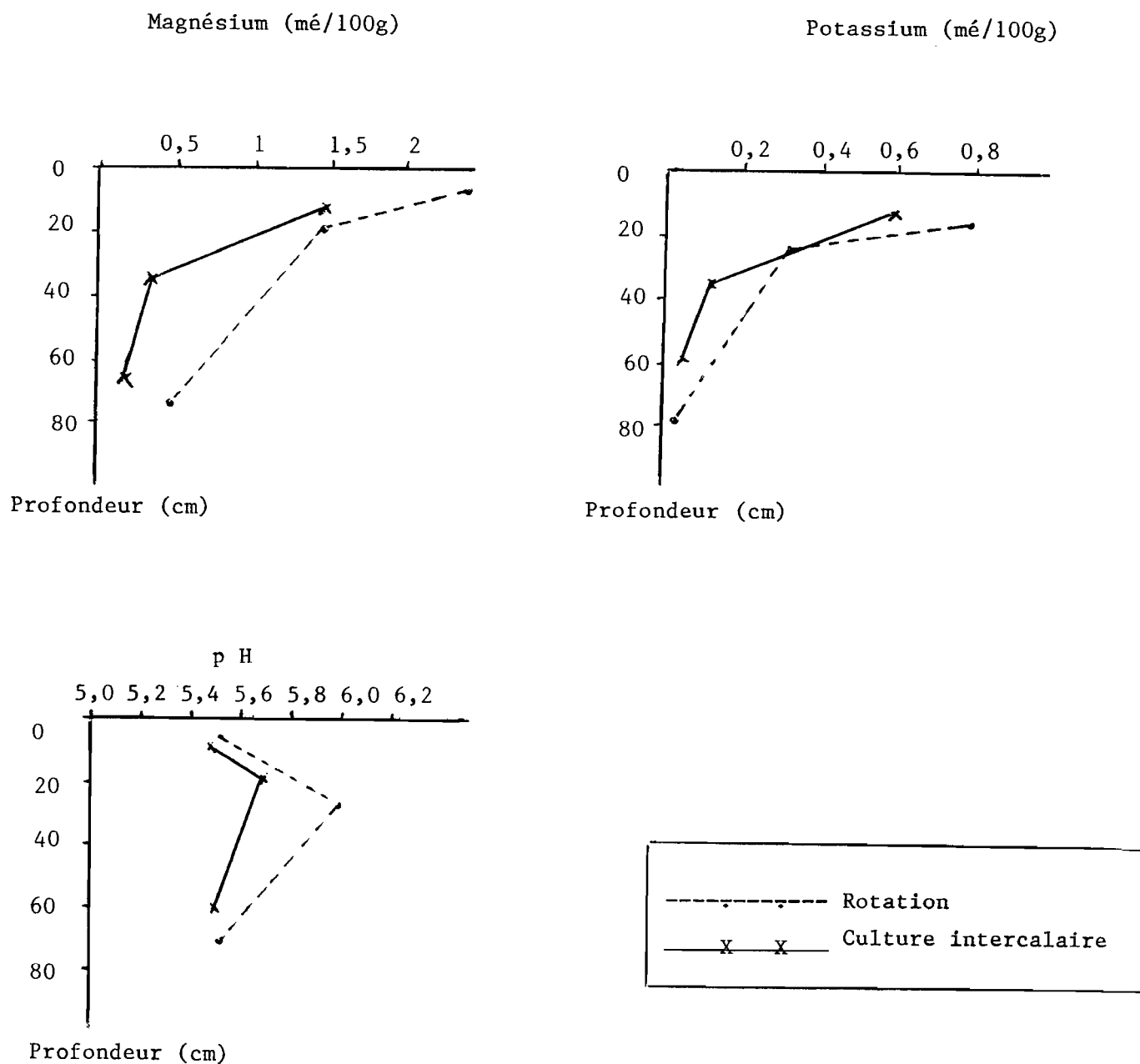
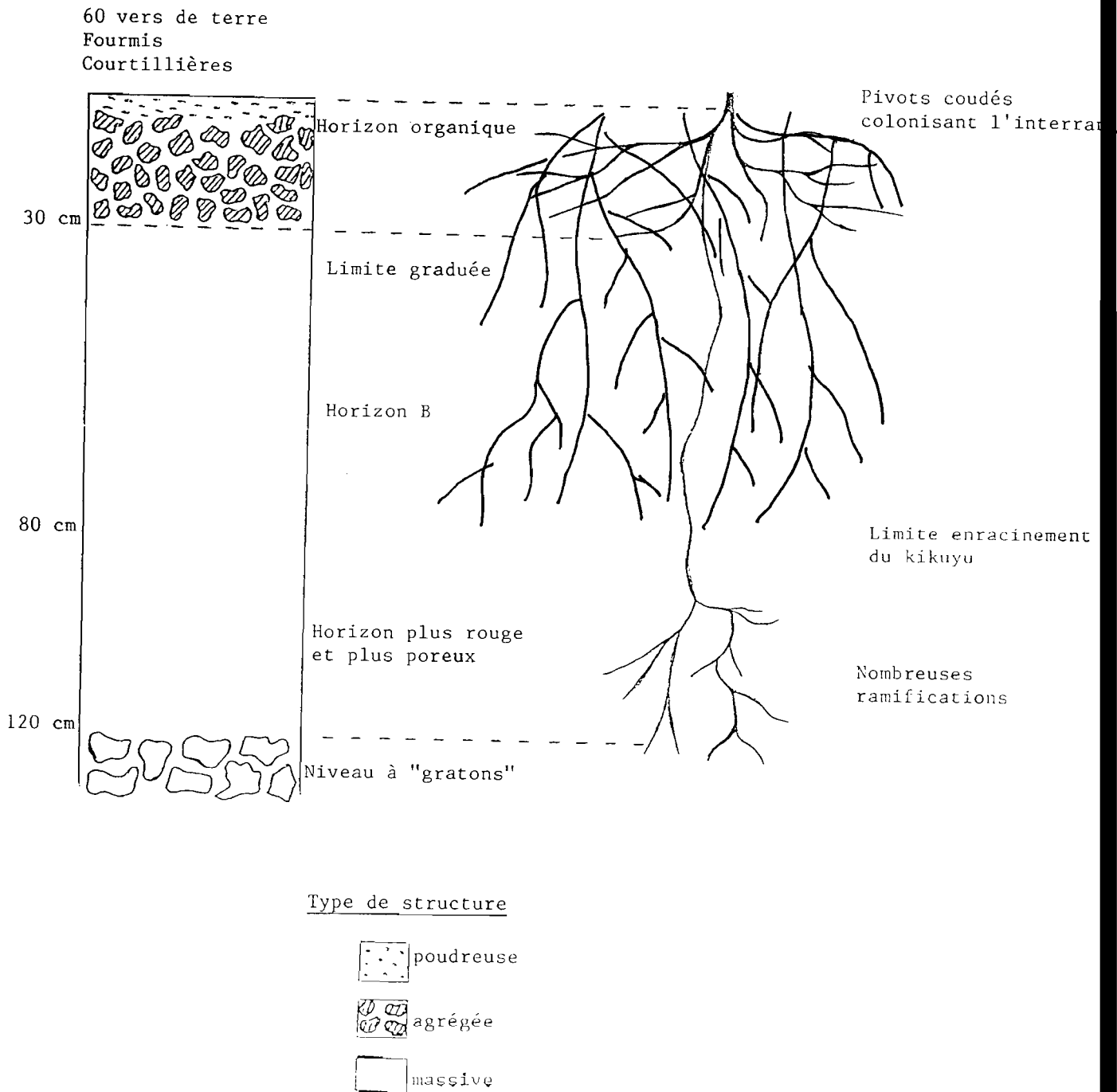


Figure 38 : Comparaison de systèmes avec rotation et travail minimum du sol ou avec cultures intercalaires sur les caractéristiques chimiques du sol



**Figure 38 (suite) :** Comparaison de systèmes avec rotation et travail minimum du sol ou avec cultures intercalaires sur les caractéristiques chimiques du sol

Figure 39 : Géranium avec couverture de kikuyu



Pour ce système de culture, les niveaux préférentiels d'absorption racinaire semblent être :

- l'horizon organique de surface où l'enracinement dans l'inter-rang est fortement développé,
- la couche de sol se trouvant à la base des racines du kikuyu jusqu'au niveau à «gratons».

#### **b) Couverture permanente de lotier**

L'épaisseur de l'horizon organique est plus réduite (15 à 20 cm) que dans le système avec kikuyu (figure 40). Cette légumineuse de couverture présente un système racinaire plus traçant et induit également une amélioration de l'activité lombricienne (7,4 individus/m<sup>2</sup>) par rapport aux deux systèmes en sol nu. De très nombreux escargots sont présents dans les parties aériennes.

Par rapport au système avec kikuyu, la structure est plutôt micro-agrégée du fait de la moindre activité lombricienne. Les racines ont de nombreuses nodosités, mais elles ont un pouvoir structurant plus faible ; elles n'adhèrent pas aux particules du sol.

Le système racinaire descend moins profondément que celui du kikuyu (40 à 50 cm), mais par contre, il est beaucoup plus dense. Cela se traduit par une limite non brutale entre les deux horizons, et aussi par une amélioration importante de la macroporosité des 30 premiers centimètres de l'horizon B.

A la base de l'enracinement du lotier apparaît une couche de sol plus rouge d'environ 30 cm, puis à 1,20 cm le niveau à «gratons».

Le géranium développe un grand nombre de racines latérales ramifiées dans l'horizon A. Ces racines sont plus fines qu'avec celles du kikuyu, et elles vont moins loin dans l'inter-rang. Il faut noter que ces racines fines se développent dans un milieu enrichi en azote du fait des nodosités du lotier.

Contrairement à tous les autres cas, le pivot se ramifie de manière intense dans l'horizon B, à la base de l'enracinement du lotier. Cette couche de sol est peu organique, mais semble posséder une forte porosité.

Enfin, le pivot se ramifie encore près du niveau à «gratons», comme dans tous les autres systèmes de culture.

Ce type de couverture engendre donc trois niveaux préférentiels d'absorption racinaire :

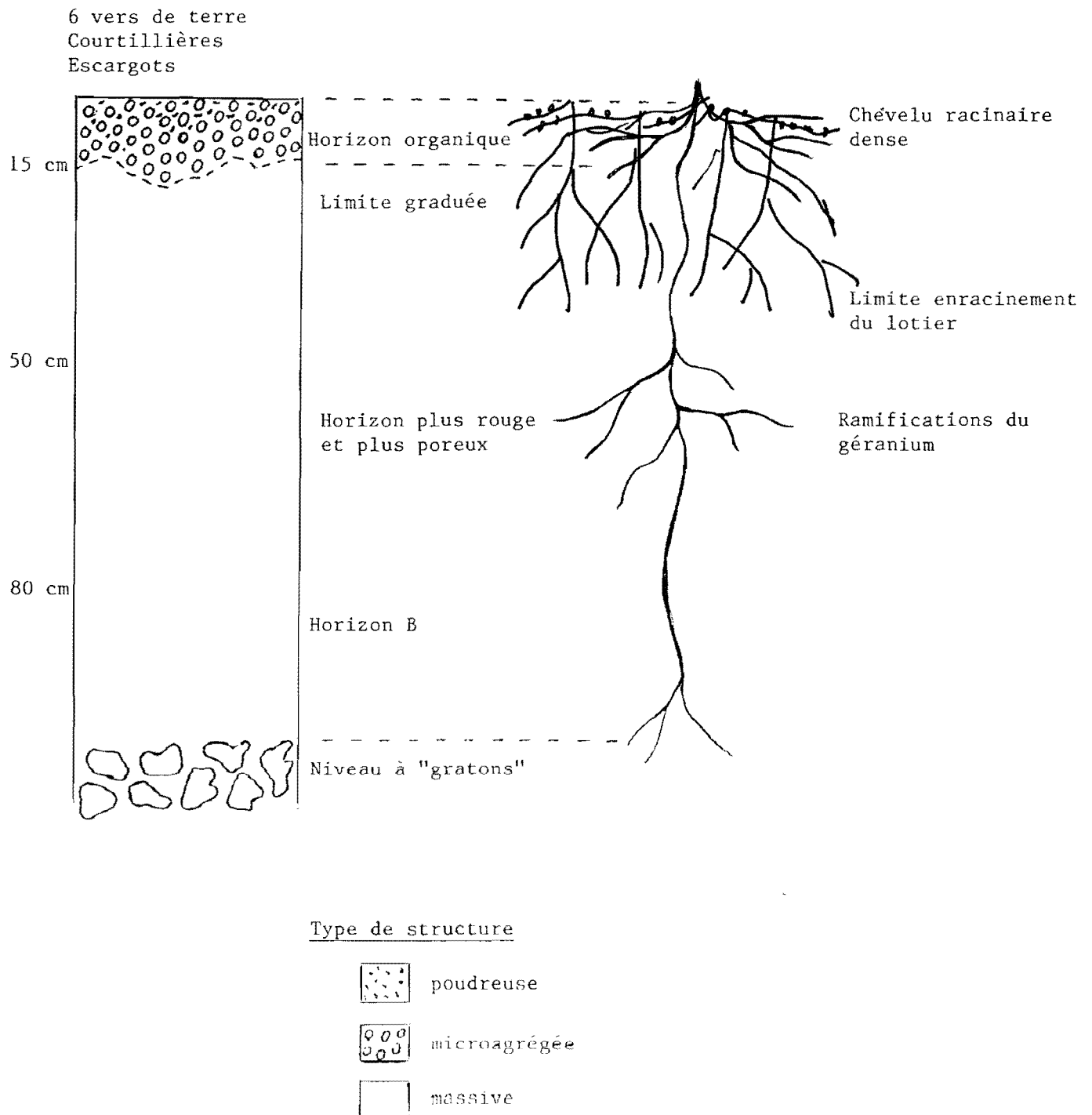
- l'horizon organique qui est enrichi en azote,
- l'horizon B qui semble ici plus aéré sous l'action des racines de lotier,
- l'altérite à «gratons».

#### **c) Conclusions**

Les différences de structure observées selon les systèmes de culture ont modifié considérablement l'enracinement de cette plante ligneuse pérenne.



Figure 40 : Géranium avec couverture de lotier



Le système diversifié avec rotation ou culture intercalaire permet la création d'un horizon A structuré qui favorise une bonne infiltration de l'eau et, par conséquent, devrait limiter le phénomène d'érosion. Cependant, l'horizon sous-jacent a toujours une structure continue qui ne permet pas au système racinaire du géranium de se développer harmonieusement.

Tout en améliorant la structure de l'horizon de surface, les plantes de couverture augmentent aussi la macroporosité de l'horizon B, ce qui rend l'enracinement du géranium plus homogène, en particulier avec le lotier.

Afin de confirmer ces observations structurales, ces phénomènes ont été quantifiés.

#### 5.4.2. Evolution de la macrofaune

La densité de la macrofaune, faible sous géranium en sol nu (114 individus/m<sup>2</sup> avec rotation, figure 41) augmente très sensiblement dans les systèmes de culture avec couverture herbacée installés depuis 4 ans avec kikuyu (1125 individus/m<sup>2</sup>) ou lotier (1430 individus/m<sup>2</sup>), se rapprochant de la jachère d'*Acacia* de 15 ans.

Comme avec jachère, les diplopodes (saprophages) dominent avec la couverture de kikuyu (51 % des individus), alors qu'avec lotier ce sont les larves de coléoptères.

La biomasse totale, comprise entre 1,8 et 4,0 g/m<sup>2</sup> en sol nu, s'accroît sous couverture : 25,3 g/m<sup>2</sup> avec lotier et 32,9 g/m<sup>2</sup> avec kikuyu, sans atteindre la valeur sous jachère de 265,8 g/m<sup>2</sup>.

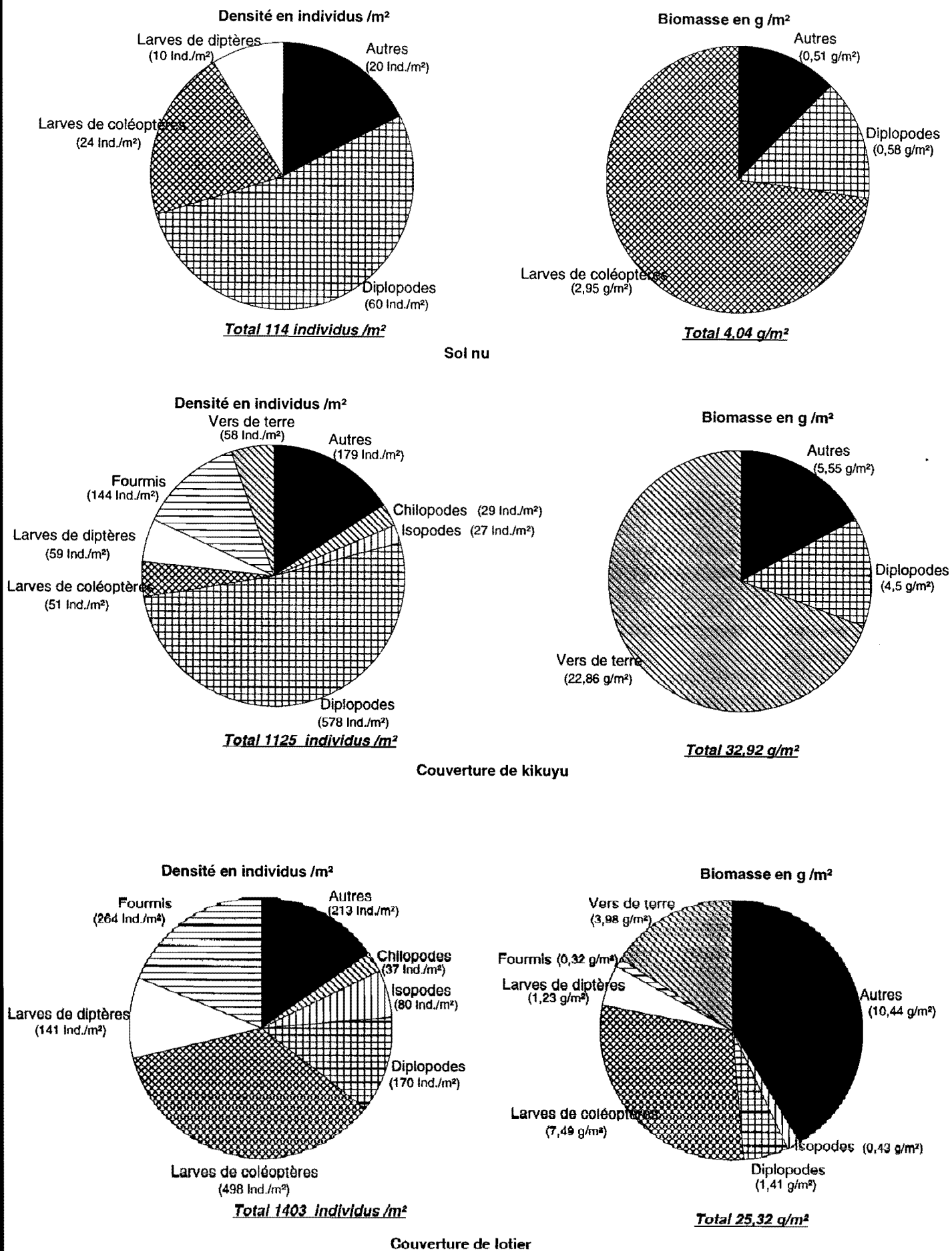
Les vers de terre bio-indicateurs de la fertilité du sol, représentent une très faible biomasse en sol nu en saison sèche (août), alors que les profils culturaux (paragraphe 5.3.1.) où ils étaient plus nombreux ont été observés en avril, en fin de saison des pluies. Cette biomasse atteint 22,9 g/m<sup>2</sup> avec la couverture de kikuyu en liaison avec la qualité de la litière.

#### 5.4.3. Influence sur les propriétés physiques et hydrodynamiques

Sous couverture herbacée, certaines caractéristiques physiques sont améliorées par rapport au sol nu, en particulier la stabilité des agrégats, comme sous lotier (tableau 19).

Le comportement hydrodynamique apparaît très différent selon le mode de gestion du sol. Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation, faibles en sol nu non perhydraté conduit en monoculture (tableau 19), deviennent très élevées avec couverture, dépassant 100 mm par heure sous kikuyu. Ces différences observées en surface, restent marquées pour l'horizon B (BURLE, 1993), même en-dessous de la limite d'enracinement de la couverture (comme avec le lotier).

Après jachère d'*Acacia*, sur andosol perhydraté, la conductivité hydraulique à saturation apparaît encore plus faible en sol nu (K sat. inférieur à 10 mm/h chez M. MERCHER). Deux ans après leur semis, les couvertures améliorent nettement cette conductivité (30 mm/ha avec kikuyu) (GUILLUY, PERRET, 1991 ; MICHELLON, PERRET, ROEDERER, 1991).



**Figure 41 :** Densité et biomasse moyenne de la macrofaune du sol sous géranium cultivé en sol nu ou avec des couvertures herbacées permanentes de graminée (kikuyu) ou légumineuse (lotier velu)..

Les études sous pluie simulée montrent que la couverture réduit, mais ne supprime pas le ruissellement de l'eau. Elle assure néanmoins une protection totale contre l'érosion (tableau 21). La présence d'une couverture herbacée continue sur le sol :

- protège les structures superficielles de l'action déstabilisante des gouttes de pluie (effet splash, ...),
- assure un ancrage racinaire de ces structures,
- permet le filtrage continu des eaux de ruissellement (effet peigne),
- et diminue l'énergie cinétique de la nappe ruisselante.

Type de sol et mode de gestion	Ruissellement en mm/h		Perte en terre en kg/h/ha	
Intensité de pluie en mm/h	45 à 72 mm/h		45 à 72 mm/h	
Sol nu dégradé (en monoculture)	13	31	208	635
Sol nu non dégradé (rotation ou monoculture)	2	22	10	207
Sol couvert de lotier ou kikuyu	0	15	0	7

**Tableau 21** : Données de simulation de pluie : ruissellement et pertes en terre selon l'intensité de pluie, le mode de gestion et le niveau de dégradation du sol (GAUDY, 1990 ; PERRET, 1992 ; GOUBAN, 1992 ; MICHELLON, PERRET, 1995)

Les pertes sont comprises entre 8 et 20 %, les pertes en terre sont exprimées en masse de sol séché à l'étuve.

#### 5.4.4. Evolution des propriétés chimiques du sol

##### a) Couverture morte

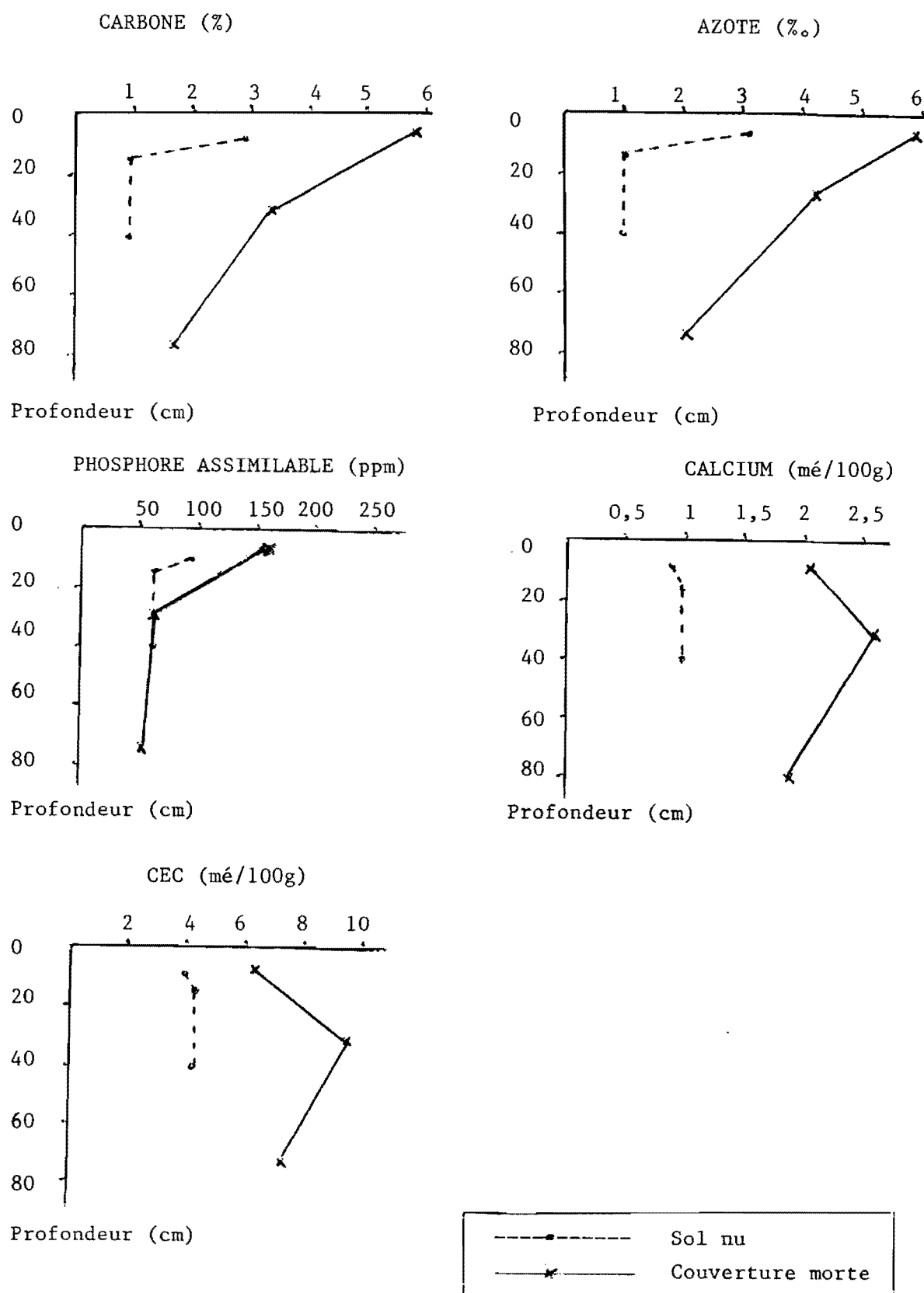
L'effet des couvertures mortes sur la production du géranium a été étudié :

- soit en conservant les résidus de récolte avant la plantation du géranium en culture pure,
- soit en introduisant une céréale à paille (avoine) en culture intercalaire.

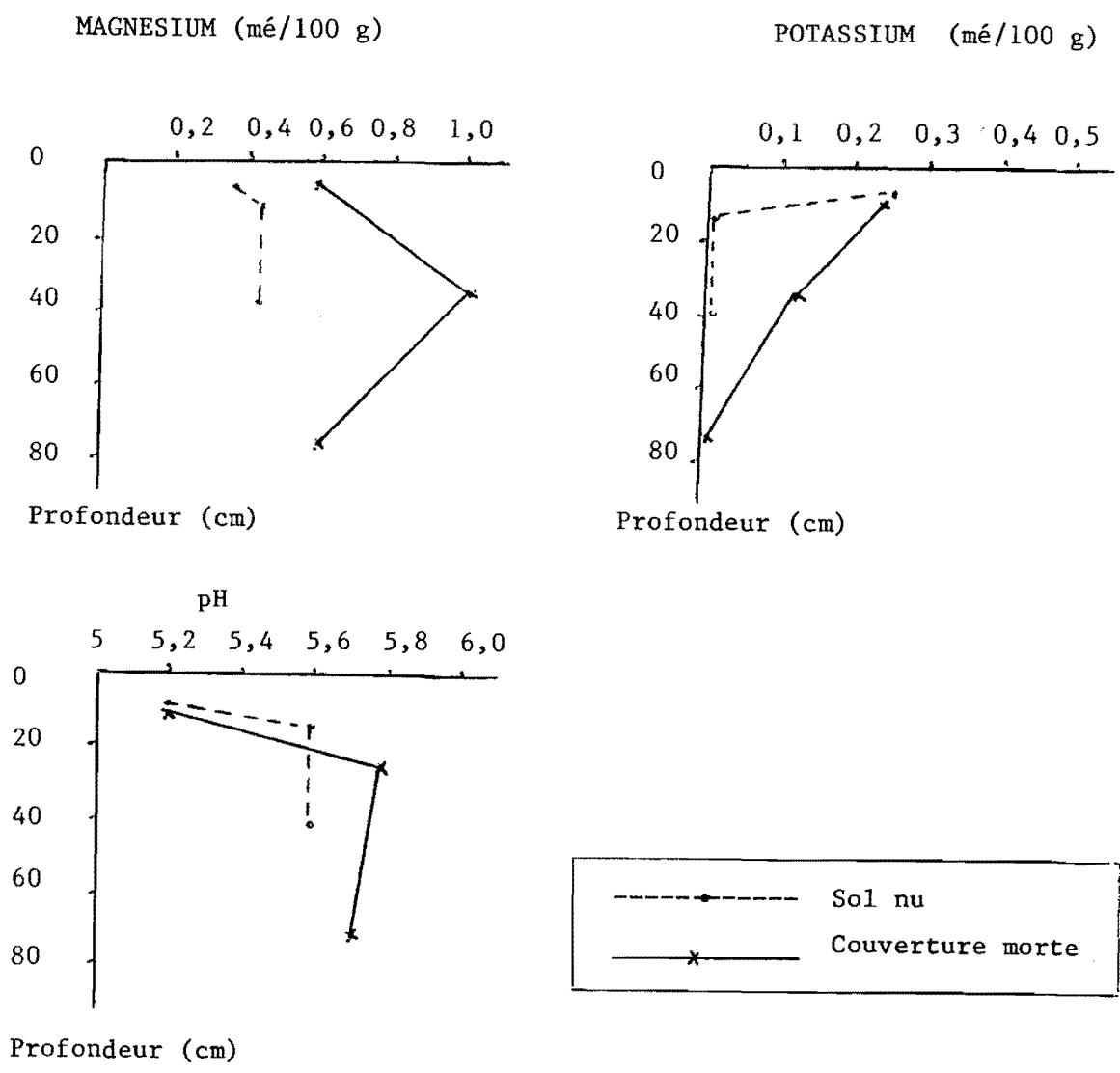
L'évolution chimique est quantifiée dans la situation où ces couvertures se sont avérées les plus favorables sur les rendements, soit à 800 m d'altitude, après canne à sucre (figures 42 et 43).

##### *\* Matière organique, azote et complexe absorbant*

Dans le système de culture intercalaire, nous retrouvons en 1991 des taux de carbone et d'azote, ainsi qu'une CEC, voisins de ceux observés lors de la mise en place en 1988. Par contre, en culture pure de géranium, ces indicateurs évalués en 1993 s'effondrent en sol nu. Mais ils se maintiennent stables sur la parcelle où ont été conservées les pailles de canne en couverture, lors de la mise en place du géranium.



**Figure 42 :** Influence d'une couverture morte obtenue en conservant la paille de canne à la plantation du géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol (POTHIN, 1993)



**Figure 42 (suite) : Influence d'une couverture morte obtenue en conservant la paille de canne à la plantation du géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol (POTHIN, 1993)**

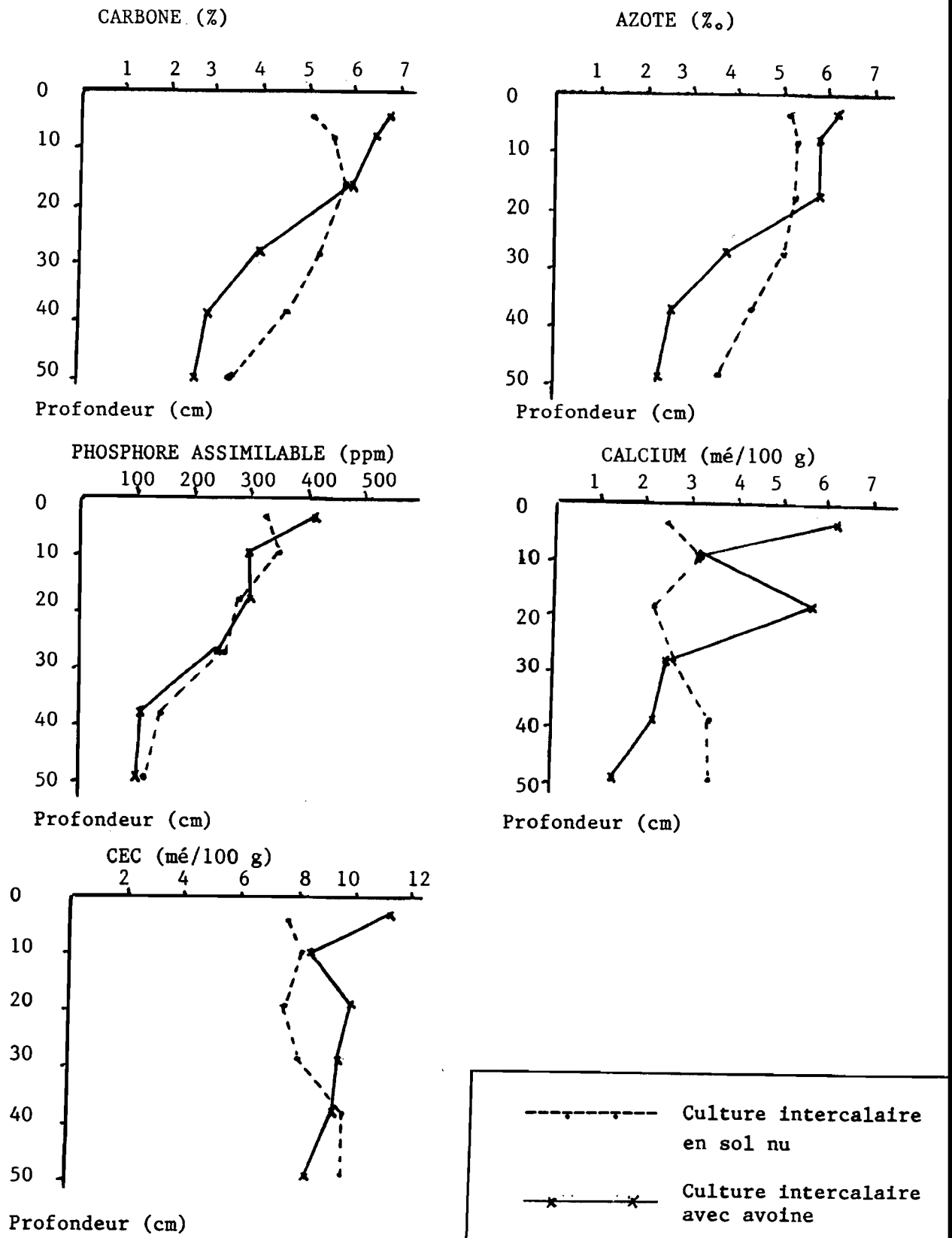


Figure 43 : Influence de couvertures d'avoine en culture intercalaire de géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol (POTHIN, 1991)

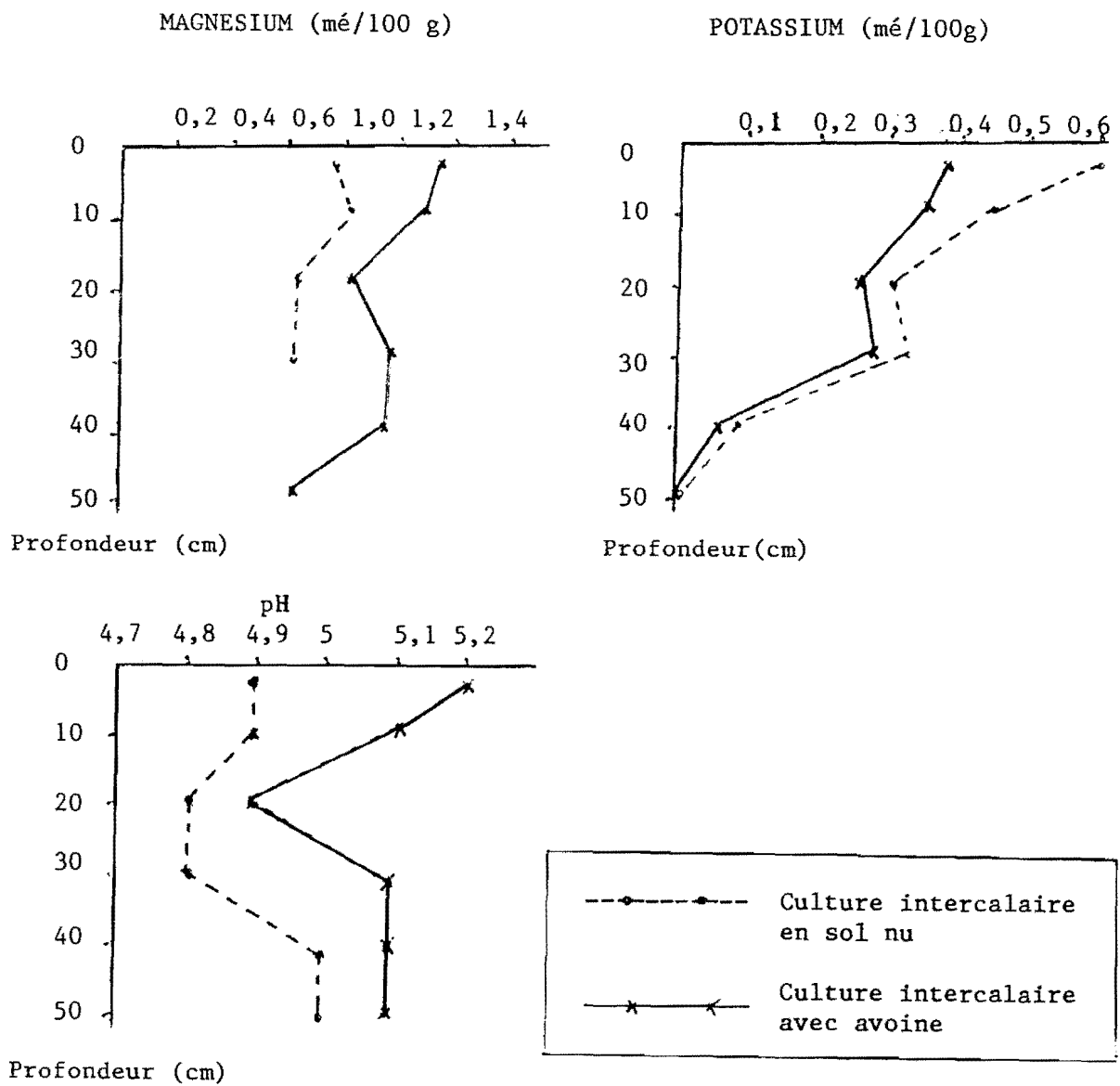


Figure 43 (suite) : Influence de couvertures d'avoine en culture intercalaire de géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol (POTHIN, 1991)



### *\* Bases échangeables*

En 1991, les bases échangeables : calcium, magnésium et potassium semblent encore peu affectées en système de culture intercalaire par la présence d'une avoine conduite tous les ans depuis 1988. En 1993, leur taux se réduit très nettement sous géranium cultivé pur en sol nu, alors qu'il reste voisin de l'état observé à l'origine avec une couverture morte de paille (décomposée depuis plusieurs années).

### *\* Phosphore assimilable*

La teneur en phosphore assimilable qui reste stable en culture intercalaire (après 3 ans) s'effondre en culture pure. Sa chute est cependant moins brutale après couverture morte de paille de canne.

### *\* pH*

Depuis la mise en place du géranium, l'acidité du sol s'accroît quel que soit le système, mais les deux types de couverture sont favorables au maintien d'un pH plus favorable aux cultures.

### **b) Couverture vive**

Les modifications engendrées par les systèmes de culture avec couverture végétale permanente dépendent de l'état initial du sol.

### *\* Matière organique*

Si nous considérons la **couverture de kikuyu**, elle ne semble pas présenter d'influence lorsqu'elle est introduite dans le système traditionnel de culture avec jachère arborée. Après 5 ans de culture de géranium suivant l'*Acacia*, les taux de carbone et d'azote restent élevés, comme après la défriche, et sont équivalents à ceux observés en sol nu (figure 44).

Par contre, installée après géranium dégradé, la couverture de kikuyu améliore très sensiblement les teneurs en carbone et azote par rapport au sol nu (figure 45).

Cet effet reste favorable après rotation suivant un géranium dégradé, si nous comparons le système avec kikuyu à la monoculture intensive (cet effet est peu visible sur la figure 46, mais par rapport à l'état initial, l'évolution dans le temps est favorable). L'augmentation des taux de carbone et d'azote est cependant supérieure avec une rotation en sol nu comportant des apports réguliers de matière organique.

A cette altitude élevée, les rapports C/N présentés dans le tableau 22 diminuent avec la couverture de kikuyu, traduisant ainsi l'amélioration de l'activité biologique, sauf lorsque le sol est le plus dégradé. Mais dans ce cas, la couverture de kikuyu n'est installée que depuis deux ans (TAURAN).

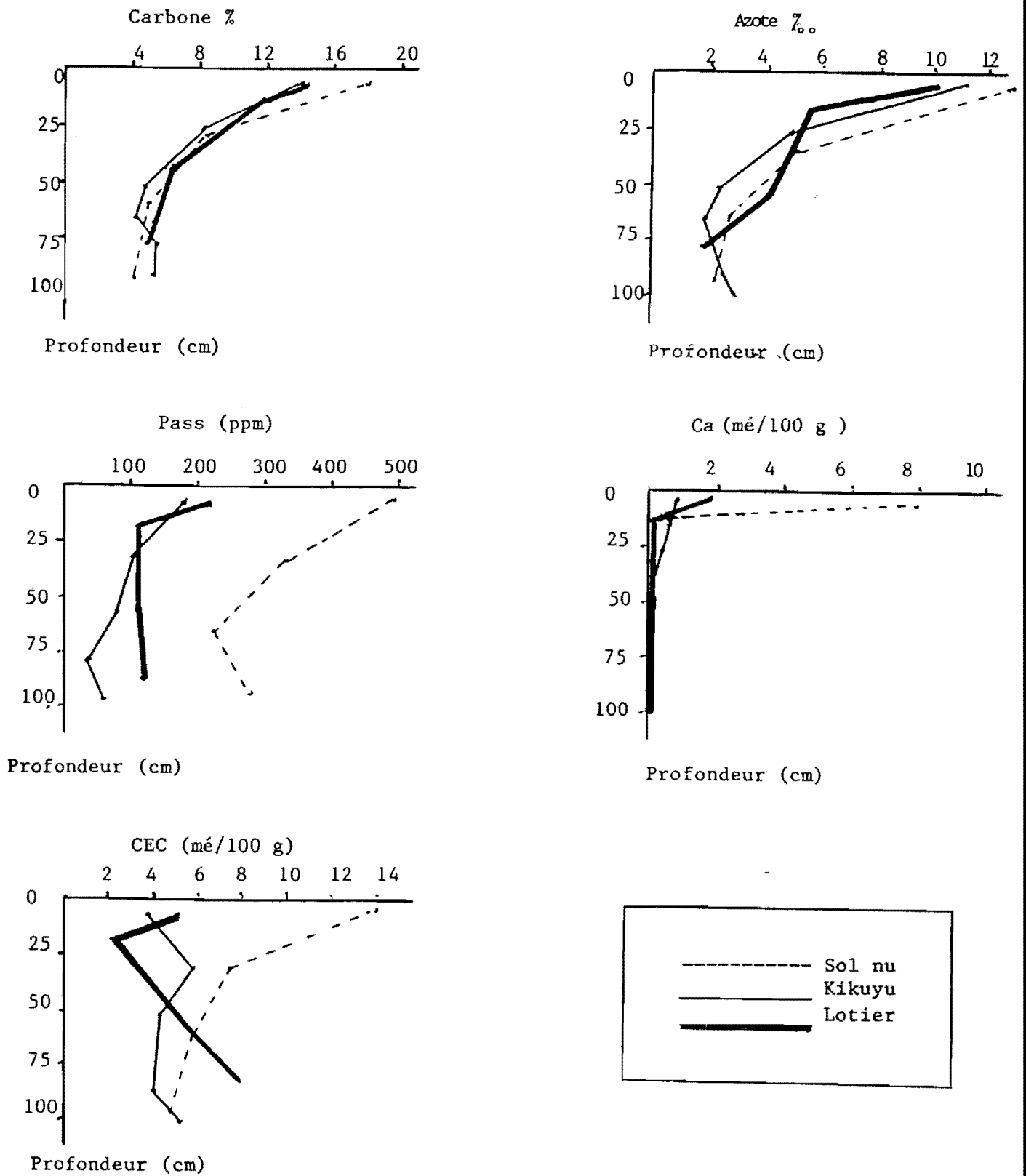


Figure 44 : Influence des couvertures de kikuyu ou lotier associées au géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol après jachère d'Acacia (MERCHEUR, 1993)

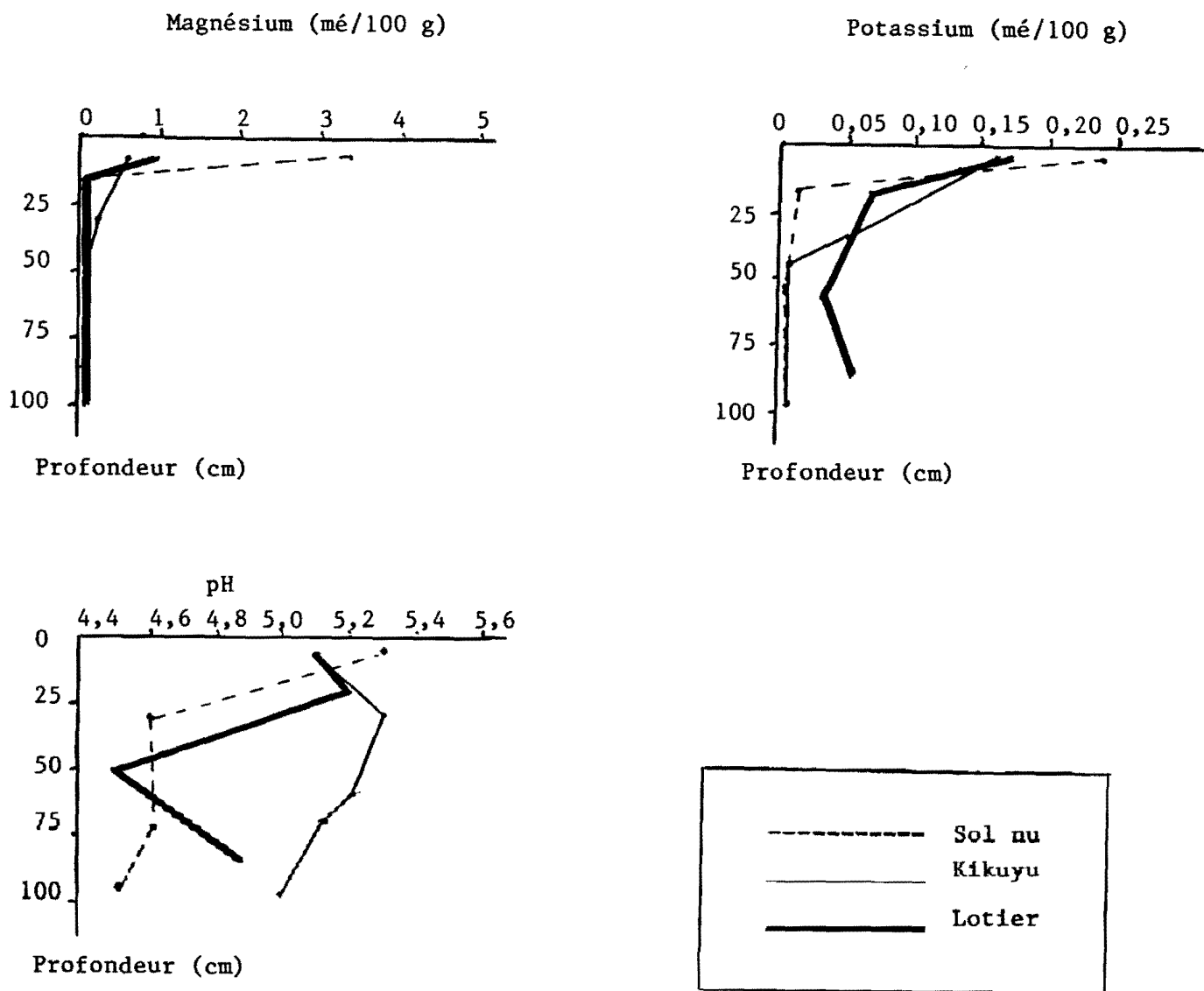


Figure 44 (suite) : Influence des couvertures de kikuyu ou de lotier associées au géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol après jachère d'*Acacia* (MERCER, 1993)

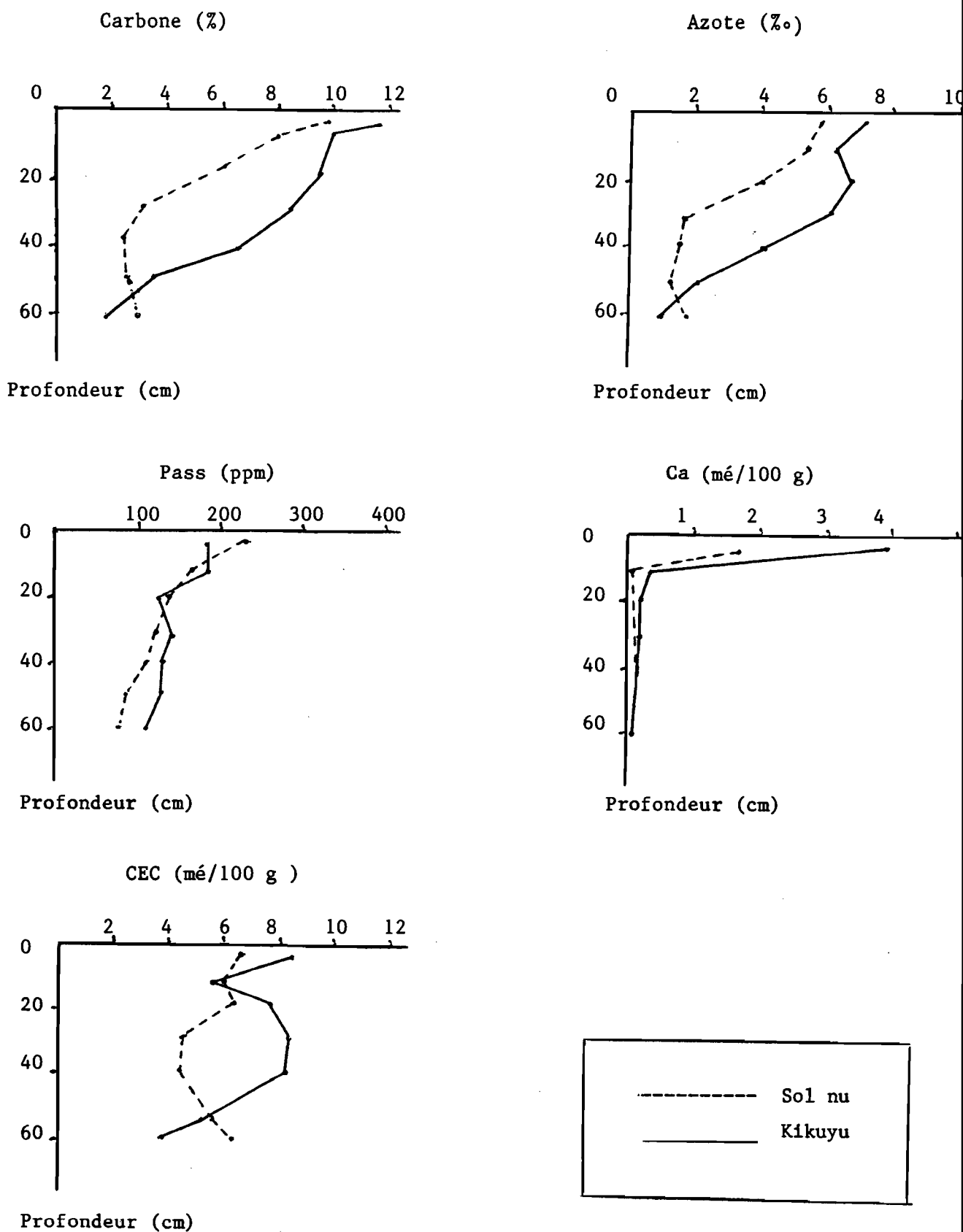


Figure 45 : Influence d'une couverture de kikuyu sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol après géranium dégradé (TAURAN, 1991)

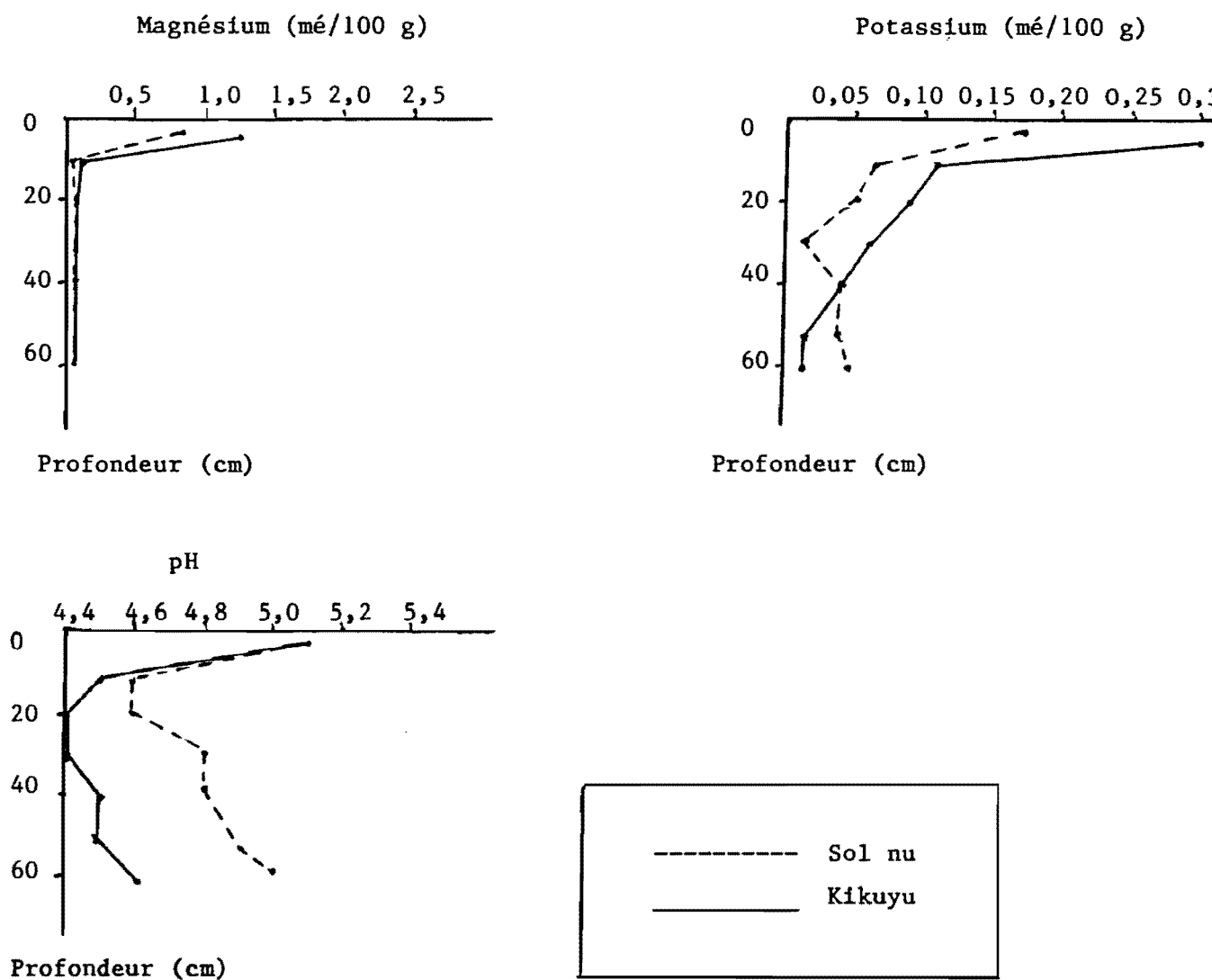


Figure 45 (suite): Influence d'une couverture de kikuyu sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol après géranium dégradé (TAURAN, 1991)

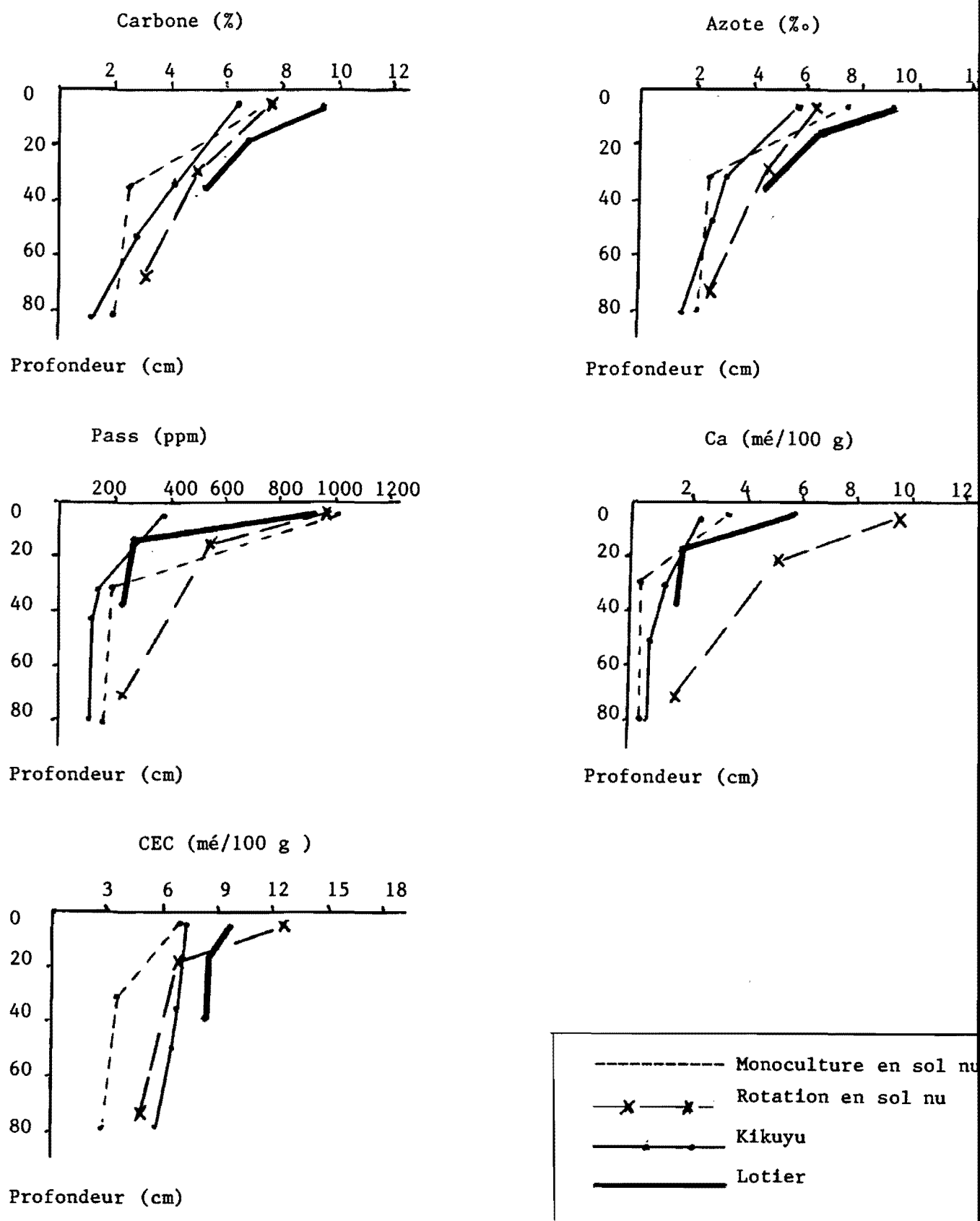


Figure 46 : Influence de modes de gestion du sol sur l'évolution de ses caractéristiques chimiques après un géranium dégradé (Cocâtre, 1993)

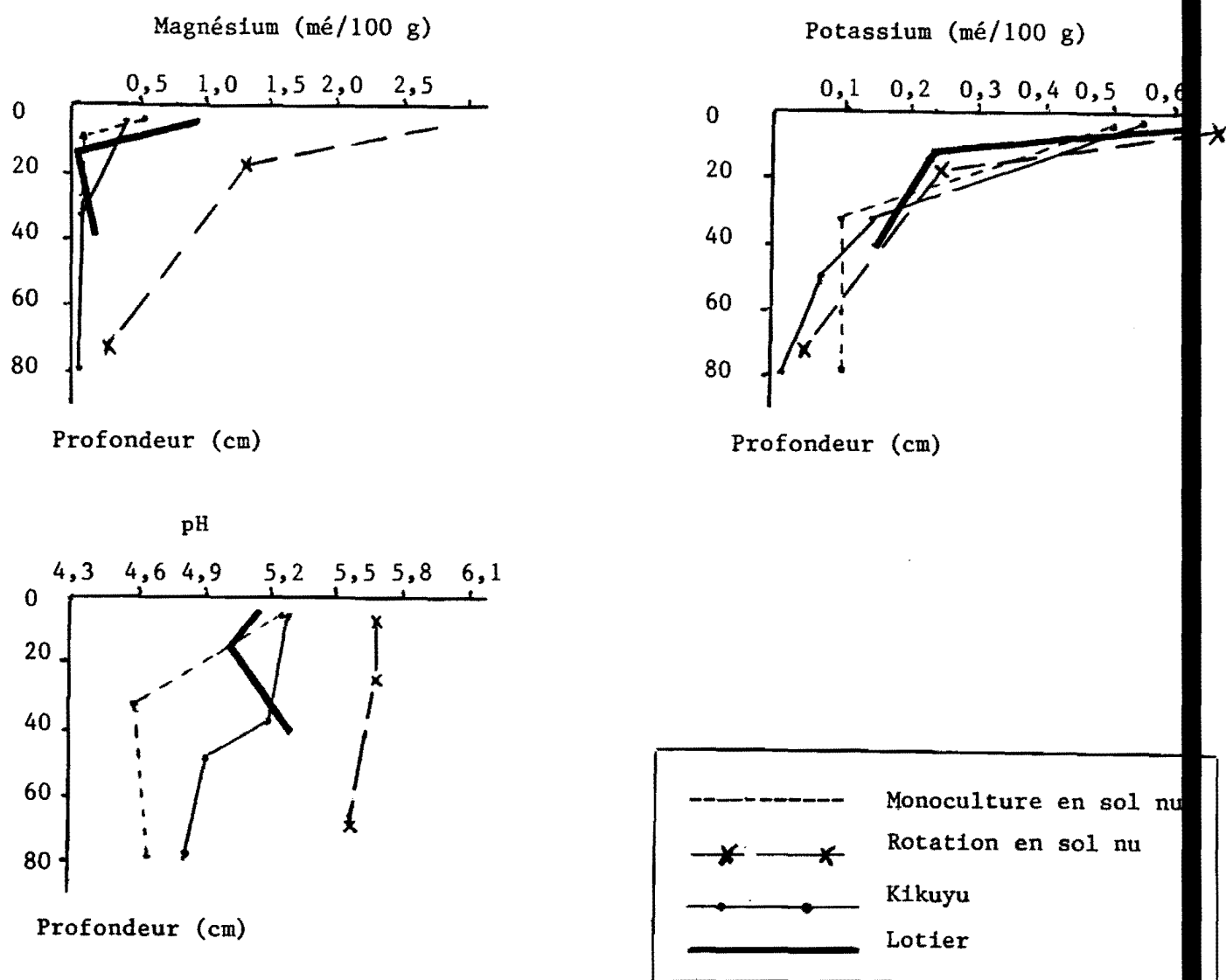


Figure 46 (suite) : Influence de modes de gestion du sol sur l'évolution de ses caractéristiques chimiques après un géranium dégradé (Cocâtre, 1993)

Altitude	Précédent cultural		Sol nu	Couverture de	
				kikuyu	lotier
1000 à 1100 m	Après jachère d' <i>Acacia</i> (MERCHEUR, 1993)		14	12	13
	Après géranium dégradé suivi de	3 ans de monoculture intensive (TAURAN, 1991)	15	15	-
		10 ans de monoculture intensive (Cocâtre, 1993)	13	-	-
		Rotation avec des cultures vivrières (Cocâtre, 1993)	14	11	10
800 m	Après canne à sucre (POTHIN, 1993)		9	10	-

**Tableau 22** : Influence du système de culture le rapport C/N

A une altitude inférieure, les taux de carbone et d'azote s'effondrent en sol nu après canne à sucre, alors qu'ils sont très sensiblement améliorés avec couverture de kikuyu (figure 47).

En 1988, les conditions d'installation du lotier étaient moins bien maîtrisées que celles du kikuyu. En présence d'une flore d'adventices très agressives, comme après géranium dégradé, la mise en place a été retardée jusqu'à la réalisation d'études complémentaires sur les herbicides (DEJANTE, MICHELLON, VINCENT, 1991).

Après jachère d'*Acacia* ou rotation suivant un géranium dégradé, nous retrouvons avec la couverture du lotier les mêmes résultats que ceux obtenus avec kikuyu : amélioration du taux de matière organique ou de son humification.

Après rotation, l'effet bénéfique de la légumineuse sur la teneur en azote apparaît plus marqué qu'avec les autres systèmes de culture. Lors du semis, les graines sont inoculées avec le rhizobium spécifique de *Lotus uliginosus* (souche CC 829).

La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique pourrait contribuer à enrichir le sol et à améliorer la nutrition de la culture. Des études ont été réalisées en collaboration avec le laboratoire de physiologie et de biochimie végétales de l'Université de Caen, pour évaluer le transfert d'azote fixé par la légumineuse de couverture à la culture (détermination de la variation d'abondance isotopique en  $^{15}\text{N}$  sur spectromètre de masse). La fixation symbiotique par le lotier semblerait très active et une part importante de cet azote serait transférée au géranium (MICHELLON, VINCENT, NATIVEL, 1994).

Cet apport d'azote au sol serait non négligeable : BROCK (1973) évalue le gain moyen annuel entre 140 et 200 unités par ha et par an selon le niveau de phosphore auquel il faut ajouter l'azote contenu dans la production fourragère du lotier (270 à 390 unités d'azote/ha/an).



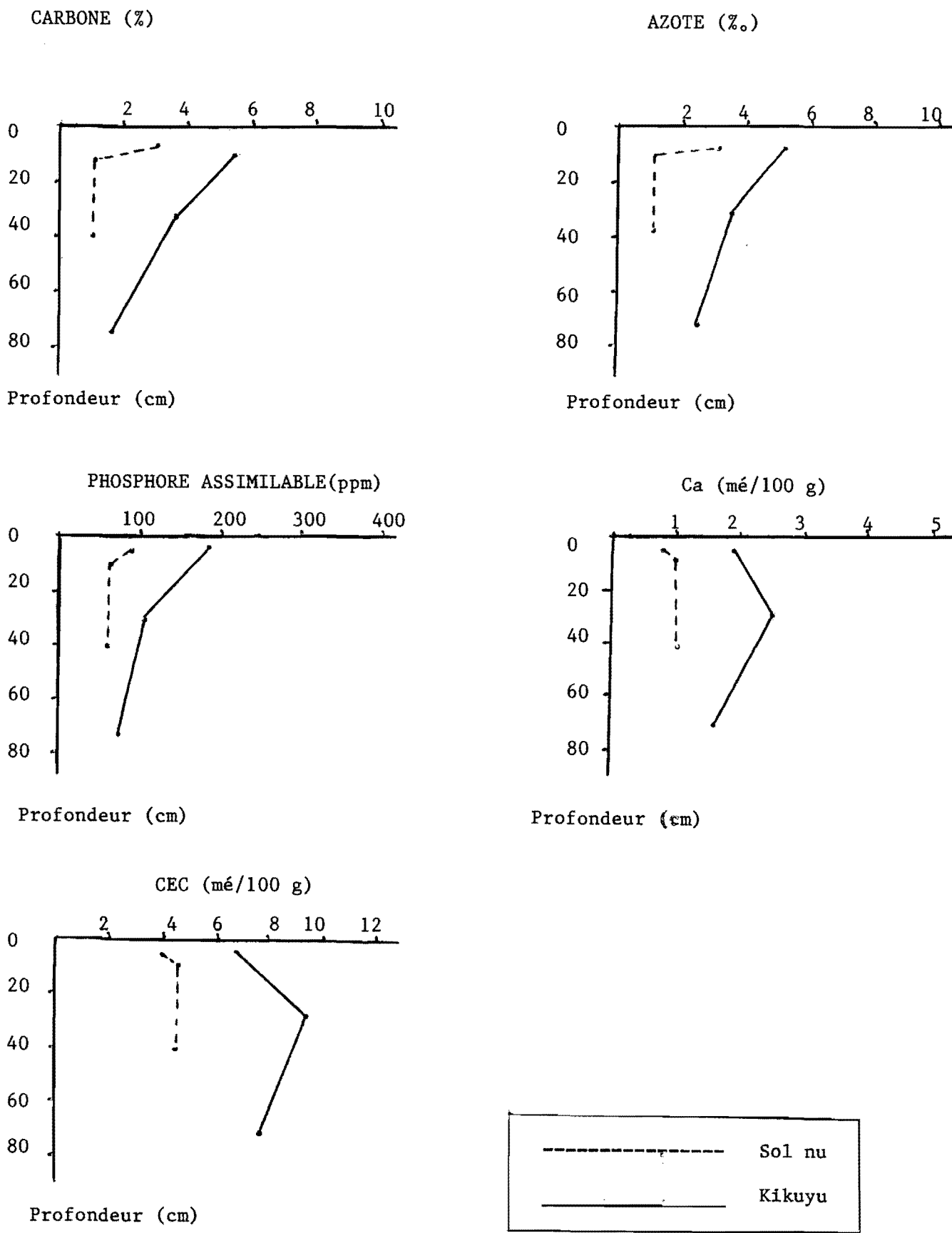


Figure 47 : Influence d'une couverture de kikuyu associée au géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol après canne à sucre (POTHIN, 1993)

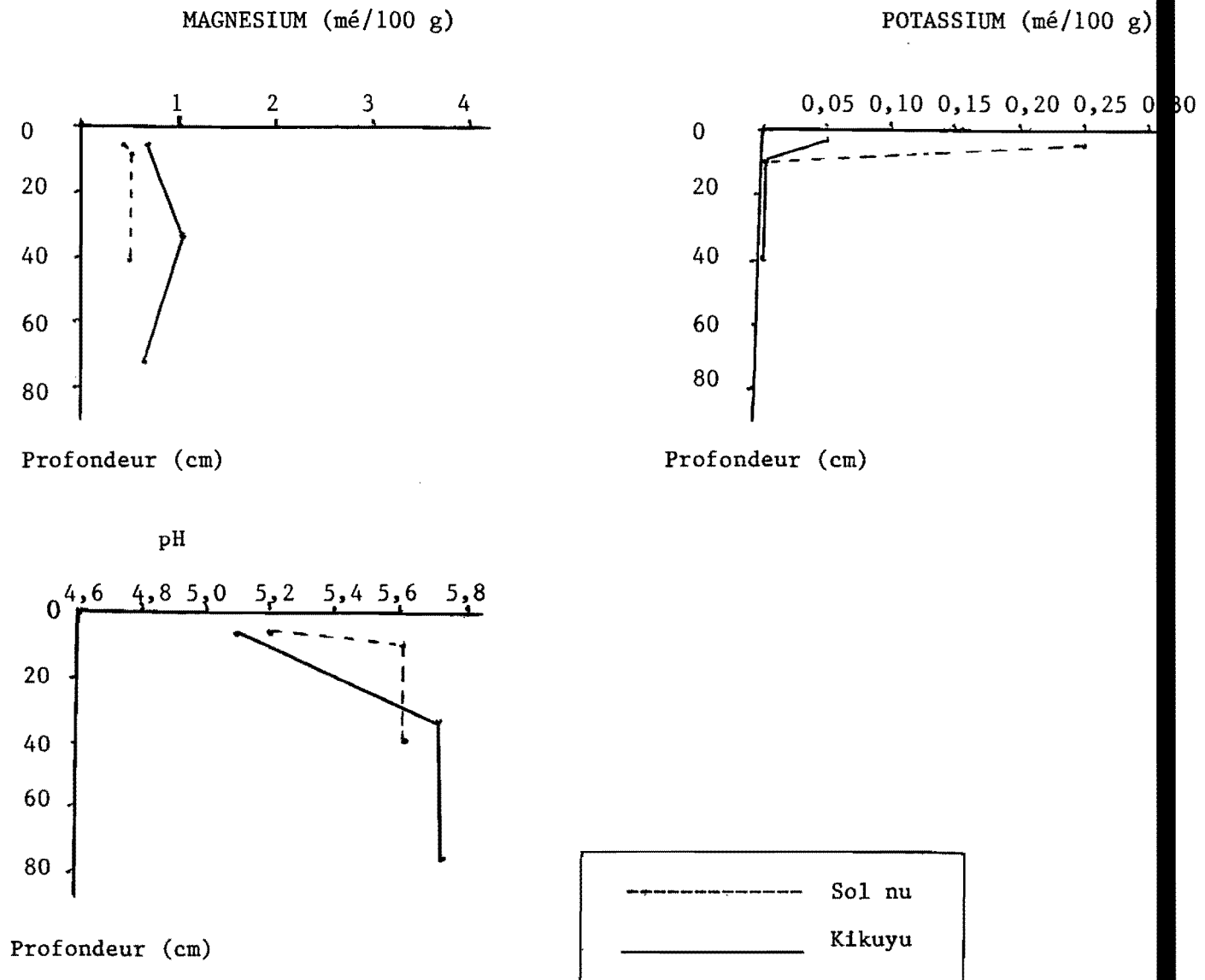


Figure 47 (suite) : Influence d'une couverture de kikuyu associée au géranium sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol après canne à sucre (POTHIN, 1993)

**\* Complexe absorbant**

Comme la teneur en matière organique, la capacité d'échange cationique est améliorée par les couvertures de kikuyu ou de lotier, sauf après jachère d'Acacia.

**\* Bases échangeables**

L'influence des couvertures sur les bases échangeables ne semble pas favorable après jachère d'Acacia. Par contre, après monoculture de géranium, la couverture de kikuyu améliore les teneur en calcium, magnésium et potassium dans cet andosol dégradé où l'érosion est forte (figure 45). Cette amélioration est plus nette lorsque le sol conduit en rotation reçoit des apports réguliers de compost de géranium, très riche en calcium (figure 40).

A une altitude inférieure, après canne à sucre, les teneurs en bases échangeables se réduisent très sensiblement sous géranium cultivé en sol nu, alors qu'avec couverture kikuyu elles se maintiennent à des taux voisins de ceux observés à l'origine.

Pour évaluer l'importance des phénomènes de lessivage, BURLE (1993) compare les taux de saturation du complexe absorbant dans les horizons de surface (de 0 à 40 cm).

Mode de gestion du sol	Monoculture	Rotation	Kikuyu	Lotier
Taux de saturation de la CEC	35 %	84 %	63 %	72 %

**Tableau 23** : Taux de saturation de la capacité d'échange cationique (à Cocâtre)

Les analyses effectuées en fin de saison des pluies (avril 1993) montrent que le système dégradé en monoculture engendre un fort lessivage des bases échangeables (tableau 23).

**\* Phosphore assimilable**

Pour le phosphore, l'évolution est différente de celle des autres éléments chimiques. La teneur en phosphore assimilable augmente dans les systèmes de culture en sol nu, en monoculture ou en rotation, alors qu'elle diminue avec les plantes de couverture (ou semble rester équivalente après canne à sucre).

Les apports de phosphore sont supérieurs aux exportations par la culture de géranium. Mais avec les couvertures installées depuis peu d'années, la diminution observée dans le sol pourrait être liée à l'absorption et au stockage du phosphore dans les tissus végétaux du lotier ou du kikuyu.

**\* pH**

Si nous considérons les situations évaluées sur la plus longue période (jusqu'en 1993), le pH apparaît amélioré dans les systèmes avec couverture végétale par rapport au sol nu. L'évolution semble cependant plus favorable avec rotation, avec des apports réguliers de compost de géranium très basiques (pH = 8).

## VI- CONCLUSION

Vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le géranium rosat a permis la mise en valeur des terrains des Hauts sous le vent, alors couverts par la forêt primaire. Pendant plus d'un demi siècle un système agroforestier, quasi autarcique, de métayage sur des microstructures disséminées au sein de grandes propriétés foncières, a permis une exploitation reproductible des ressources naturelles. Après 5 à 7 ans de production de géranium, la mise en culture progressive de la jachère d'*Acacia mearnsii*\* assure le maintien de la fertilité et évite ainsi une perte de productivité du travail (baisse des rendements du géranium et du vivrier, augmentation des temps de sarclage).

Mais au cours des deux dernières décennies, l'évolution rapide de l'économie de l'île a entraîné une sédentarisation des systèmes à base de géranium. La monoculture de rente, en particulier des plantes arbustives à parfum (GRAS, MONTARONE, 1993 a et b), engendre souvent une extrême dégradation du milieu et des rendements. En zone tropicale d'altitude, sur des terrains tourmentés et pentus, soumis à des précipitations intenses (cyclones, ...), ce phénomène est rapide avec des conséquences en aval (dessèchement des cours d'eau en saison sèche, et probablement, abandon de périmètres irrigués ...).

Grâce à une diversification des cultures et une meilleure intégration de l'élevage, il est possible de reconstruire des systèmes plus performants. En sol nu, l'apport régulier de matière organique permet la restauration ou le maintien de conditions favorables aux cultures dans l'horizon de surface. Cet effet est limité dans l'espace, mais aussi dans le temps car les apports de fumier ou compost doivent être renouvelés régulièrement. Dans ces conditions, le phénomène d'érosion apparaît réduit par rapport à la monoculture, mais doit être limité par des lignes antiérosives. Le recours aux herbicides, qui diminuent les temps de sarclage, améliore la productivité de la main-d'oeuvre, mais peut conduire à la sélection d'adventices résistantes (cypéracées, ...) concourant aussi à la dégradation de la parcelle.

Les couvertures végétales assurent une protection totale contre l'érosion et réduisent les besoins en fumier et la prolifération des mauvaises herbes, supprimant ainsi les sarclages. Selon leurs contraintes et besoins, les agriculteurs ont recours à des techniques variées qui schématiquement peuvent être divisées en deux alternatives :

- les couvertures mortes obtenues en conservant en place résidus de défriche ou de récolte et adventices tuées à l'herbicide. Même s'ils doivent être renouvelés régulièrement, cette technique constitue l'option la plus simple, déjà appropriée par une part importante d'agriculteurs,
- les couvertures herbacées permanentes, solution définitive à condition qu'elles ne soient pas compétitives pour la culture, sont choisies parmi les espèces pérennes agressives : adventices déjà installées comme *Phalaris arundinacea* («herbe ruban»), ... ou plantes sélectionnées pour leurs qualités fourragères, en cours d'adoption par des éleveurs. Leur maîtrise par des moyens adaptés variés (fauche, traitement herbicide ou par une substance de croissance, apport d'engrais sur légumineuse, ...) est le plus souvent nécessaire en saison chaude et humide pour éviter une concurrence avec la culture.

\* Espèce australienne introduite Dans ce genre, beaucoup de plantes ont été sélectionnées et cultivées dans les régions chaudes (Asie, ...) comme espèces améliorantes («engrais vert»), arbres d'ombrage (thé, café, quinquina, ...), combustible, bois de construction ou pour la production de tanins, ...

Ces systèmes avec semis direct sur tapis végétal mort ou vif, associés à un embocagement des parcelles, présentent une activité biologique intense qui, contrairement au sol nu, s'étend progressivement à l'ensemble du profil. Les conséquences sont très favorables sur le milieu : restauration de la fertilité par la macrofaune du sol et l'activité racinaire des plantes de couverture, amélioration de la porosité et stabilité, stimulation de l'activité microbienne induisant un recyclage rapide des éléments minéraux et de la matière organique, protection totale contre l'érosion et réduction du ruissellement, meilleure conservation de l'eau. Les apports de fumier, indispensables en sol nu, peuvent être réduits, ainsi que les fumures minérales (fixation symbiotique d'azote, ...)

L'efficacité de ces outils biologiques dans la conception de systèmes agricoles durables a été démontrée dans de nombreuses régions du monde : tropicales (MONEGAT, 1991 ; SEGUY, 1993) ou plus tempérées (HARGROVE, 1991). A la Réunion, ces systèmes agrobiologiques en cours d'adoption par les agriculteurs demanderont un effort de compréhension et d'observation aux chercheurs, et partenaires du développement pour accompagner cette profonde mutation. Les modifications ne concernent pas en effet que la fertilité du sol. Elles touchent aussi à la l'architecture du système racinaire des plantes cultivées qui régit leur alimentation hydrique et minérale, à la faune et microflore qui pour les parasites ou maladies conditionne leur état sanitaire («maladie de la terre», *Pseudomonas solanacearum*, biotype 1, ver blanc, *Hoplochelus marginalis*), aux relations entre plantes (effets allélopathiques), ...

L'ensemble des effets positifs induits par ces techniques, notamment la protection contre les accidents climatiques et l'érosion, devrait amener à moyen terme à une amélioration très nette des conditions de production des exploitations agricoles et à leur stabilisation. Les conséquences dépassent même le cadre agricole, puisqu'il s'agit de préserver le milieu naturel en conservant le sol.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG C.S., 1974 : «Grasslands Maku» tetraploid lotus (*Lotus pedunculatus* cav.), N.Z. Journal of Experimental Agriculture 2, p. 333-338.
- 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. E.N.S.M., 83 p.
- BAROIS I. et al., 1987 : Interactions entre les vers de terre (*Oligochaeta*) tropicaux géophages et la microflore pour l'exploitation de la matière organique du sol. Publication du Laboratoire de Zoologie de l'ENS., vol. 7, p. 152.
- BENOIT G., BERNARD J.F., HOAREAU A., MANGUIN R., 1988 : Les difficultés de la relance de la culture du géranium dans les Hauts de la Réunion. Commissariat à l'Aménagement des Hauts, DAF, mars 1988, 33 p.
- BLANCHART E., 1992 : Restoration by earthworms (*Megascolecidae*) of the macroaggregate structure of a destructured savanna soil under field conditions. Soil Biol. Biochem., 24 (12), 1587-1594.
- BOUGERE J., 1988 : Aperçu sur l'érodibilité des andosols cultivés à la Réunion. In : CIRAD, 1988 : Les andosols de l'île de la Réunion. Séminaire de Saint-Denis, 24 mai-1er juin, p. 157-162. CIRAD - CNRS - INRA - ORSTOM - Université.
- BOYER J., LAVELLE P., MICHELLON R., 1994 : Caractérisation de la faune du sol dans différentes parcelles des Hauts de l'Ouest de la Réunion. ORSTOM - CIRAD-Réunion, 18 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. 40, n° 4, p. 342-355.
- BRIDIER B., 1986 : Résultats d'enquête sur l'évolution des exploitations à géranium des Hauts du Tampon. IRAT-Réunion, 84 p.
- 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.
- BURLE D., 1993 : Effets des couvertures végétales permanentes associées au géranium sur la fertilité des andosols de la Réunion. Mémoire CIRAD-CA - ENITA, 49 p + annexes.
- C.A.H., 1992 : Le géranium rosat à la Réunion. C.A.H. éd., Saint-Denis, Réunion, 105 p.
- CALLOT G., 1984 : Structure pédologique et fonctionnement du sol en relation avec la production végétale. Analyse au niveau parcellaire. Science du Sol, Bulletin de l'A.F.E.S. n° 2, 14 p.
- CALLOT G., CHAMAYOU H., MAERTENS C., SALSAC L., 1982 : Les interactions sol-racine. Incidence sur la nutrition minérale. Col. Tec. et Doc. INRA, 305 p.
- CANNEL M.R.G., 1985 : Dry matter partitioning in tree crops. Institut of Terrestrial Ecology, Brish estate, peniceik, midlothian Scotland, vol. 11, p. 160-193.

- CHABALIER P.F., 1989 : Résultats lysimétriques de Trois-Bassins, campagne 88-89. CIRAD IRAT-Réunion, fiche n° 4, 7 p.
- 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 Taiwan. II Interaction between kikuyu grass and three hardwood plants. *Plant and Soil* 116, p. 207-215.
- CIRAD, 1985 : Notes sur les principales cultures des Hauts sous le vent. CIRAD-Réunion, 122 p.
- CIRAD, 1985 : Bilan de la recherche-système dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion, 368 p.
- CIRAD, 1988 : Les andosols de l'île de la Réunion. Préparation d'un programme de recherche pluridisciplinaire. Séminaire de Saint-Denis, 24 mai-1er juin, CIRAD - CNRS - INRA - ORSTOM - Université, 231 p.
- 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.
- DAVIES W.E., 1974 : The potential of *Lotus* spp. for hill land and wales. *Journal of British Grassland Society* 24 (1), p. 264-270.
- DEJANTE P., MICHELLON R., VINCENT G., 1991 : Essai d'herbicides sur légumineuses de couverture. CIRAD-Réunion, fiche n° 1, 19 p + annexes.
- DEMARNE F., MICHELLON R., 1994 : Influence du mode de gestion du sol sur la qualité de l'huile essentielle de géranium rosat. CIRAD-Réunion, fiche d'essai n° 8.
- DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'AGRICULTURE, 1981 : Plan de relance de la production de géranium à la Réunion.
- DOREE J.F., 1989 : Intérêt du travail minimum avec couverture dans les systèmes de culture des Hauts de l'Ouest de la Réunion. Mémoire ENSAM - CNEARC - IRAT-Réunion, 96 p.
- FONTAR X, THOMAS L., 1992 : Etude des effets allélopathiques d'une couverture de kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) sur géranium, cultures vivrières et certaines plantes adventices. ESA - CIRAD-Réunion, 103 p + annexes.
- FRITZ, 1967, 1968, 1969 : Collection de comportement d'espèces et de variétés fourragères. Rapports annuels IRAT-Réunion p. 83 à 92, 163 à 170 et 89 à 95.
- FRITZ, 1973 : Effet de la fertilisation azotée sur la production du géranium rosat. *L'Agronomie Tropicale* XXXI, 4, p. 369-374.
- GAILLETON J.M., 1962 : Rapport sur le traitement de l'anthracnose ou rouille du géranium rosat à la Réunion. Direction des Services Agricoles de la Réunion, 39 p.
- GARIN P., 1983 : Etude des itinéraires techniques rencontrés dans les systèmes d'exploitation à base de géranium dans les Hauts de l'Ouest de l'île de la Réunion. Possibilité d'approfondir des innovations techniques par les agriculteurs. Saint-Denis, DAA-IRAT, 114 p.

- 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.
- GAUDY P., 1990 : Comportement hydrodynamique et évolution de l'état structural des horizons de surface sous pluie simulée. Cas d'un andosol cultivé de l'île de la Réunion. CNEARC - CIRAD-Réunion, 90 p.
- GIGNOUX I., 1988 : Analyse évolutive et prospective de la production de géranium à la Réunion. CNEARC - IRAT-Réunion, 85 p.
- GOUBAND F., 1992 : Fonctionnements hydrodynamiques superficiels d'andosols cultivés à la Réunion : Incidences d'itinéraires techniques antiérosifs. DEA ENSAM - CIRAD-SAR Réunion, 61 p.
- GRAS R., MONTARONE M., 1993a : Le dépérissement des plantes arbustives à parfum. I. La mise en culture. P.H.M. *Revue horticole* 335, p. 17-20.
- GRAS R., MONTARONE M., 1993b : Le dépérissement des plantes arbustives à parfum. II. L'évolution des techniques. P.H.M. *Revue horticole* 336, p. 19-24.
- GUILLUY D., PERRET S., 1991 : Effets de couvertures permanentes sur la porosité d'andosols cultivés. Note technique 02/91. CEEMAT - LAGEPHY Réunion, 14 p + annexes.
- 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 rotundus* L. et *Bidens pilosa* L. CIRAD - Université de la Réunion, 26 p.
- IRFA, 1988 : Le pêcher, p. 29-40. In : Rapport annuel IRFA-Réunion, 210 p.
- JAILLARD B., LUC J.P., 1979 : Comparaison de la dynamique de l'eau entre trois parcelles à enracinement différent. Bull. G.F.H.N., vol. 5, p. 73-98.
- LAMBERT J.P., BOYD A.F., BROCK J.L., 1974 : An evaluation of five varieties of *Lotus pedunculatus* Cav. Compared with «Grasslands Huia» white clover under grazing at Kaikohe. *N.Z. Journal of Experimental Agriculture* 2, p. 359-363.
- LAVELLE P., 1988 : Earthworms activities and the soil system. *Biol. Fertil. Soils*, 6, p. 237-251.
- LAVELLE P., 1993 : Communication personnelle.
- LAVELLE P., BLANCHART E., MARTIN A., SPAIN A.V., MARTIN S., 1992 : Impact of the soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In : *Myths and science of soils of the tropics*. Soil Science Society of America, Special Publication n° 29, p. 157-185.
- 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., PERRET S., 1995 : Conception de systèmes agricoles durables avec couverture herbacée permanente pour les Hauts de la Réunion. CIRAD-Réunion, 28 p.
- MICHELLON R., PERRET S., 1994 : Conception de systèmes agricoles durables avec couverture herbacée permanente pour les Hauts de la Réunion. Symposium international : recherches-système en agriculture et développement rural. Montpellier, France, 21-25 novembre. CIRAD Ed., p. 507-508.
- MICHELLON R., PERRET S., ROEDERER Y., 1991 : Conservation et gestion des sols et des cultures. Rapport annuel, Le CIRAD à la Réunion, p. 81-84.
- MICHELLON R., SEGUY L., 1992 : Protocoles d'expérimentation sur les modes de gestion du sol avec couverture végétale. CIRAD-Réunion.
- 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. A.N.P.P. Quatrième Colloque «Les substances de croissance, partenaires économiques des productions végétales». Paris, 6 février 1996, 8 p.
- MICHELLON R., VINCENT G., NATIVEL R., 1994 : Gestion d'une couverture de lotier (*Lotus uliginosus*) associée au géranium rosat. CIRAD-Réunion, fiche n° 9.
- MISSION D'AMENAGEMENT DES HAUTS, 1983 : L'aménagement des Hauts. Saint-Denis D.D.A., 32 p.
- MONEGAT C., 1991 : Plantas de cobertura do solo : características e manejo em pequenas propriedades. Chapecó, Brésil, Monegat Ed., 337 p.
- PERRET S., 1992 : Processus de dégradation et d'érosion des sols dans les Hauts et restauration par des systèmes conservatoires à base de couvertures. Rapport annuel CIRAD-Réunion, p. 64-65.
- PERRET S., 1993 : Propriétés physiques, hydriques et mécaniques 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 improvement based on cropping systems with cover plants and hedgerows in Reunion Island. Proc. 3rd ESA Congress, 18-22 septembre, Abano-Padova, Italie, p. 736-737.
- PERRET S., MICHELLON R., 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 Territories). J. WILEY Ed. Londres U.K. A paraître. In : Sustainable Management of Tropical Catchment.
- PY F., CLARIOND A., 1989 : Etude des relations entre stock organique, stabilité structurale et activité microbienne. D.A.A. ENSAT - IRAT-Réunion, 103 p.
- 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. 79-90.

- 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, 428 p.
- REDELL P., SPAIN A.V., 1991 : Transmission of infective *Frankia* (Actinomycetales) propagules in casts of the endogeic earthworms *Pontoscolex corethrurus* (Oligochaeta : Glossoscolecidae). Soil Biol. Biochem., 23 (8), p. 775-778.
- 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 Cocaïs au Maranhao, Nord-Est du Brésil - Etat du Maranhao - L'Agronomie Tropicale, vol. 37 (3), p. 233-261.
- SEGUY L., 1988 : Notes techniques d'appui au programme de recherches des Hauts de l'Ouest à la Réunion. IRAT-Réunion, 12 p.
- SEGUY L., ARRIVETS J., 1991 : Notes techniques d'appui au programme systèmes de cultures à base de géranium des Hauts de l'Ouest de la Réunion. Résumé IRAT-Réunion, 4 p.
- SEGUY L., BOUZINAC S., MUNEFUME MATSUBARA 1992 : Nouveaux concepts de gestion écologique du sol pour la fixation d'une agriculture stable et durable dans les régions tropicales humides et équatoriales du Brésil. RPA/CIRAD IRAT, 34 p.
- SEGUY L. et al., 1993 : Os sistemas de culturas para a regio do médio norte do Mato Grosso. Recomendacoes tecnicas. CIRAD, C.L., RHODIA, Brésil, 34 p.
- SUAD, 1989 : Bilan des actions conduites dans le cadre du plan géranium diversification de 1985 à 1988. Chambre d'Agriculture de la Réunion 19 p.
- SUAD, 1992 : Géranium. Enquête auprès d'un échantillon de producteurs. Chambre d'Agriculture de la Réunion, 58 p.
- TREMEL L., 1992 : Lutte contre les mauvaises herbes. In : C.A.H., Le géranium rosat à la Réunion. CAH Ed., Saint-Denis Réunion, 105 p.
- TRENBATH B. R., 1976 : Plant interaction in mixed crop communities. In : ASA et al. : Multiple cropping, p. 129-169.
- VALY A., 1989 : Analyse technico-économique des systèmes de production géranium à la Réunion. Les conditions sociales et économiques de l'intensification au sein des petites exploitations. APDGD Chambre d'Agriculture de la Réunion, 78 p + annexes.
- VALY A., 1990 : Les exploitations dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. Production agricole et formation du revenu familial. Observatoire Départemental de la Réunion. Etudes et Synthèses n° 6, 90 p.
- VALY A., 1990 : L'installation des jeunes agriculteurs dans les Hauts de l'Ouest. Le modèle « Géranium/diversification ». Observatoire Départemental de la Réunion. Etudes et Synthèses, n° 7, 94 p.
- WALLWORK J.A., 1976 : The distribution and diversity of soil fauna. Academic Press, London, New-york, San Franscico, 355 p.